

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](https://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

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

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

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

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

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

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

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

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

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	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	1973, n° 4
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1973

Collation	1 vol. (50 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	56
Cote	INDNAT (105)
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.105

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

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

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

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

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

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

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

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

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

Bibliographie

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

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

S. E. I. N.
Bibliothèque

L'INDUSTRIE NATIONALE

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

*fondée en 1801
reconnue d'utilité publique*

•
Revue trimestrielle
1973 - N° 4

• • • •

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- **Les légumines, nouvelles sources de protéines utilisables dans l'alimentation humaine,**
par M. T. STARON, p. 3
- **Problèmes métallurgiques liés aux propriétés des supraconducteurs et des cryoconducteurs,**
par Mme C. DIMITROV, p. 23

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

- **Table des Matières** *p. 43*
- **Index des Auteurs** *p. 45*
- **Répertoire Quinquennal** *p. 47*

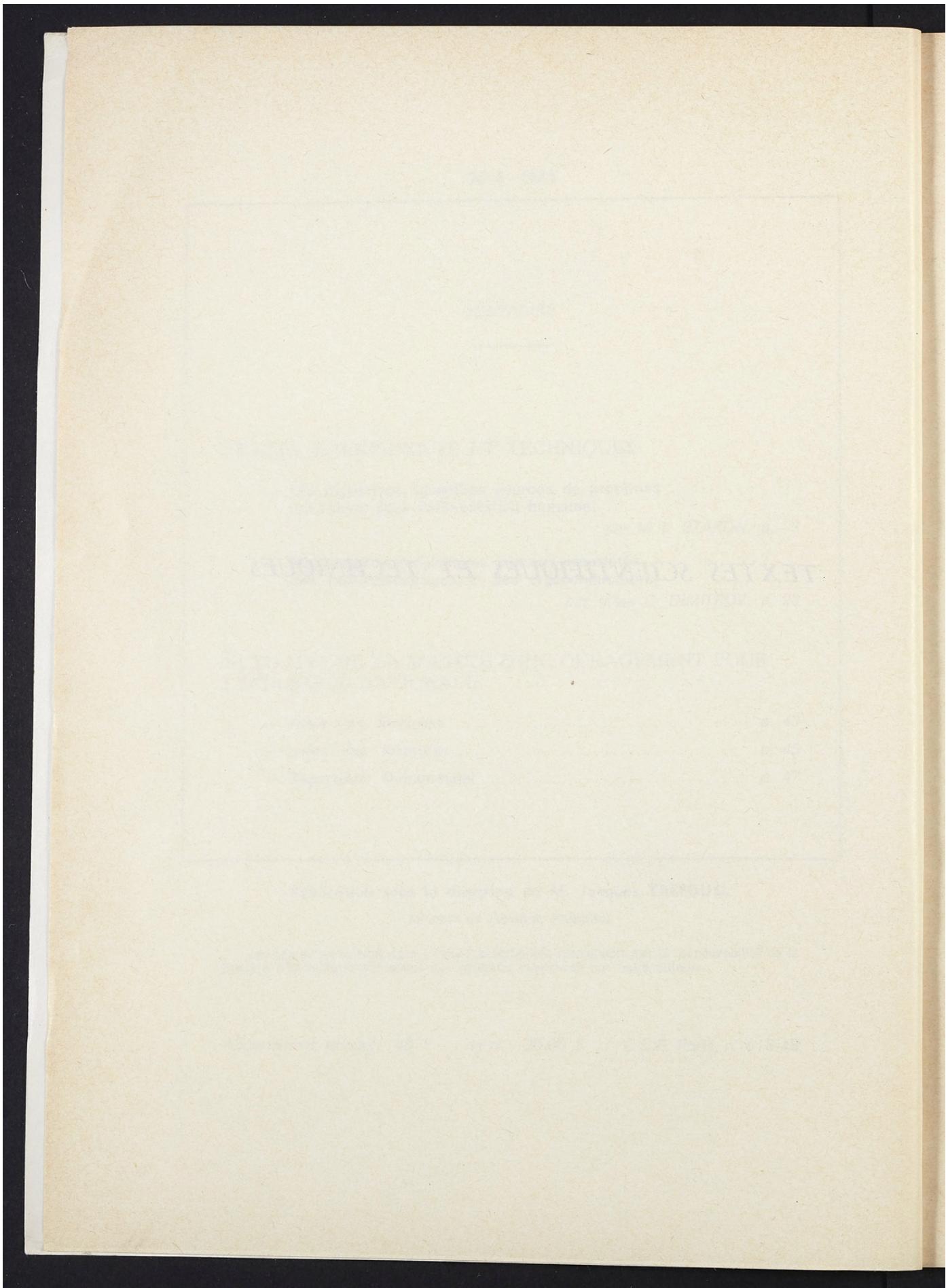
Publication sous la direction de M. Jacques TREFOUËL

Membre de l'Institut, Président

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

Abonnement annuel : 40 F le n° : 20,00 F C.C.P. Paris, n° 618-48

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires

*Les légumines, nouvelles sources de protéines utilisables dans l'alimentation humaine **

Par T. STARON

Maitre de Recherches à l'I.N.R.A.,

Directeur du Laboratoire des Antibiotiques

La différenciation des protéines en animales de bonne valeur alimentaire et végétales de valeur alimentaire médiocre est classique.

De ce fait, la F.A.O. en 1946 dans son enquête mondiale sur l'alimentation proposait d'utiliser le coefficient 7 pour estimer les produits animaux en calories végétales ou calories originelles. Cette estimation incluait deux notions fondamentales : la qualité médiocre de certaines calories végétales et le faible rendement obtenu lors de la transformation de celles-ci en calories animales.

Il était admis qu'un régime convenable doit fournir 12 à 17 % des calories alimentaires sous forme de protéines ; or, les récentes évaluations des experts de la F.A.O. réduisent les besoins de l'homme en protéines de moitié. Toutefois, il demeure encore exact qu'il y a malnutrition lorsque ce taux tombe au-dessous de 8 % pour le nourrisson et 5 % pour l'adulte. Or, la teneur des aliments végétaux en protéines est plus faible et leur valeur nutritionnelle est souvent moindre d'où la nécessité de

faire appel aux aliments d'origine animale ou de concentrer et de purifier par des moyens technologiques divers, les protéines végétales. Nous proposons d'appeler « *Légumines* » ce nouveau type de protéines.

CLASSIFICATION DES ALIMENTS DE L'HOMME SELON LEUR VALEUR PROTEIQUE.

De nombreuses nomenclatures des aliments existent : une classification selon leur valeur protéique peut-être envisagée. On peut ainsi aisément distinguer 6 groupes d'aliments.

Groupe I.

Les viandes, poissons, œufs.

Ces aliments sont les plus nutritifs et les plus appréciés. Ils titrent entre 13 et 22 % de protéines de très haute qualité.

On peut inclure dans ce groupe les crustacés, coquillages, mollusques qui comportent de 5 à 15 % de protéines d'une qualité moindre.

* Conférence prononcée le 31 janvier 1974 dans l'Hôtel de la Société.

Groupe II.

Le lait et les produits laitiers (fromages frais et fermentés), titrent entre 3,5 et 26 % de protéines bon marché et de bonne qualité. Leur équilibre en acides aminés est bon ; ils sont toutefois pauvres en acides aminés soufrés.

Groupe III.

Les concentrats et isolats protéiques obtenus à partir des aliments du groupe IV. Ils titrent entre 65 et 98 % de protéines de qualité généralement équivalente aux protéines du lait.

Groupe IV.

Il comporte 3 sous-groupes :

— *Farines de microorganismes* (levures d'alcanes, algues, levures de boulangerie), titrent entre 45 et 70 % de protéines ;

— *Les farines obtenues à partir de graines oléagineuses* (soja, arachide, sésame, tournesol, coprah, noix, noisettes, amandes, etc...). Après délipidation, ces farines titrent entre 20 et 55 % de protéines.

— *Les graines des légumineuses* (haricots, pois, lentilles, pois chiches, fèves), titrent entre 16 et 30 % de protéines.

Les protéines du groupe IV possèdent une valeur nutritionnelle élevée ; elles ont pour la plupart un bon équilibre en acides aminés (le facteur limitant est la méthionine). Elles ne peuvent toutefois être consommées en quantité importante sans technologie préalable, qui permet d'éliminer les nombreuses substances toxiques associées (isothiocyanates, phénols, peptides et protéines antienzymes, polysaccharides, glycosides divers...)

Groupe V.

Les graines de céréales (blé, riz, maïs, orge, millet, sorgho, avoine, seigle).

Ce groupe dont la production mondiale dépasse un milliard de tonnes par an, occupe une place importante dans

l'alimentation humaine puisqu'il apporte, selon les pays de 18 à 65 % des protéines consommées (35 % en France). Ces graines, ainsi que les produits alimentaires qui en sont issus titrent entre 6 et 13 % de protéines déséquilibrées (les acides aminés limitants sont la lysine, la thréonine, le tryptophane).

Groupe VI.

Les légumes frais, les tubercules, les champignons, les fruits.

Les produits de ce groupe titrent entre 0,5 et 5 % de protéines de valeur très variable. Ce sont surtout des sources de glucides, de calcium, oligoéléments, vitamines etc...

Production mondiale de graines oléagineuses et légumineuses.

La production mondiale des graines oléagineuses et légumineuses s'établissait comme suit en 1969 (résultats exprimés en millions de tonnes (MT)).

Soja	34
Arachide	14
Coton	18
Tournesol	9
Coprah	3,5
Colza	7
Lin	2,5
Total	88
Légumineuses	26
Total	114
soit 40 MT de protéines	
6,5 MT »	
46,5 »	

Les céréales apportent chaque année environ 80 MT de protéines, les farines de poisson 3 MT ; les viandes animales (bœuf, veau, porc, mouton, agneau, volailles) 15 MT ; les œufs, lait, produits laitiers, poissons 15 MT.

CARACTERISTIQUES ET PROPRIETES DES PROTEINES VEGETALES.

On différencie les protéines des plantes vertes de celles de leurs graines.

I. — *Les protéines des plantes vertes.*

Les plantes vertes renferment de 1,5 à 3,5 % de protéines. Celles-ci sont principalement localisées dans les feuilles où l'on retrouve 85 % de protéines totales.

On distingue ainsi deux grands types de protéines :

Les protéines cytoplasmiques (30 % des protéines totales) et *les protéines chloroplastiques* généralement plus insolubles (35 à 45 % des protéines totales).

Un fractionnement par le sulfate d'ammoniaque permet d'aboutir à des fractions dont le poids moléculaire varie entre 100 000 et 600 000. Environ 40 % de celles-ci sont constituées par des protéines enzymes.

L'équilibre des protéines de feuilles en acides aminés est convenable (facteur limitant = méthionine) et leur valeur biologique est bonne lorsqu'elles sont débarrassées des agents antinutritionnels (phénols, saponines, flavones).

II. — *Les protéines des graines.*

Les protéines des graines peuvent être classifiées en 4 groupes (Osborne 1924).

- a) Les albumines solubles dans l'eau ;
- b) Les globulines solubles dans les solutions salines neutres ;
- c) Les prolamines solubles dans l'alcool à 70 % ;
- d) Les glutelines solubles dans les alcalis.

Les graines des monocotylédones qui contiennent entre 5 et 15 % de protéi-

nes sont riches en prolamines et glutelines qui sont localisées dans l'endosperme et l'embryon.

Les graines des dicotylédones possèdent entre 15 et 35 % de protéines constituées surtout de globulines qui sont localisées dans l'embryon. Ces protéines possèdent des poids moléculaires qui varient entre 20 000 et 600 000 ; certaines d'entre elles ont des propriétés enzymatiques (β -amylase, lipoxygénase, myrosinase).

De 10 à 20 % des éléments azotés des graines sont sous forme de peptides de poids moléculaire variant entre 6 000 et 20 000 ; certaines de ces molécules possèdent des activités toxiques ou antienzymatiques (antitrypsines).

QUELQUES EXEMPLES DE COMPOSITION DES GRAINES OLEAGINEUSES EN PROTEINES.

a) *Composition en protéines des graines de soja*

Les protéines natives des graines de soja ont été les plus étudiées et sont par conséquent les mieux connues.

En fractionnant les extraits aqueux par ultracentrifugation on distingue 4 fractions principales 2S, 7S, 11S, 15S. Ces fractions peuvent être réidentifiées par filtration sur gels.

Le tableau I illustre cette composition.

Les fractions 7S et 11S constituent 70 % des protéines totales du soja. Elles se présentent sous forme de dimères reliés par des ponts disulfures qui peuvent être dissociés par des réducteurs tels que le mercaptoéthanol, la cystéine et le sulfite de sodium. La globuline 7S peut être dissociée en 9 sous-unités et en fractions 2S-3S. Dans la globuline 11S il a été identifié 12 chaînes polypeptidiques. Ces deux globulines contiennent du phosphore sous forme de phytate.

Tableau I

Fraction	Composants	Poids moléculaires	% des protéines total
2S	Inhibiteurs de trypsine	8000 - 21.000	22
	Cytochrome C	12.000	
	Protéines inconnues		
7S	4 Hémagglutinines 2 Lipoxygénases 1 β amylase Globuline 7S monomère	110.000 102.000 61.700 180.000-210.000	37
11S	Globuline 11S	350.000	31
15S		600.000	11

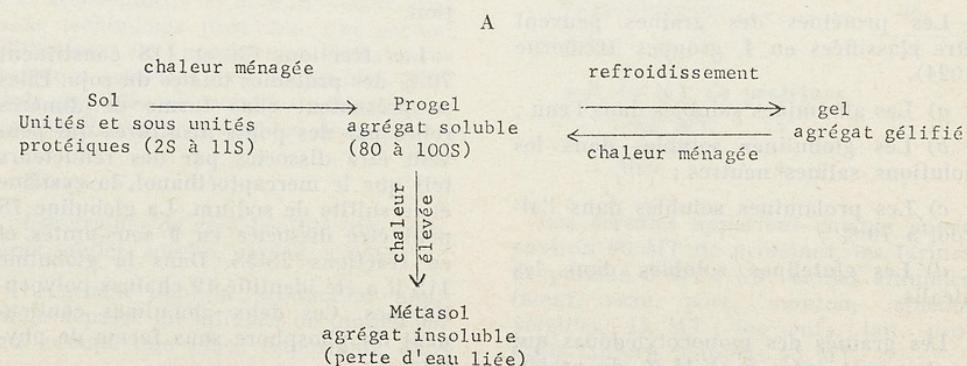
Propriétés physicochimiques des protéines du soja.

Les solubilités des protéines natives varient considérablement avec leur mode d'obtention. Lorsque la délipidation des graines a été réalisé à froid et que l'extraction des protéines est douce (H_2O , NaCl) et se fait à température ambiante, à pH 7-8, et en présence d'un réducteur (mercaptoéthanol 0,01 M), il est possible de récupérer 80 % de la fraction protéique, chez laquelle on retrouve les caractéristiques décrites dans le tableau I. Le pH isoélectrique des isolats ainsi obtenus se situe entre 3,9 et 5,1.

Les acides (pH = 2), les alcalis (pH = 12), la chaleur (70 à 100 °C pendant 10 à 30 minutes) altèrent profondément les protéines du soja. La dénaturation la plus fréquemment prévisible se traduit selon les cas par une apparition de sous-unités (de 0,4 à 4S) non reprécipitables ou bien par des polymérisations qui aboutissent à des gels et des précipités constitués d'agrégats de haut poids moléculaire (80 à 100S).

Le schéma A représente l'effet global de la chaleur.

La fraction 11S chauffée en présence de mercaptoéthanol 0,1 M ne se polymé-



rise pas, par contre dans les mêmes conditions la N éthylmaleimide 0,01 M donne des polymères solubles et stables.

Les caractéristiques des protéines d'extraction sont largement exploitées et permettent le filage et la texturation.

b) *Composition des graines de colza en protéines*

Les protéines natives des graines de colza sont moins bien connues que les protéines du soja et elles varient considérablement avec les variétés et les méthodes culturales, ce qui explique les grandes divergences entre les travaux tchèques, canadiens et suédois. En effet, les variations d'azote non protéique (de 2 à 11 %) et des groupes de protéines sont très importantes. Ces protéines se caractérisent par des solubilités dans l'eau (30 à 50 %), dans le NaCl à 5 % (25 à 50 %) et dans la soude 0,1 N (30 à 60 %) beaucoup plus faibles que celles du soja (80 à 90 %, pour les trois solvants). En outre ces protéines sont difficilement réprécipitables.

D'après un travail suédois cité par Appelquist et réalisé sur *Brassica napus*, il y aurait environ 20 protéines acides, 20 protéines neutres et 5 protéines basiques :

- 20 % de ces protéines possèdent un P.M. de 16 - 20 000 ;
- 5 % de ces protéines possèdent un P.M. de 50 - 75 000 ;
- 75 % de ces protéines possèdent un P.M. de 125 - 150 000.

Le constituant majeur est une globuline 12S qui se fragmente en 3S et 7,2S.

De nombreuses enzymes ont été également identifiées (thioglycoside glucohydrolase, lipase, lipoxygénase, choline kinase, acide glycérique kinase, glutamique décarboxylase, β galactosidase, β glucosidase, estérase).

c) *Composition des graines de tournesol en protéines*

Les graines de tournesol décortiquées, délipidées comportent 55 % d'azote

6,25 et se décomposent en : 5 à 8 % d'azote non protéique ; 10 à 15 % d'albumines ; 60 à 65 % de globulines et 15 à 20 % de protéines de constitution, extractibles par les alcalis en présence de détergents.

Aucun facteur antinutritionnel n'a été signalé dans les graines de tournesol ; par contre, celles-ci sont très riches en acide chlorogénique (2 % du poids sec) qui rend les fractionnements difficiles et brunit les protéines.

Les composés toxiques présents dans les graines oléagineuses et légumineuses.

La plupart des graines oléagineuses recèlent des quantités plus ou moins grandes de toxines et de facteurs antinutritionnels. Signalons pour mémoire les peptides antitrypsiques et les hémagglutinines du soja, le gossypol du coton, les isothiocyanates goïtrogènes rencontrés dans le colza et le soja ; les glycosides cyanogénétiques du lin et les amines allergisantes du coprah. Les méthodes utilisées pour extraire les protéines devront éliminer les substances toxiques ; or cela n'apparaît pas toujours très facile à réaliser. Ainsi, on signale que les isolats de soja peuvent contenir de 0,1 à 2 % de peptides antitrypsiques. Signalons toutefois que ces facteurs n'ont pas été retrouvés dans les aliments à base de ces isolats.

Les nouvelles sources de protéines pour l'alimentation humaine.

La richesse en protéines équilibrées de certaines farines végétales, la sélection de plantes protéagineuses, la découverte de microorganismes performants, les progrès technologiques importants, la demande croissante de produits carnés limitée par les faibles rendements de la machine animale et les perspectives d'une faim protéique ont, ces dernières années, stimulé, à des degrés divers, des recherches qui ont abouti à l'obtention de protéines végétales purifiées, de haute qualité, directement incorporeables dans l'alimentation humaine.

Pour qu'une technologie des protéines se justifie, il faut que le matériel traité présente au moins trois caractéristiques principales :

- a) qu'il soit produit en quantité importante ;
- b) qu'il possède une haute teneur en protéines ;
- c) que l'équilibre de ses protéines en acides aminés soit convenable et leur valeur biologique élevée.

Ces caractéristiques limitent les protéines d'extraction à trois groupes :

- 1) Protéines issues de graines oléagineuses et légumineuses (soja, arachides, tournesol, féveroles, colza, pois).
- 2) Protéines issues des microorganismes (levures d'alcanes, levures de boulangerie, algues, bactéries).
- 3) Protéines issues des plantes vertes (luzerne, sorgho).

I. — PROTEINES ISSUES DE GRAINES OLEAGINEUSES ET LEGUMINEUSES

La tradition alimentaire chez de nombreuses populations a montré qu'il était possible d'équilibrer un régime végétalien en consommant des graines riches en protéines. Les produits issus du soja et de l'arachide sont variés et occupent une place importante dans la nutrition azotée des peuples d'Asie et d'Afrique. Ainsi au Japon, en 1967, il a été consommé 642 000 tonnes de soja sous différentes formes.

Dans les pays industrialisés, ces sources de protéines bon marché ont contribué, ces dernières décennies, au développement considérable des productions animales.

Aux U.S.A., les farines de soja sont incorporées dans de nombreux aliments de l'homme depuis une vingtaine d'années. Les éléments qui ont contribué à ce développement sont les suivants :

- Une campagne contre les effets hypercholestérolémiant du lait ;

— L'apparition des aliments diététiques ;

— Les propriétés technologiques assez remarquables des protéines végétales ;

— Le développement considérable des aliments consommés rapidement (casse-croûtes = snack foods). En effet, les ventes de ces aliments ont progressé de 50 % en 10 ans (2 millions de dollars de ventes en 1959 et 3 millions de dollars de ventes en 1968). Or, ces produits riches en hydrates de carbone et graisses, ont posé et posent toujours de nombreux problèmes nutritionnels dans certaines catégories de la population.

Les préparations à base de soja qui ont d'abord connu une grande vogue aux U.S.A. plafonnent. En 1970, 130 000 tonnes de farines, 15 000 tonnes de concentrats et 10 000 tonnes d'isolats ont seulement été produits. Pour ce qui concerne les farines leur consommation s'est répartie comme suit : 30 000 tonnes sous forme de plats cuisinés ; 19 000 tonnes sous forme d'aliments carnés ; 6 000 tonnes sous forme de boissons ; 4 000 tonnes sous forme d'aliments infantiles ; 3 000 tonnes sous forme de macaroni et de flocons et 50 000 tonnes ont été achetées par le gouvernement pour divers usages. Depuis 1971, les farines de soja à usage humain, auraient subi une progression importante et leur production atteindrait en 1973 1 million de tonnes.

Méthodes d'obtention des protéines végétales à partir des graines.

Trois classes de préparations sont actuellement utilisées dans l'alimentation humaine :

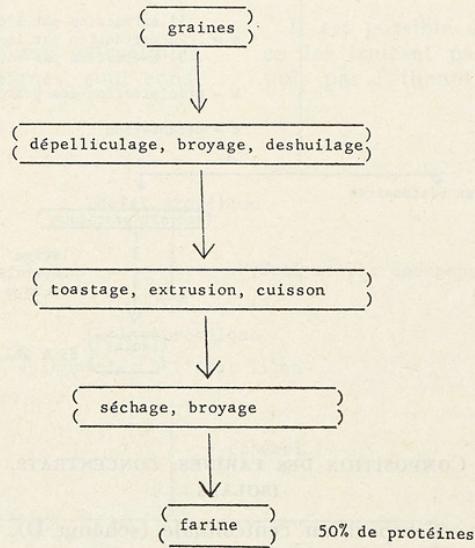
- a) les FARINES titrant entre 40 et 50 % de protéines ;
- b) les CONCENTRATS titrant entre 60 et 70 % de protéines ;
- c) les ISOLATS titrant de 85 à 98 % de protéines.

Les farines et les concentrats sont principalement obtenus à partir du soja

alors que l'on connaît actuellement des *isolats* de soja, tournesol, féveroles, colza qui sont obtenus par voie *aqueuse*, *chimique* ou *fermentaire* et qui sont développés aux U.S.A., en France, en Suède et en Grande-Bretagne.

a) *Les farines*

Aux U.S.A., la première génération d'aliments à base de protéines végétales contenaient exclusivement des farines de soja obtenues selon le schéma suivant :

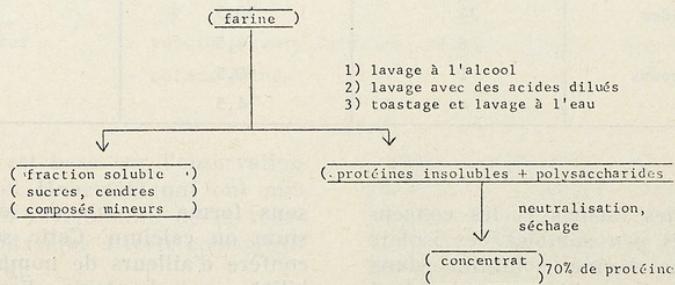


b) *Les concentrats*

Les farines de soja ont une bonne valeur alimentaire mais présentent de nombreux inconvénients : elles sont insolubles, elles possèdent une saveur caractéristique peu agréable, des hydrates de carbone peu digestibles, engendrant des flatulences : d'où la nécessité de soumettre ces farines à une technologie plus élaborée. Elles sont purifiées par trois méthodes selon le schéma B :

téristique peu agréable, des hydrates de carbone peu digestibles, engendrant des flatulences : d'où la nécessité de soumettre ces farines à une technologie plus élaborée. Elles sont purifiées par trois méthodes selon le schéma B :

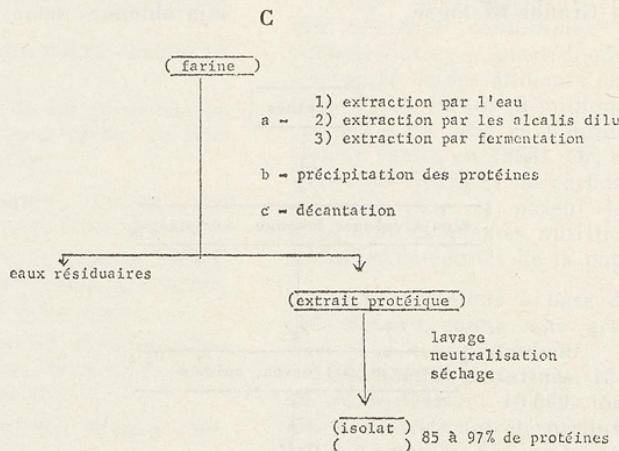
B



c) *Les isolats*

Les isolats sont obtenus en extrayant les protéines à partir des farines, *par*

l'eau, par des solutions alcalines ou par fermentation en présence d'un micro-organisme selon le schéma C :



COMPOSITION DES FARINES, CONCENTRATS, ISOLATS

Composition centésimale (schéma D).

D

	Farines (soja)	Concentrants (soja)	Isolats (soja, colza, tournesol, féveroles)
Protéines	50	70	94
Graisses	1,5	0,5	~
Cellulose	3,5	3,5	0,2
Autres glucides	34	16,5	0,2
Cendres	6	4,5	3
Composés mineurs	1	0,5	0,3
eau	4	4,5	2,3

Alors que les farines et les concentrats sont très peu solubles, les isolats possèdent une bonne solubilité dans l'eau, surtout lorsqu'ils se présentent

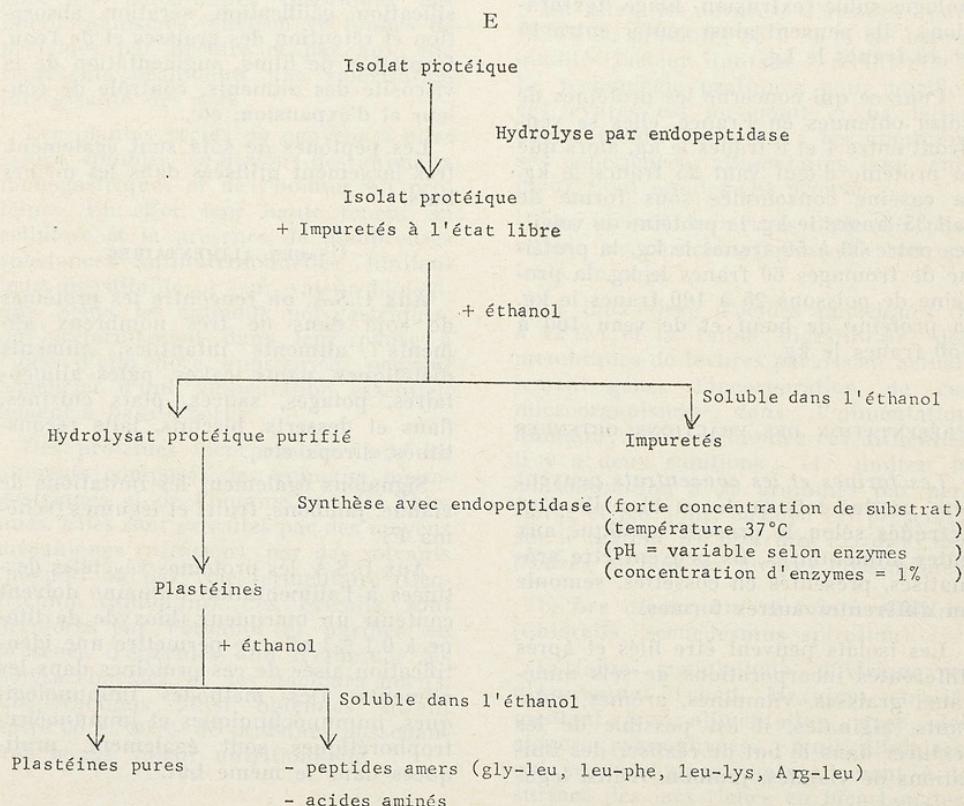
sous forme de sels de sodium, potassium ou calcium. Cette solubilité leur confère d'ailleurs de nombreuses possibilités en technologie alimentaire.

Les sucres contenus dans les farines et les concentrats sont des polysaccharides acides et des α glycosides (stachyose, verbascose, raffinose) de valeur alimentaire médiocre. Dans les cendres on rencontre de nombreux sels minéraux (chlorures, sulfates, phosphates) ceux-ci sont engagés dans de nombreuses molécules (glycosides, phytates).

Les composés mineurs extractibles par les solvants organiques, sont cons-

titués par des glycérides, des phosphatides, des saponines, des glycosides stéroliques, des isoflavones, des phénols, des amines etc... Ces molécules sont difficiles à éliminer totalement et confèrent aux farines de la couleur, de la saveur et elles diminuent leur durée de conservation.

Il est possible de purifier les isolats en les traitant par des endopeptidases puis par l'éthanol selon le schéma E :



Ce schéma est basé sur l'observation de Horowitz et Haurovitz qui ont mis en évidence la réversibilité de la réaction endopeptidasique à forte concentration de substrat.

Cette purification ultime des isolats présente de nombreux avantages, parmi lesquels on peut citer l'élimination totale des peptides amers et autres molécules apportant des saveurs peu appréciées.

PRIX DES FARINES, CONCENTRATS,
ISOLATS

Aux U.S.A., les prix des protéines végétales exprimés en francs français sont les suivants : environ 2 francs le kg pour les farines ; 3 à 5 francs le kg de concentrats, 6 à 12 francs le kg pour les isolats. Quant aux produits alimentaires à base de protéines de soja, leurs prix sont très variables et dépendent des ingrédients incorporés (arômes, graisses, vitamines, oligoéléments) et de la technologie subie (extrusion, filage, texturation) : ils peuvent ainsi coûter entre 15 et 40 francs le kg.

Pour ce qui concerne les protéines de colza obtenues en France, elles se vendront entre 4 et 8 francs le kg, alors que la protéine d'œuf vaut 25 francs le kg, la caséine consommée sous forme de lait 35 francs le kg, la protéine de volailles entre 30 à 50 francs le kg, la protéine de fromages 60 francs le kg, la protéine de poissons 25 à 100 francs le kg, la protéine de bœuf et de veau 100 à 150 francs le kg.

PRÉSENTATION DES FRACTIONS OBTENUES

Les farines et les concentrats peuvent être vendus tels quels ou bien ils sont extrudés selon le procédé appliqué aux pâtes alimentaires. Ils peuvent être aromatisés, présentés en cossettes, semoule ou différentes autres formes.

Les isolats peuvent être filés et après différentes incorporations de sels minéraux, graisses, vitamines, arômes, colorants, alginates, il est possible de les texturer dans le but de réaliser des imitations de viandes, jambon, fruits, légumes

etc... On retrouvera ci-dessous le schéma détaillé de cette technologie.

PROPRIÉTÉS TECHNOLOGIQUES DES
PROTÉINES A PARTIR DES GRAINES
OLÉAGINEUSES ET LÉGUMINEUSES

Outre leur valeur alimentaire, les protéines végétales possèdent des propriétés physicochimiques, qui permettent de les employer avantageusement en technologie alimentaire. C'est ainsi qu'elles sont utilisées à des fins d'émulsification, gélification, aération, absorption et rétention des graisses et de l'eau, formation de films, augmentation de la viscosité des aliments, contrôle de couleur et d'expansion, etc...

Les peptones de soja sont également, très largement utilisées dans les mêmes buts.

USAGES ALIMENTAIRES

Aux U.S.A. on rencontre les protéines de soja dans de très nombreux aliments : aliments infantiles, aliments diététiques, pains, cakes, pâtes alimentaires, potages, sauces, plats cuisinés, flans et desserts, biscuits, laits reconstitués, sirops etc...

Signalons également les imitations de viande, jambons, fruits et légumes (schéma F).

Aux U.S.A. les protéines végétales destinées à l'alimentation humaine doivent contenir un marqueur (oxyde de titane à 0,1 %) afin de permettre une identification aisée de ces protéines dans les aliments. Des méthodes immunologiques, immunochimiques et immunoélectrophorétiques sont également pratiquées dans le même but.

F

Taux d'incorporation légaux, en %.

	<u>FARINE</u>
Sauces	3,5
Pâtes	8
Raviolis	12

	<u>CONCENTRATS</u>	<u>ISOLATS</u>
	3,5	2
	8	8
	12	12

II. — LES PROTEINES ISSUES DES PLANTES VERTES

Les plantes vertes produisent des quantités importantes de protéines généralement bien équilibrées. En effet, il est possible de produire par an, à l'hectare : 150 à 200 kg de protéines de viande, 400 kg de protéines de lait, 700 à 1 200 kg de protéines de soja, colza, féveroles, pois, et 1 800 à 3 000 kg de protéines de luzerne. Cette quantité de protéines obtenue est encore très éloignée des potentialités théoriques des microorganismes (environ 40 tonnes de protéines par hectare et par an), elle représente néanmoins une valorisation intéressante des sols.

Les plantes vertes ne peuvent à elles seules, combler les besoins des animaux monogastriques et de l'homme en protéines. En effet, leur haute teneur en cellulose et la présence de nombreuses substances antinutritionnelles limitent leur digestibilité et leur valeur biologique. Seuls, les animaux polygastriques, qui pré fermentent dans leur panse à l'aide d'une flore appropriée, peuvent bénéficier d'une alimentation essentiellement à base d'herbe.

Des protéines incorporables dans les aliments composés des animaux monogastriques et de l'homme ont été obtenues. Elles sont extraites par des moyens mécaniques (pression), par des solvants (phénol) ou par voie fermentaire (*Geotrichum candidum*). Ces extraits sont décolorés par l'éthanol et purifiés en présence d'enzymes afin d'éliminer les polysaccharides et les facteurs nocifs. Les fractions ainsi obtenues titrent entre 65 et 90 % de protéines possédant une bonne valeur nutritionnelle.

III. — LE PROTEINES ISSUES DE MICROORGANISMES

On distingue 4 groupes :

a) *les levures cultivées sur substrats conventionnels* : mélasse, liqueurs bisuifiques, moûts de brasserie, etc...

La production mondiale ne dépasse guère 300 000 tonnes par an. Elles sont surtout utilisées comme additifs dans l'alimentation du bétail ;

b) *les levures d'alcanes.*

La découverte de microorganismes qui utilisent les paraffines comme source énergétique laisse envisager dans les années à venir une production importante de protéines dans l'alimentation des animaux puis pour l'alimentation humaine.

En effet, les levures d'alcanes sont riches en protéines 55 à 65 % de bonne qualité (facteur limitant = méthionine). La technologie pratiquée pour purifier ces levures est au point et ne laisse aucun résidu important ; les nombreuses expériences alimentaires sur animaux l'ont amplement prouvé.

Les farines de levures d'alcanes possèdent les caractéristiques des concentrats de soja.

Le taux élevé d'acides nucléiques (8 à 12 %) et la faible digestibilité des membranes de levures paraissent actuellement gêner l'incorporation de ces microorganismes dans l'alimentation humaine. Pour surmonter ces difficultés il y a deux solutions : (1) limiter la consommation à 20 grammes par personne et par jour, ou bien (2) présenter sur le marché les *protéines extraites des levures* et non les levures elles-mêmes.

c) *Les algues uni et multicellulaires* (*Chlorella, Scenedesmus spirulina*).

Certaines populations d'Afrique et d'Amérique (Tchad, Mexique) supplémentent leur alimentation avec des algues cyanophycées multicellulaires, qui se développent naturellement à la surface des lacs riches en bicarbonates.

Depuis une dizaine d'années l'Institut Français du Pétrole réalise des essais de culture en Algérie, au Tchad et au Mexique avec deux souches d'algues : *Spirulina platensis* et *Spirulina maxima*. Ces expériences ont donné lieu à des développements intéressants et permis d'aboutir à des productions qui varient

selon l'ensoleillement et la température de 8 à 16 grammes de matière sèche par mètre carré et par jour

Ces algues relativement pauvres en acides nucléiques (4 %), sont riches en protéines (de 62 à 75 %) et elles peuvent être facilement décolorées.

Les nombreuses expériences réalisées sur animaux ont prouvé la non toxicité de ces microorganismes, qui possèdent un coefficient d'efficacité protéique à peine inférieure à celui de la caséine.

Les essais réalisés sur enfants ont mis en évidence que les spirulines possèdent une valeur nutritionnelle tout à fait satisfaisante.

Des programmes patronnés par les organismes internationaux (U.N.I.C.E.F./F.A.O./W.H.O.) sont en cours dans de nombreux pays et des aliments contenant de 4 à 10 % de spirulines, sont largement distribués.

d) *Les bactéries* (Méthanomonas, Pseudomonas, Acinetobacter, etc...).

La plupart des microorganismes essayés, utilisent des sources de carbones bon marché : ils oxydent le méthane, l'éthanol et les alcanes, la valeur nutritive de leurs protéines demeure inconnue.

Composition en acides aminés et valeur alimentaire des protéines végétales.

Les traitements technologiques utilisés pour éliminer les substances peu digestibles ou toxiques, dénaturent les protéines natives et par conséquent altèrent leurs propriétés physico-chimiques initiales : on voit apparaître de nouveaux peptides, des hauts polymères et de nouvelles protéines. Il importe surtout que les propriétés nutritives soient respectées, voire potentialisées, c'est pourquoi certains acides aminés fragiles (cystine, méthionine, lysine) devront être protégés lors des extractions par adjonction d'agents réducteurs, de cations bivalents

etc... Lorsque toutes les précautions sont prises, la composition en acides aminés des protéines végétales obtenues, reflète assez fidèlement celle des graines dont elles sont issues : ainsi les protéines de soja et de féveroles sont limitées en acides aminés soufrés ; les protéines d'arachide sont pauvres en acides aminés soufrés, lysine, thréonine : les protéines de colza sont bien équilibrées.

Malgré toutes les précautions prises, les isolats obtenus par la soude sont appauvris en lysine et méthionine, cystine.

Dans le tableau II sont consignées les compositions en acides aminés de quelques aliments d'origine animale et de quelques farines végétales.

**VALEUR NUTRITIVE
DES PROTEINES D'EXTRACTION**

Pour avoir une efficience optimale tous les acides aminés doivent être pris simultanément dans la composition exigée par l'organisme de l'espèce considérée.

Le tableau II ci-dessous illustre les coefficients d'efficacité protéiques com-

TABLEAU II

- oeuf de poule entier	3,2
- caséine de lait de vache	2,8
- farine de soja crue	1,1
- farine de soja toastée	2,3
- farine de soja toastée + méthionine	2,8
- concentrat de soja	2,6
- isolat de soja	2,2
- isolat de soja + méthionine	2,8
- farine d'arachide	1,6
- farine d'arachide supplémentée en lysine, méthionine, thréonine	2,9
- protéine de colza fermentée (protéine γ)	2,9
- protéine de colza fermentée (protéine β)	3,3
- protéine β du colza + phénylalanine	2,8
- muscle de bœuf	3,0
- blé entier	1,4
- riz	1,6
- maïs	1,2
+ farine d'arachide 50 %	2,5
+ protéine de colza fermentée 50 %	2,8
+ protéine de colza fermentée 50 %	2,8
- protéine de luzerne	2,2
- levures cultivées sur alcanes	2,5
- spirulines	2,5

parés ($CEP = \frac{\text{gain de poids}}{\text{protéines ingérées}}$) de quelques protéines : (expériences réalisées sur rats mâles au sevrage pendant 21 jours, taux de protéines dans l'aliment : 10 %).

Ainsi l'œuf entier de poule et la protéine β du colza donnent les meilleures croissances chez le rat. Pour ce qui concerne la protéine β son efficience semble conférée par la faible teneur de cette protéine en tyrosine, phénylalanine et leucine. En effet, lorsque l'on rajoute de la L-phenylalanine dans l'aliment le CEP diminue.

Cette observation nous paraît intéressante ; en effet sur les 20 acides aminés présents dans les protéines, dix sont indispensables pour les organismes supérieurs ; or, si quatre acides aminés (lysine, méthionine et cystine, tryptophane, thréonine) se trouvent fréquemment en faible quantité dans les protéines végétales, la leucine, phénylalanine et tyrosine sont toujours excédentaires et il serait souhaitable dans certains cas pathologiques (leucinose, phénylcétonurie, alcaptonurie) d'en diminuer le taux en appliquant des technologies appropriées.

Chez l'homme, les expériences nutritionnelles réalisées à Formose, sur 28 enfants pendant 6 mois ainsi que les nombreux essais faits sur des étudiants, prisonniers, et divers volontaires ont montré que les préparations à base de soja ont, lorsqu'elles sont supplémentées, un CEP et un coefficient d'utilisation digestive à peine inférieure à la caséine.

Les essais de supplémentation réalisés à la Jamaïque et aux Indes sur des enfants dénutris, avec des protéines extraites d'herbe ont prouvé que la complémentation d'une alimentation déséquilibrée avec ces fractions permettait de rétablir un bilan azoté positif et assurait une croissance meilleure que celle obtenue en supplémentant avec de la lysine ou de la farine de sésame. Les expériences réalisées, dans de nombreux

pays avec les spirulines ont donné de bons résultats et laissent augurer un développement important de ce type de supplémentation.

Aspects hygiéniques résultant de l'utilisation des protéines végétales d'extraction dans l'alimentation humaine.

La législation protège les aliments traditionnels de l'homme et réglemente les supplémentations. Il paraît logique que les protéines nouvelles qui sont amenées à rentrer dans l'alimentation humaine subissent de très nombreux contrôles physico-chimiques dans le but de déceler les polluants naturels ou accidentels (facteurs antienzymatiques, hémagglutinines, substances goûtrigènes, hydrates de carbone indigestes, phénols divers, saponines, aflatoxines, micro-organismes pathogènes). Ces protéines devront être largement expérimentées sur plusieurs espèces animales ; expériences à *court terme* pour définir leur valeur nutritionnelle et expériences à *long terme* afin de déceler leurs effets éventuels sur les générations (expériences de proliférabilité et de tératogénèse appuyées par des examens anatomopathologiques d'organes).

Les préparations alimentaires traditionnelles dans lesquelles ces protéines seront incluses devront également être soigneusement analysées afin d'identifier les éventuelles actions sur les éléments nutritifs habituels (putrescibilité, perturbation de la maturation, apparition de composés toxiques).

Les moyens actuels d'investigation permettent de donner au consommateur des garanties solides.

Actuellement, la définition souvent très précise des aliments consommés, ne laisse guère de place à ce nouveau type d'incorporations et gêne le législateur qui momentanément tolère cette pratique. Il faudra donc imaginer des aliments nouveaux avec des appellations nouvelles et étiquetter leur composition exacte, afin d'éviter les abus.

Aspects psycho-sociologiques.

Jean Trémollières définit l'aliment comme étant une denrée nourrissante, appétente et coutumières. Les protéines nouvelles que nous venons de décrire possèdent une valeur alimentaire élevée, elles sont donc nourrissantes sans être coutumières ; *sont-elles appétentes* ? La première génération des produits issus du soja n'a pas eu de succès durable. En effet, ceux-ci quoique partiellement purifiés possédaient encore *un goût assez prononcé* qui était conféré par de nombreuses substances mineures : *composés carbonylés* (acetaldehyde, acetone, n-hexanal) ; *phenols* (acides syringique, p-coumarique, férulique) ; *acides gras volatils* (acides isocaproïque, n-caproïque, n-caprylique) ; *amines* (méthylamine, diméthylamine, piperidin-cadavérine) *alcools amers* (3 méthyl 1 butanol, n-hexanol, n-heptanol).

Le deuxième inconvénient désagréable est le phénomène de *flatulence* occasionné par la dégradation microbienne dans le gros intestin du stachyose, raffinose et verbascose, ces sucres ne sont pas digérés dans l'intestin grêle car l'homme ne possède pas d'*α* galactosidase.

Les produits de la deuxième génération : concentrats, isolats ont été très améliorés mais tous n'ont pas encore une qualité irréprochable, les Japonais les soumettent d'ailleurs à une fermentation avant de les distribuer dans l'alimentation humaine. Ces produits possèdent souvent des peptides amers contenant de la leucine en position carboxy-terminale.

Ces menues agressions diminuent la valeur affective et les propriétés émotionnelles (stimulation de l'appétit) des aliments pris et sont susceptibles d'inhiber les effecteurs qui déclenchent et qui régleront le bon développement de la digestion (stimulation des sécrétions digestives et des glandes endocrines) ; ce qui se traduit par une sensation agréable de chaleur, de vigueur et de vitalité.

Pour ce qui concerne les *aspects socio-logiques*, l'apparition et le développement des protéines végétales dans l'alimentation humaine n'a pas encore la même signification dans nos pays industrialisés que dans les pays où la malnutrition est latente. Elle se justifie actuellement par l'augmentation du prix des produits carnés et les besoins croissants en aliments diététiques. Ces protéines seront-elles donc consommées essentiellement par les *pauvres et les malades* ? seront-elles les témoins du paupérisme et les éléments d'une nouvelle ségrégation ? Elles peuvent être les moteurs d'une promotion alimentaire, support de la pensée humaine et base du progrès intellectuel.

CONCLUSIONS

L'animal est un transformateur médiocre, donc onéreux. Des protéines de qualités équivalentes à la viande peuvent être obtenues à partir des végétaux grâce à des technologies très élaborées.

A ce jour, seules les protéines extraits du soja ont été assez largement utilisées dans l'alimentation humaine. De nouvelles protéines issues d'autres graines oléagineuses (tournesol, colza), légumineuses (féveroles, pois), d'herbes (luzerne, sorgho) ou de microorganismes (levures d'alcane) sont en voie d'élaboration ou d'homologation.

L'avènement, maintenant éminent, de cette nouvelle génération de protéines d'extraction, permettra de résoudre de nombreux problèmes de malnutrition et de diététique.

Le problème des protéines est un problème sérieux. Il a ces dernières années sensibilisé le grand public, les responsables des nations et des organisations internationales. Cette prise de conscience sera un stimulant de recherches et le plus sûr garant de leur réussite.

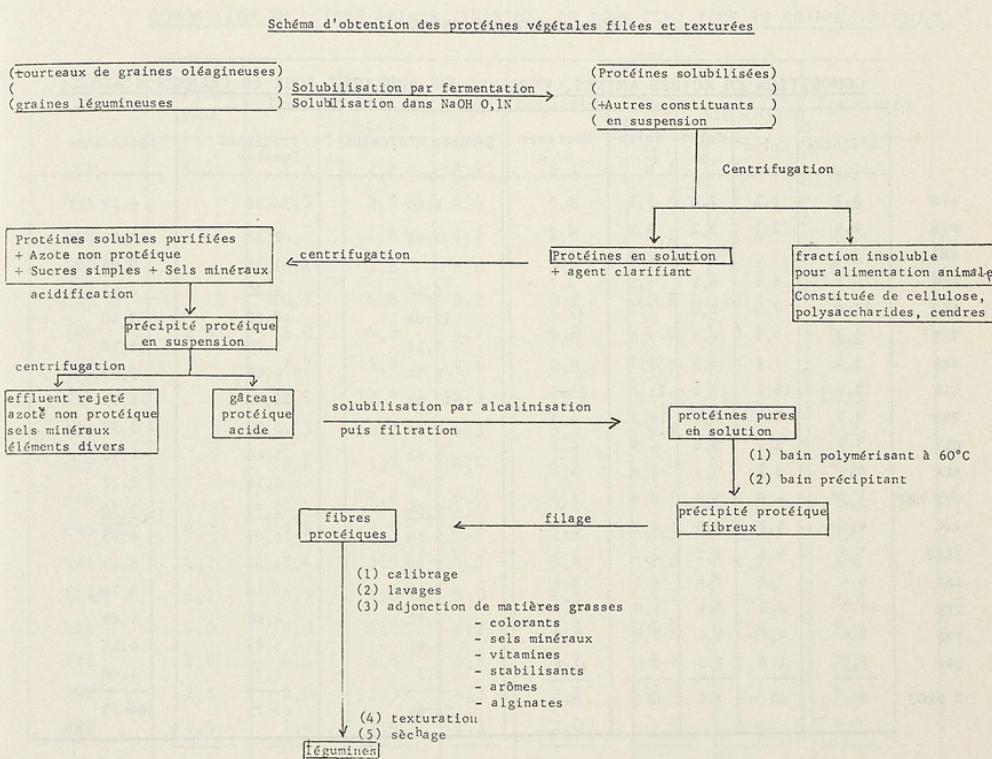


TABLEAU SYNTHÉTIQUE I

COMPOSITION EN ACIDES AMINES, EXPRIMÉE EN POUR CENT POUR 16 GRAMMES d'AZOTE;

	Arachide	Colza	Colza γ	Colza β	Haricots secs	Levures d'alcanes	Protéines Luzerne	Spirulines
LYS	<u>3,7</u>	5,3	7,0	7,3	6,5	8,60	6,58	4,18
HIS	2,4	2,7	3,2	4,3	2,9	1,93	2,57	1,55
NH3	2,1		2,1	2,0	1,9		1,18	0,96
ARG	10,1	6,5	6,3	6,5	5,7	6,14	6,80	6,43
ASP	11,6	7,0	7,0	2,7	12,5	12,08	10,69	9,10
THR	<u>3,2</u>	4,3	4,8	3,6	5,1	5,17	5,24	5,19
SER	5,5	4,3	4,5	3,9	6,0	6,52	4,68	5,39
GLU	18,9	18,3	17,2	25,7	15,5	17,53	11,77	12,91
PRO	5,5	7,4	7,6	10,2	4,3	4,73	5,22	3,55
GLY	5,9	5,2	5,6	4,9	4,5	5,62	5,46	4,90
ALA	4,1	4,2	5,3	4,0	4,7	7,98	6,34	7,72
CYS MET	<u>1,7</u>	4,5	<u>3,8</u>	6,8	<u>1,9</u>	<u>2,04</u>	<u>2,90</u>	<u>3,50</u>
VAL	4,0	4,7	5,8	4,1	5,7	3,10	6,03	6,65
ILEU	3,4	4,6	4,5	3,1	4,8	2,80	4,68	6,13
LEU	6,6	7,0	7,6	6,6	8,2	7,74	9,10	8,78
TYR	4,3	2,5	3,4	1,6	3,1	4,11	4,88	4,69
PHE	5,6	4,2	4,4	2,8	5,6	3,91	5,89	4,46
TRP	<u>1,0</u>	1,2	1,3	1,6	<u>1,1</u>	1,3	1,3	1,60
% PROT	55	35	VAR	100	23	56-65	65-75	64-75

TABLEAU SYNTHÉTIQUE II

COMPOSITION EN ACIDES AMINES, EXPRIMÉE EN POUR CENT POUR 16 GRAMMES d'AZOTE;

	Normes FAO	Oeuf	Caseine lait de vache	Boeuf	Maquereau	Soja	Isolat de soja	Tournesol
LYS	4,2	7,2	7,3	8,9	8,1	6,1	5,6	<u>4,0</u>
HIS		2,3	2,5	4,4	3,8	2,6	2,4	3,0
NH3			1,6	1,7	2,8	2,1	1,4	2,5
ARG		6,4	3,6	6,0	5,8	7,2	7,5	9,2
ASP		10,7	6,8	9,2	8,8	10,2	12,2	9,1
THR	2,8	5,0	4,3	4,7	4,9	4,0	3,8	<u>3,7</u>
SER		.7,7	5,9	4,1	5,3	5,5	5,5	4,4
GLU		12,3	18,5	14,3	12,4	16,5	21,0	18,0
PRO		4,3	10,3	4,3	5,9	6,1	5,3	4,1
GLY		3,8	1,7	4,4	6,1	4,0	4,2	4,6
ALA			2,8	6,0	6,1	4,1	4,0	4,5
CYS MET	4,2	5,8	<u>3,7</u>	4,2	<u>3,8</u>	<u>3,4</u>	<u>1,5</u>	<u>4,4</u>
VAL	4,2	7,4	5,5	5,3	5,4	4,8	4,7	5,4
ILEU	4,2	6,9	4,0	5,0	8,1	4,2	4,2	4,0
LEU	4,8	9,0	8,5	8,2	7,2	6,7	7,8	5,6
TYR	2,8	4,5	5,8	3,8	2,7	4,6	3,8	2,9
PHE	2,8	5,9	5,3	4,3	3,5	6,1	5,1	5,0
TRP	1,4	1,6	1,4	1,3	<u>1,0</u>	<u>1,2</u>	1,4	1,3
% PROT	50	13	87	20	18	50	97	55

TABLEAU SYNTHÉTIQUE II (suite)

COMPOSITION EN ACIDES AMINES, EXPRIMÉE EN POUR CENT POUR 16 GRAMMES d'AZOTE;

Arachide	Colza	Colza γ	Colza f	Haricots secs	Levures d'alcanes	Protéines Luzerne	Spirulines
3,7	5,3	7,0	7,3	6,5	8,60	6,58	4,18
2,4	2,7	3,2	4,3	2,9	1,93	2,57	1,55
2,1		2,1	2,0	1,9		1,18	0,96
10,1	6,5	6,3	6,5	5,7	6,14	6,80	6,43
11,6	7,0	7,0	2,7	12,5	12,08	10,69	9,10
3,2	4,3	4,8	3,6	5,1	5,17	5,24	5,19
5,5	4,3	4,5	3,9	6,0	6,52	4,68	5,39
18,9	18,3	17,2	25,7	15,5	17,53	11,77	12,91
5,5	7,4	7,6	10,2	4,3	4,73	5,22	3,55
5,9	5,2	5,6	4,9	4,5	5,62	5,46	4,90
4,1	4,2	5,3	4,0	4,7	7,98	6,34	7,72
1,7	4,5	3,8	6,8	1,9	2,04	2,90	3,50
4,0	4,7	5,8	4,1	5,7	3,10	6,03	6,65
3,4	4,6	4,5	3,1	4,8	2,80	4,68	6,13
6,6	7,0	7,6	6,6	8,2	7,74	9,10	8,78
4,3	2,5	3,4	1,6	3,1	4,11	4,88	4,69
5,6	4,2	4,4	2,8	5,6	3,91	5,89	4,46
1,0	1,2	1,3	1,6	1,1	1,3	1,3	1,60
55	35	VAR	100	23	56-65	65-75	64-75

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- WOLF (W. J.), COWAN (J. C.). — Soybeans as a food source. *The chemical Rubber Co 1971, CRC monoscience series.*
- GRAY (W. D.). — The use of fungi as food and in food processing. *The chemical Rubber Co 1970 CRC monoscience series.*
- FUJIMAKI (M.), KATO (H.), ARAI (S.), YAMASHITA (M.). — Microbial proteases in improving Soybean acceptability, *J. appl. Bact.* 34 (1), 119-131.
- STARON (T.). — A method of biologically detoxifying. *Rapeseed meal proceedings International Conference on the Science, technology and marketing of Rapeseed and Rapeseed products*, Ste-Adèle, Québec, sept. 20-23 1970.
- DORAI SWAMY (T. R.), SINGH (N.), DANIEL (V. A.). — Effects of supplementing ragi (*Eleusine Coracana*) diets with lysine or leaf protein on the growth and nitrogen metabolism of children. *Br. J. Nutr.* (1969), 23, 737.
- PIRIE (N. W.). — Leaf protein blackwell Scientific publications Oxford and Edinburg, *IBP Handbook*, n° 20, 1971.
- GONTZEA (I.), FERRANDO (R.), SUTZESCO (P.). — *Substances antinutritives naturelles des aliments*. Collection monographies alimentaires, Vigot frères, édit. Paris, 1968.
- GOUNELLE DE PONTANEL (H.). — Recommandations du P.A.G. relatives à l'évaluation des nouvelles sources de protéines, dans *Levures cultivées sur alcalines*, Aix-en-Provence, 1972, p. 245-306 ; édité par B.P. 10, Quai Paul-Doumer, Courbevoie, France.
- APPELQVIST (L. A.) et OHLSON (R.). — *Rapeseed*, 1972. Elsevier Publishing Company Amsterdam, London, New York, p. 148-169.

Conférence prononcée dans l'après-midi à la Sorbonne le 18 octobre 1972.

*Problèmes métallurgiques liés aux propriétés des supraconducteurs et des cryoconducteurs **

par Colette DIMITROV

Chargée de Recherche au C.N.R.S.

Dans nos sociétés industrialisées, la consommation d'énergie électrique double tous les dix ans et il est prévu que ce rythme se maintiendra dans l'avenir. L'une des solutions envisagées au problème du transport à grande distance de puissances élevées, qui soit également compatible avec les problèmes d'environnement dans les zones urbanisées, est la réalisation de câbles souterrains travaillant à basse température, c'est-à-dire de cryocâbles. En effet, il est nécessaire de limiter les pertes d'énergie par effet Joule (qui de surcroît pourraient produire un échauffement dangereux), en diminuant la résistance électrique des conducteurs métalliques par abaissement de la température. Par ailleurs, les applications de la physique nucléaire et de la physique des plasmas nécessitent des champs magnétiques de plus en plus intenses et l'emploi des supraconducteurs a introduit une véritable révolution technologique dans la construction des bobines magnétiques très puissantes. Ce domaine, comme celui de la fabrication des cryocâbles,

implique une connaissance approfondie des propriétés physiques et métallurgiques des métaux à basse température.

Le comportement électrique d'un métal à très basse température peut être celui d'un conducteur dit « normal » ou celui d'un « supraconducteur ». Dans les deux cas, les phénomènes physiques mis en jeu étant différents, le choix du matériau ne sera pas fondé sur les mêmes critères. Après avoir rappelé la signification physique des mécanismes fondamentaux intervenant dans la conductibilité des métaux à basse température (conductibilité normale ou supraconductibilité), nous nous proposons de dégager les caractéristiques physiques, structurales ou métallurgiques que doivent présenter les matériaux, suivant leurs conditions d'utilisation. Nous traiterons, en premier lieu, le cas des conducteurs normaux qui est plus simple et nous aborderons ensuite celui des supraconducteurs, pour lesquels la relation entre les performances et la structure est encore mal connue.

* Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société, le 18 octobre 1973.

I. — *CONDUCTIBILITE « NORMALE »
DES METAUX
A BASSE TEMPERATURE*

Les qualités d'un bon conducteur normal à basse température dépendent de plusieurs facteurs physiques, technologiques et économiques dont l'importance relative varie suivant l'usage auquel le matériau est destiné. Actuellement, les principales applications des métaux normaux à basse température, en électrotechnique, sont le transfert de l'énergie électrique, la construction d'électroaimants et la stabilisation des supraconducteurs. Chacun de ces usages soulève des problèmes qui lui sont spécifiques. Ainsi les projets de cryocables n'imposent pas des températures de fonctionnement extrêmement basses, mais si le courant transporté est alternatif, des phénomènes physiques tels que l'effet de peau, inexistant dans le cas de cou-

rant continu, doivent entrer en ligne de compte. Par ailleurs, l'emploi des métaux normaux comme stabilisants est nécessaire par certains supraconducteurs qui présentent des hétérogénéités de structure et peuvent redevenir localement normaux, pendant un court instant. Pour faciliter la dissipation d'énergie qui en résulte et dériver une partie du courant électrique, les fils ou les rubans supraconducteurs sont enrobés dans une matrice métallique (figure 1). Celle-ci doit être bonne conductrice de la chaleur et de l'électricité aux températures d'utilisation, inférieures à 20° K. Enfin, la réalisation des bobines magnétiques exige de connaître l'effet des champs magnétiques intenses sur la conductibilité du métal. Avant d'examiner les différents facteurs dont dépend, à basse température, la résistivité électrique des métaux normaux, nous rappellerons brièvement quelques notions fondamentales sur la conductibilité électrique.

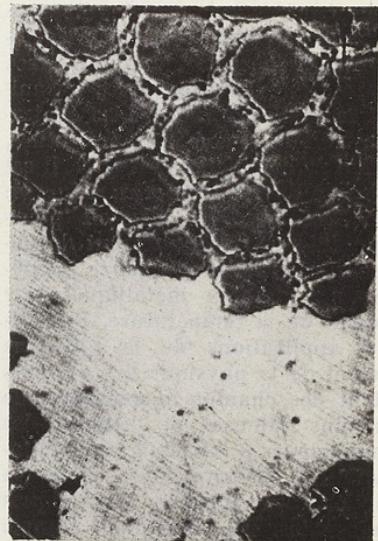
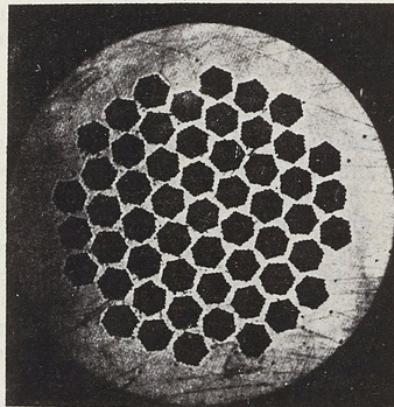


FIG. 1 (gauche). — Micrographie effectuée sur la section, d'un câble supraconducteur préparé par extrusion hydrostatique et contenant 55 faisceaux de 61 fils de Nb-Ti enrobés dans une matrice de cuivre (stabilisant) (1) ($\times 7$) ; (droite) Détail de la micrographie précédente ($\times 170$).

1) *Interprétation physique de la conductibilité électrique des métaux.*

L'aptitude à conduire l'électricité est l'une des caractéristiques importantes d'un métal : elle est due à la présence d'un grand nombre d'électrons quasi-libres qui, sous l'action d'un champ électrique, sont capables de se déplacer dans le réseau métallique. S'il n'y avait pas d'effets perturbateurs dans le métal, la conductibilité serait infinie, mais, en fait, les électrons subissent des collisions qui gênent leur déplacement, créant ainsi une résistance spécifique du matériau, appelée résistivité électrique (cette grandeur est l'inverse de la conductibilité électrique σ). Dans la théorie des électrons libres, on démontre que la résistivité électrique ρ s'exprime en fonction du nombre η d'électrons par unité de volume et de la fréquence ν des collisions par la relation :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{m}{e^2} \cdot \nu \quad [1]$$

(e et m représentent respectivement la charge et la masse de l'électron).

Les mécanismes qui accroissent le nombre des collisions sont la diffusion des électrons par les défauts chimiques, tels que les atomes d'impuretés, par les défauts de structure et par les vibrations thermiques des ions du réseau (phonons).

La règle de Matthiessen exprime l'additivité des fréquences des collisions dues aux centres de diffusion de nature différente. Elle est valable en première approximation et permet d'écrire que la résistivité ρ du métal à la température T est la somme de plusieurs termes indépendants :

$$\rho = \rho_{\text{impuretés}} + \rho_{\text{défauts de structure}} + \rho(T) \quad [2]$$

Lorsque la température de mesure s'abaisse, la fonction $\rho(T)$ tend vers 0 et la résistivité tend vers une limite ρ_0 , appelée résistivité résiduelle, dont la valeur augmente avec la concentration en défauts chimiques et physiques :

$$\rho = \rho_0 + \rho(T) \quad [3]$$

Une loi de variation de la résistivité électrique en fonction de la température $\rho(T)$ a été proposée par les théoriciens. Elle est connue sous le nom de relation de Bloch-Grüneisen et peut s'écrire :

$$\rho(T) = \frac{C}{M \cdot \theta_R} \cdot \left(\frac{T}{\theta_R} \right)^5 \int_0^{\theta_R} \frac{x^5 \cdot dx}{(e^x - 1) (1 - e^x)} \quad [4]$$

C est une constante, M représente la masse atomique du métal et θ_R est une température caractéristique de la résistivité du réseau de chaque métal, dont la valeur est proche de la température de Debye (θ_D). Les solutions de l'intégrale sont simples dans les cas limites suivants :

a) aux températures supérieures à θ_R , l'intégrale se réduit à :

$\frac{1}{4} (\theta_R/T)^4$ et, dans ce cas, la contribution des phonons à la résistivité ρ devient proportionnelle à T , c'est-à-dire que la résistivité varie linéairement avec la température :

$$T > \theta_R, \quad \rho(T) \sim T \quad [5]$$

b) aux températures très inférieures à θ_R , l'intégrale est égale à une constante et la fonction $\rho(T)$ varie comme une puissance 5 de T : elle diminue très rapidement avec la température :

$$T < \theta_R, \quad \rho(T) \sim T^5$$

2) *Critères de sélection d'un métal bon conducteur à basse température.*

D'après la relation de Bloch-Grüneisen, les conditions qui minimisent à basse température la contribution des phonons sont liées à des valeurs aussi élevées que possible de la température caractéristique de la résistivité du réseau θ_R . Le tableau I rassemble quelques données de θ_R et de la température de Debye pour une série d'éléments

métalliques. L'examen de ces valeurs permet de sélectionner le beryllium dont la température Θ_R est très supérieure à celle des autres matériaux. La figure 2 illustre le comportement électrique du beryllium en fonction de la température, comparé à celui de deux autres métaux réputés bons conducteurs : le cuivre et l'aluminium. A 78°K (température d'ébullition de l'azote liquide), le beryllium possède la plus faible résistivité électrique, bien que sa pureté soit relativement mauvaise par rapport à celle des deux autres métaux. Par contre

à 4,6 et à 20 °K (températures d'ébullition de l'hélium liquide et de l'hydrogène liquide), la situation est renversée, c'est-à-dire que le cuivre et l'aluminium sont de meilleurs conducteurs. Ce résultat est dû au fait que dans ce domaine de très basse température, quel que soit le métal, la contribution des phonons à la résistivité électrique devient suffisamment faible pour que celle des impuretés chimiques ou physiques soit le facteur prépondérant. En conséquence, l'aluminium et le cuivre semblent être des matériaux de choix pour « stabili-

TABLEAU I

Valeurs de la température caractéristique de la résistivité électrique du réseau Θ_R et de la température de Debye Θ_D pour quelques éléments métalliques (2).

N° atomique	Eléments	Θ_D en °K (pour $\Theta_D/2 < T < \Theta_D$)	Θ_R en °K (pour $\Theta_R/3 < T < \Theta_R$)
4	Be	1000	1240
12	Mg	325	340
13	Al	385	395
22	Ti	355	342
24	Cr	450	485
27	Co	380	401
29	Cu	320	320
30	Zn	245	175
31	Ga	240	215
47	Ag	220	200
73	Ta	230	228
74	W	315	333
75	Re	290	294
79	Au	185	200

TABLEAU I

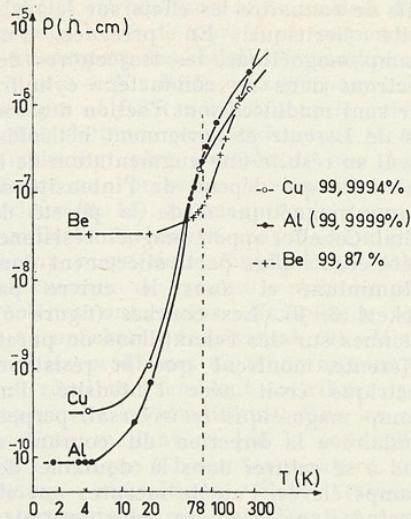


FIG. 2. — Variation de la résistivité électrique du beryllium (3), du cuivre (4), et de l'aluminium (5) en fonction de la température de mesure.

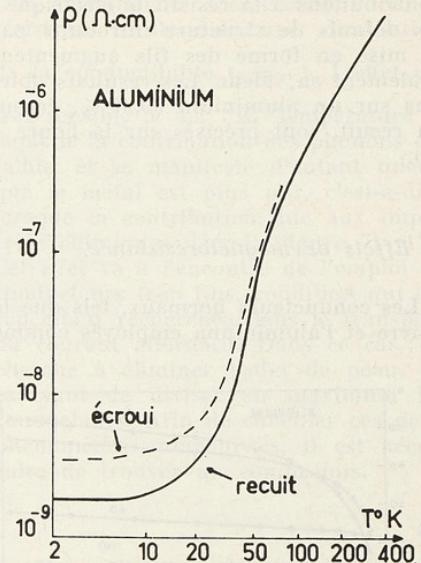


FIG. 4. — Effet de l'écrouissage sur la variation de la résistivité électrique d'un aluminium 99,99 % en fonction de la température de mesure [d'après (7)].

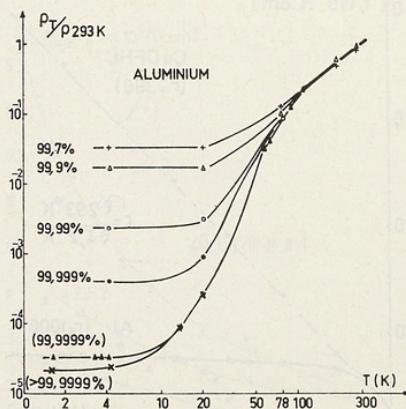


FIG. 3. — Effet de la pureté de l'aluminium sur la variation du rapport des résistivités électriques mesurées à la température T et à 293 °K en fonction de la température de mesure.

[Al 99,7 % à 99,999 %, diamètre des fils : 2 mm (4) ; Al 99,999 %, valeurs corrigées de l'effet de dimensions (5) ; Al > 99,999 %, diamètre des fils : 5 mm (6)].

ser » les supraconducteurs au-dessous de 20 °K, le premier bénéficiant, par ailleurs, d'une masse volumique plus faible et d'un prix de revient plus bas que le cuivre. Par contre, le beryllium présente des avantages certains pour la réalisation de câbles cryoconducteurs, refroidis par une circulation d'azote liquide, mais son coût élevé et sa métallurgie délicate posent actuellement des problèmes d'ordre économique et technologique aux industriels.

La pureté du métal, dont nous venons de souligner l'influence sur la conductibilité à très basse température, est mise en évidence de façon spectaculaire sur la figure 3, relative à des aluminums de titre compris entre 99,7 % et 99,999 % (4, 5, 6). Ces courbes montrent que, par rapport à l'aluminium 99,7 %, la résistivité du métal le plus pur est abaissée d'un facteur 100 à 20 °K et d'un facteur 1 000 à 4 °K. Les impuretés chimiques d'un métal ne sont pas les seules

contributions à la résistivité électrique ; les défauts de structure introduits par la mise en forme des fils augmentent également sa valeur. Les résultats obtenus sur un aluminium 99,99 %, écroui ou recuit, sont précisés sur la figure 4 (7).

3) Effets de magnétorésistance.

Les conducteurs normaux, tels que le cuivre et l'aluminium, employés comme

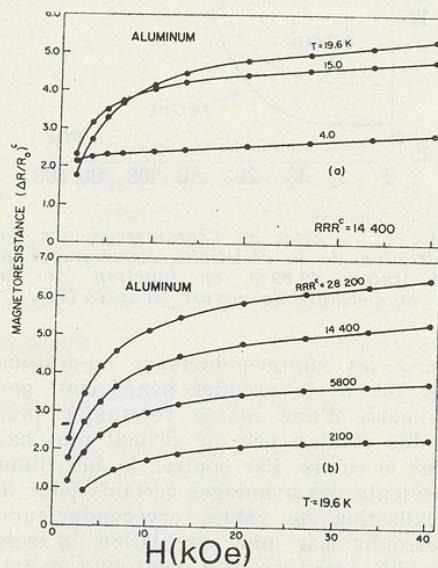


FIG. 5. — Courbes de magnétorésistance transversale obtenues sur des fils polycristallins d'aluminium (8).

(a) variation avec la température de mesure, (b) variation avec la pureté des échantillons. R_0 est la résistance mesurée sous champ nul, RRR_c représente le rapport des résistances mesurées à 273 et à 4 °K sous champ nul et corrigées de l'effet de dimensions ; RRR_c est d'autant plus grand que le métal est plus pur. ΔR est l'accroissement de résistance dû au champ magnétique.

« stabilisants » des fils supraconducteurs des bobines magnétiques, peuvent être soumis à des champs intenses, de l'ordre de plusieurs Teslas, dont il est

utile de connaître les effets sur la résistivité électrique. En présence d'un champ magnétique, les trajectoires des électrons dans un conducteur cylindrique sont modifiées sous l'action des forces de Lorentz et deviennent hélicoïdales. Il en résulte une augmentation de la résistivité qui dépend de l'intensité du champ magnétique et de la pureté du métal. Cet effet appelé magnétorésistance a été étudié plus particulièrement dans l'aluminium et dans le cuivre par Fickett (8, 9). Les courbes (figure 5), obtenues sur des échantillons de pureté différente, montrent que la résistance électrique croît avec l'intensité d'un champ magnétique transversal, perpendiculaire à la direction du courant et tend à se saturer dans le domaine des champs élevés. Peu de mesures ont été effectuées sur le cuivre, mais contrairement au cas de l'aluminium, la tendance à la saturation n'est pas observée ; la résistivité du cuivre suit la loi de Koehler et varie linéairement avec des valeurs croissantes du champ (figure 6).

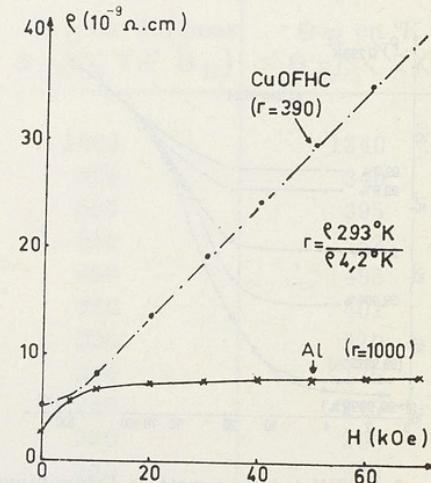


FIGURE 6. — Résistivité du cuivre (OFHC) et de l'aluminium, mesurée à 4,2 °K en présence d'un champ magnétique [d'après (10)].

Par ailleurs, cet accroissement de résistance, en présence d'un champ magnétique, est d'autant plus faible que

le métal est plus pur, mais, au-delà d'un certain degré de pureté, correspondant à un rapport des résistivités mesurées à 273 et à 4 °K : $RRR \approx 15\,000$ pour l'aluminium et $RRR \approx 2\,000$ pour le cuivre, l'effet s'atténue progressivement et une purification plus poussée de ces matériaux ne présente aucun avantage sérieux (8, 11). La magnétorésistance se manifeste également sous l'action d'un champ magnétique longitudinal (parallèle au sens du courant), mais les phénomènes ont moins d'amplitude que dans un champ transversal (9). Mis à part les problèmes de tenue mécanique, ces résultats semblent attribuer une supériorité à l'aluminium, dans les réalisations mettant en jeu la conductibilité électrique à basse température, sous champ magnétique élevé (aimants hyperconducteurs, stabilisation des bobinages supraconducteurs).

4) Effets de dimensions.

Si le diamètre des fils conducteurs diminue, il apparaît un phénomène de diffusion des électrons par les surfaces.

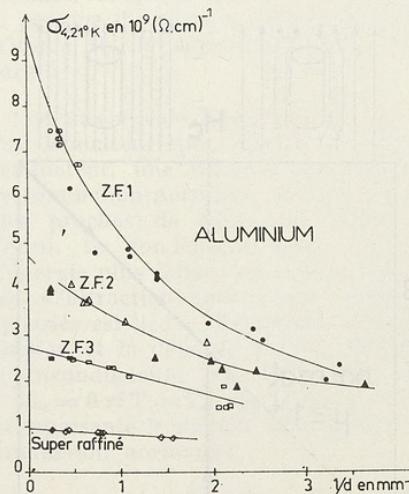


FIG. 7. — Variation de la conductibilité électrique à 4,2 °K en fonction de l'inverse du diamètre, pour des aluminiums de différentes puretés. (ZF₁, ZF₂, ZF₃, sont des matériaux purifiés par fusion de zone, le premier est le plus pur) (12)

Ceci entraîne un accroissement de la résistivité, c'est-à-dire une diminution de la conductibilité ($\varrho = \frac{1}{\sigma}$). L'effet est très sensible à 4,2 °K, température à laquelle la contribution des phonons est faible, et se manifeste d'autant mieux que le métal est plus pur, c'est-à-dire lorsque la contribution due aux impuretés chimiques décroît (figure 7) (12). Cet effet va à l'encontre de l'emploi de conducteurs trop fins, condition qui est cependant recherchée dans le transport du courant alternatif. Dans ce cas, on cherche à éliminer l'effet de peau, en essayant de diviser au maximum les conducteurs. Afin de concilier ces deux phénomènes antagonistes, il est nécessaire de trouver un compromis.

II. — SUPRACONDUCTIBILITÉ

Après avoir essayé de dégager les critères physiques qui permettent de sélectionner un matériau comme conducteur normal, nous aborderons maintenant les problèmes liés aux supraconducteurs. Tous les éléments métalliques ne deviennent pas supraconducteurs à basse température, notamment ceux ayant des propriétés ferromagnétiques (fer, cobalt, nickel) ou antiferromagnétiques (chrome) et les très bons conducteurs normaux (or, argent, cuivre...). La figure 8 précise quels sont les supraconducteurs dans la classification périodique des éléments.

1) Interprétation physique de la supraconductibilité.

L'état supraconducteur est caractérisé par deux propriétés fondamentales :

a) au-dessous d'une température T_c caractéristique de chaque élément, la résistivité électrique s'annule brutalement (figure 9) ; ce phénomène a été découvert en 1911 sur le mercure par Kamerlingh Onnes ;

The table shows the periodic table with various elements highlighted based on their supraconducting properties. The legend below the table defines the symbols used for each category:

- élément de transition supraconducteur (shaded)
- élément transuranien et terre rare (supraconducteurs seulement sous pression) (diagonal lines)
- supraconducteur ne faisant pas partie des éléments de transition (solid black)
- élément de transition supraconducteur (sous pression seulement) (diagonal lines with a different pattern)
- élément supposé supraconducteur par extrapolation (diagonal lines with a different pattern)
- supraconducteur (sous pression seulement) ne faisant pas partie des éléments de transition (white)
- terres rares et éléments transuraniens (non supraconducteurs) (solid black)
- élément de transition magnétique (diagonal lines)
- antiferromagnétique (diagonal lines with a different pattern)
- élément non supraconducteur (white)

FIG. 8. — Tableau précisant les métaux supraconducteurs dans la classification périodique des éléments. [d'après (13)].

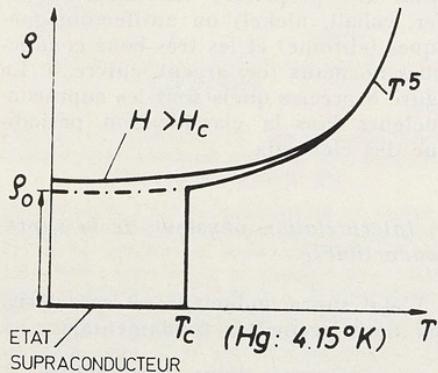


FIGURE 9. — Variation de la résistivité électrique au passage de la transition état supraconducteur — état normal.

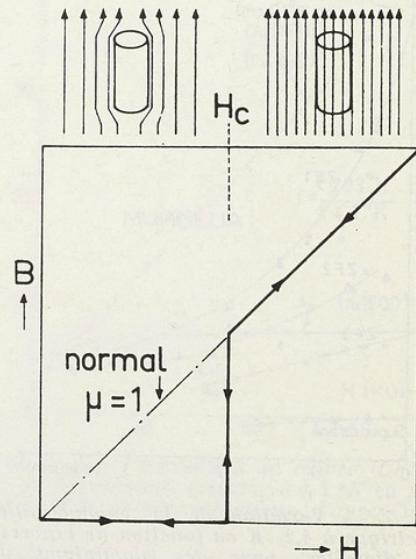


FIG. 10. — Processus et courbe d'aimantation d'un supraconducteur de type I.

b) les supraconducteurs possèdent des propriétés magnétiques particulières qui ont été mises en évidence pour la première fois par Meissner et Ochsenfeld. Dans le cas d'un supraconducteur de type I, si un long cylindre de métal, refroidi à une température inférieure à T_c , est soumis à l'action d'un champ magnétique extérieur H , le flux magnétique ne pénètre pas à l'intérieur du cylindre (figure 10). Des courants se développent en surface pour écranter le champ magnétique extérieur et sont répartis dans une épaisseur finie, appelée profondeur de pénétration. L'âme du supraconducteur se comporte comme un diamagnétique parfait avec une perméabilité nulle ($\mu = 0$). Cet état est appelé « état Meissner » ; les courbes d'aimantation sont reversibles et ont le profil indiqué sur la figure 10. Pour supprimer l'état supraconducteur on peut, soit éléver la température du matériau au-dessus de T_c , soit le soumettre à un champ magnétique supérieur à une valeur critique H_c , soit enfin le faire traverser par un courant dont la densité est supérieure à une densité critique J_c . En effet, lorsque le champ H produit par le passage du courant atteint la valeur critique H_c , la supraconductibilité disparaît.

Les théories de la mécanique quantique admettent que, dans l'état supraconducteur, une fraction des électrons de conduction normaux, ayant des énergies proches de celles du niveau de Fermi, se condensent dans un état d'énergie plus faible, sous forme de paires. L'attraction entre deux électrons appariés est liée à l'interaction électron-phonon et la densité de ces électrons supraconducteurs n_s est telle que $n_s = 0$ si $T = T_c$, $n_s = n$ si $T = 0$ (n représente la densité des électrons de conduction normaux).

La recherche d'un bon supraconducteur vise à obtenir une température et un champ critique aussi élevés que possible et le transport de fortes densités de courant. De ce point de vue, les matériaux les plus intéressants sont les

supraconducteurs de type II. Si un long cylindre d'un tel matériau, refroidi au-dessous de T_c , est placé dans un champ magnétique extérieur H , le comportement magnétique est le même que celui d'un supraconducteur de type I au-dessous d'une valeur H_{c1} , appelée champ critique inférieur (figure 11). Au fur et

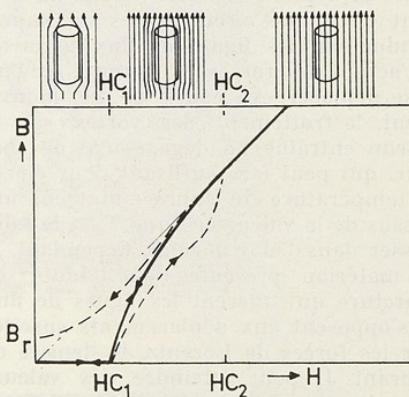


FIG. 11. — Processus et courbes d'aimantation d'un supraconducteur de type II (en pointillé, courbe relative aux phénomènes irréversibles).

à mesure que l'intensité du champ augmente, le flux commence à pénétrer progressivement à l'intérieur du matériau, mais cette pénétration est partielle et devient complète, seulement lorsque la valeur du champ critique supérieur H_{c2} est atteinte. Le fait important est que, dans certains alliages, les processus d'aimantation peuvent être irréversibles (figure 11, courbe en pointillé) ; le supraconducteur de type II conserve alors une induction B_r , après suppression du champ magnétique appliqué. Dans le domaine délimité par les valeurs des champs critiques H_{c1} et H_{c2} , la théorie prévoit une pénétration progressive du flux magnétique, à l'intérieur du matériau supraconducteur, sous forme de lignes de flux quantifiées (vortex), chaque vortex transportant un quantum de flux $\Phi_0 = hc/2e = 2 \cdot 10^{-7} \cdot G \cdot cm^2$

(e , charge de l'électron ; c , vitesse de la lumière). Autour de ces lignes de flux circulent des courants supraconducteurs qui écrivent le champ magnétique, par rapport aux autres régions restées supraconductrices (figure 12). Cet état, appelé « état mixte », est responsable des fortes densités de courant que peuvent supporter les supraconducteurs de type II. En effet, lorsqu'un courant électrique circule dans le supraconducteur, les lignes de flux soumises à l'action des forces de Lorentz tendent à se déplacer. Au cours de ce mouvement, le frottement des vortex sur le réseau entraîne un dégagement de chaleur, qui peut être suffisant pour éléver la température du supraconducteur au-dessus de la valeur critique T_c et le faire passer dans l'état normal. Cependant, si le matériau présente des défauts de structure qui ancrent les lignes de flux et s'opposent aux déplacements suscités par les forces de Lorentz, la densité de courant J_c peut atteindre des valeurs très élevées. L'interaction des défauts avec les vortex représente donc l'un des mécanismes fondamentaux responsables des performances d'un supraconducteur.

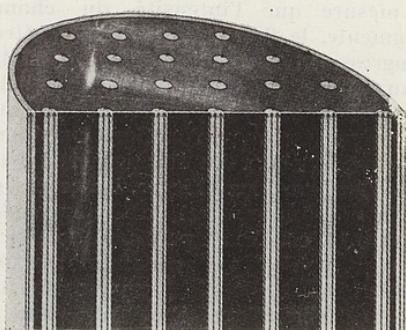


FIG. 12. — Coupe d'un supraconducteur cylindrique de type II, montrant la structure magnétique dans l'état mixte. Les parties en clair représentent les lignes de flux magnétique à l'intérieur du matériau (régions normales) et celles plus foncées les régions supraconductrices [d'après (14)].

2) Mise en évidence expérimentale des lignes de flux dans un supraconducteur de type II.

L'existence des lignes de flux n'est pas uniquement le résultat des prévisions théoriques ; elle ont été mises en évidence indirectement par les chercheurs allemands Traublé et Essmann (15). Ceux-ci ont employé une technique de décoration permettant d'observer la pénétration des lignes de flux à l'intérieur d'un cylindre supraconducteur (figure 13). L'échantillon, partiellement immer-

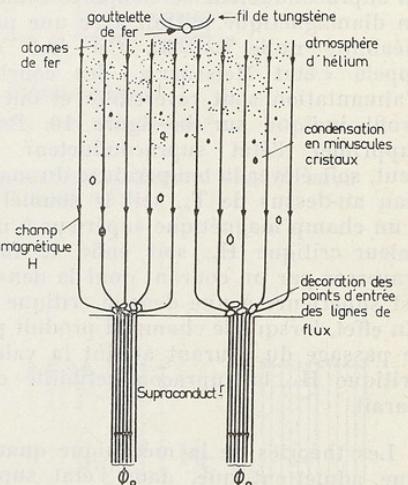


FIG. 13. — Technique de décoration pour l'observation des lignes de flux [d'après (14)].

gé dans un bain d'hélium liquide et refroidi au-dessous de la température critique T_c , est soumis à un champ magnétique, parallèle à l'axe du cylindre, dont l'intensité correspond aux conditions de l'état mixte. À 3 cm au-dessus de la surface est disposé un fil de tungstène portant en son milieu une gouttelette de fer ; le fil, chauffé par effet Joule, est porté à une température suffisante pour vaporiser le fer. Les conditions assez strictes de pression réduite d'hélium gazeux favorisent la condensation des atomes de fer en minuscules cristaux

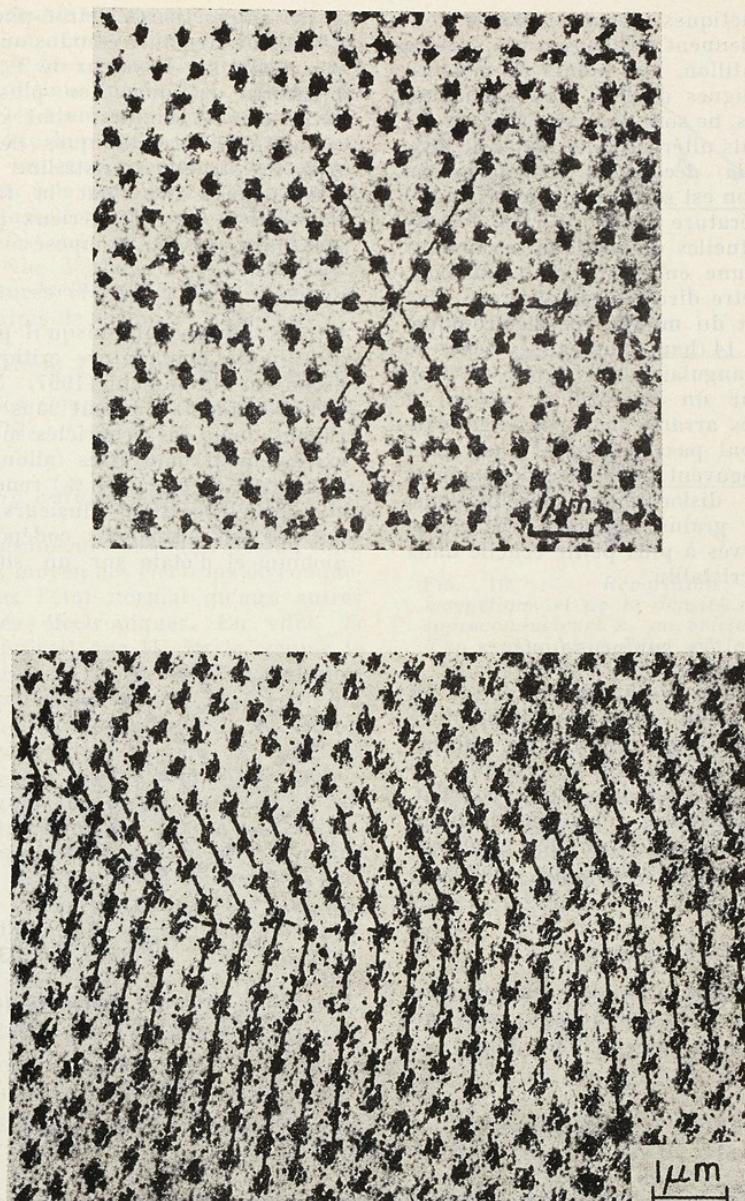


FIG. 14. — Mise en évidence par la technique de décoration ; Haut : d'un réseau triangulaire parfait de lignes de flux (16) ; Bas : d'un « joint de grains » dans le réseau des lignes de flux (17).

ferromagnétiques, d'environ 200 Å, dont certains viennent se déposer à la surface de l'échantillon, aux points de pénétration des lignes de flux. Les particules, ainsi fixées, ne sont plus affectées par les mouvements ultérieurs des lignes de flux. Lorsque la décoration est terminée, l'échantillon est soigneusement réchauffé à la température ambiante. Les techniques habituelles de réplique permettent d'obtenir une empreinte de la surface, qui peut être directement observée sous le faisceau du microscope électronique. La figure 14 (haut) met en évidence le réseau triangulaire des lignes de flux obtenu sur un échantillon refroidi à 1,2 °K. Les arrangements des lignes de flux ne sont pas en général aussi parfaits et peuvent présenter les mêmes défauts : dislocations, disclinations, joints de grains (figure 14 bas) que ceux observés à plus petite échelle dans le réseau cristallin.

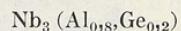
3) Qualités des supraconducteurs.

Les qualités recherchées pour un supraconducteur sont une température critique T_c élevée, un champ critique supérieur H_{c2} intense et la possibilité de supporter de fortes densités de courant. Ces caractéristiques dépendent de paramètres différents : propriétés électroniques, structure métallurgique... que nous allons analyser :

a) Température critique.

Ce paramètre dépend essentiellement des propriétés électroniques du matériau

et des interactions électron-phonon ; les défauts de structure étendus auront donc peu d'effet sur la valeur de T_c . Les températures critiques les plus élevées, actuellement connues, sont celles des composés intermétalliques de formule A_3B , de structure cristalline A_{15} , type β W (tableau II), dont la fabrication industrielle pose de sérieux problèmes métallurgiques. Le composé :



le plus intéressant puisqu'il possède la plus haute température critique, a été découvert récemment (1967). Nb_3Sn est préparé industriellement sous forme de rubans, mais ses propriétés mécaniques extrêmement mauvaises (allongement à la rupture de 0,2 à 0,4 %) rendent difficile son élaboration. Plusieurs procédés ont été mis au point : codéposition de niobium et d'étain sur un support en

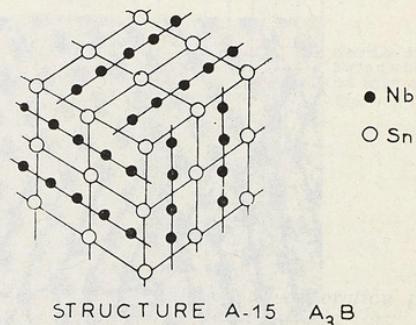


FIG. 15. — Structure cristalline du composé Nb_3Sn [d'après (18)].

TABLEAU II

Composés intermétalliques supraconducteurs de formule A_3B

Composé	$Nb_3(Al_{0,8}Ge_{0,2})$	Nb_3Sn	Nb_3Al	V_3Si
T_c (°K)	20,7	18	17,5	17

ruban, colaminage de ces deux métaux suivi d'un traitement de diffusion, immersion d'un ruban de niobium dans un bain d'étain fondu (18). Dans ces alliages, les atomes de niobium sont disposés le long de rangées orthogonales qui s'évitent les unes les autres (figure 15). Les écarts à la stoechiométrie modifient la structure ordonnée et abaissent T_c . Des études sont actuellement poursuivies, en vue d'atteindre de plus hautes températures critiques sur des composés ternaires de formule

$X_{0.5}Mo_3S_4$ ($X = Cu, Sn$ ou Pb)

et sur des composés de structure hexagonale (13).

b) *Champ critique supérieur H_{c2} .*

Cette grandeur est plutôt liée au libre parcours moyen des électrons de conduction dans l'état normal qu'aux autres propriétés électroniques. En effet, la théorie prévoit que H_{c2} varie comme le paramètre sans dimensions de Ginsburg et Landau $\chi = \lambda/\zeta$ où λ et ζ sont des grandeurs caractéristiques du supraconducteur, ainsi définies. A l'interface d'une région normale et supraconductrice (figure 16), la transition ne se fait pas brutalement. La densité n_s des électrons supraconducteurs décroît sur une distance ζ , appelée longueur de cohérence et la pénétration du flux magnétique à l'intérieur de la région supraconductrice s'affaiblit progressivement sur une épaisseur λ , appelée profondeur de pénétration. La valeur du paramètre χ détermine la nature du supraconducteur : si χ est inférieur à $1/\sqrt{2}$, le supraconducteur est de type I, si χ est supérieur à $1/\sqrt{2}$, il est de type II.

$$\chi < 1/\sqrt{2}$$

Supraconducteurs de type I (métaux purs exceptés Nb et V, alliages dilués).

$$\chi < 1/\sqrt{2}$$

Supraconducteurs de type II (vanadium, niobium, alliages concentrés, composés de type A_3B).

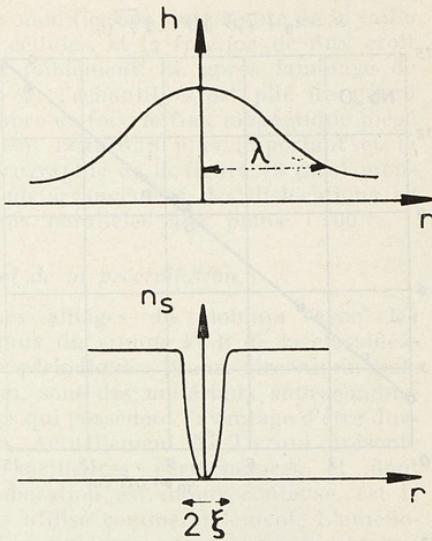


FIG. 16. — Répartition du champ magnétique et de la densité des électrons supraconducteurs n_s au voisinage de l'axe d'un vortex, dans l'état mixte d'un supraconducteur de type II.

Par ailleurs, Goodman (19) a montré que, dans la théorie quantique de la supraconductibilité, χ était lié à la résistivité résiduelle ϱ_0 du matériau, c'est-à-dire au libre parcours moyen des électrons de conduction dans l'état normal, par la relation :

$$\chi = \chi_0 + c_1 \cdot \varrho_0 = \chi_0 + c_2/l$$

(c_1 et c_2 sont des constantes caractéristiques du matériau et χ_0 représente le paramètre de Ginsburg-Landau dans un métal pur).

Il s'ensuit que, par addition d'impuretés, il est possible de faire passer un supraconducteur de type I dans le groupe des supraconducteurs de type II (additions d'indium, de thallium, de mercure dans le plomb) et d'observer une augmentation linéaire de la valeur du champ critique supérieur H_{c2} avec la résistivité résiduelle de la solution solide (figures 17 haut et bas).

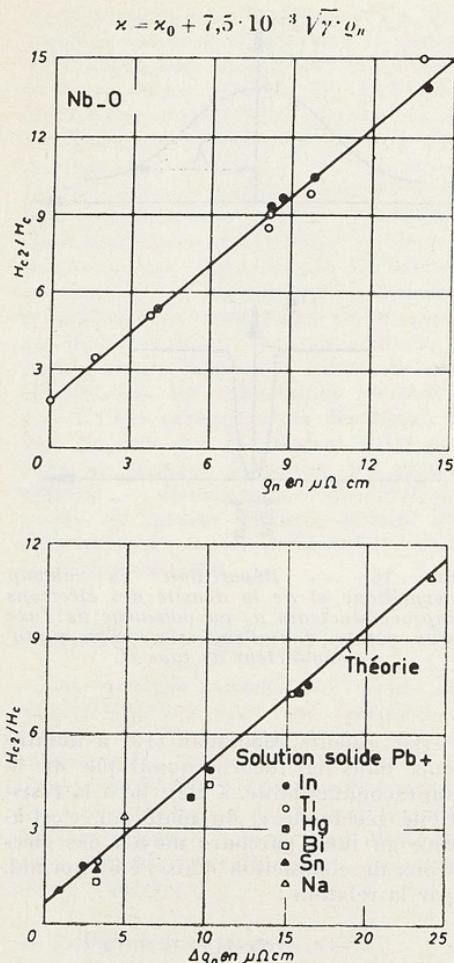


FIG. 17. — Variation du champ critique supérieur H_{c2} en fonction de la résistivité résiduelle ; Haut : de solutions solides interstitielles niobium-oxygène (20) ; Bas : du plomb contenant en solution solide de l'indium, du thallium, du mercure, du bismuth, de l'étain ou du sodium (21).

c) Densités de courant élevées et hystéresis des courbes d'aimantation.

Nous avons montré précédemment que, dans l'état mixte d'un supraconducteur de type II, l'ancrage des lignes de flux par les défauts de structure était le

mécanisme permettant d'obtenir des valeurs fortes de la densité de courant. Cet ancrage sera d'autant meilleur que les dimensions des défauts seront du même ordre de grandeur que celles du plus petit des deux paramètres caractéristiques du supraconducteur : ζ , longueur de cohérence, c'est-à-dire de l'ordre de plusieurs centaines d'angstroms.

Les centres d'ancrage seront donc constitués par tous les défauts étendus du réseau : fluctuation locales de concentration, ségrégations, précipités, dislocations, joints de grains, parois de cellules d'écrouissage. Les défauts ponctuels ou les très petits groupes d'atomes devraient avoir peu d'effet.

Effet des dislocations.

Actuellement, on connaît mal les facteurs qui contribuent aux forces d'ancrage, car il est difficile de préparer des échantillons contenant des concentrations contrôlées d'un seul type de défaut. Néanmoins, il semble que les dislocations créées par écrouissage soient plus efficaces pour ancrer les lignes de flux, lorsqu'elles présentent une structure en cellules équiaxes ou allongées que si leur répartition est homogène. La figure 18 illustre ce résultat sur du niobium déformé par laminage (22). La fraction de

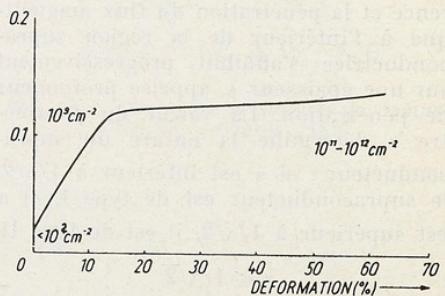


FIG. 18. — Variation de la fraction de flux piégé sous champ nul en fonction du taux de déformation, dans le niobium. Les échantillons sont déformés par laminage après un recuit sous vide ($p = 10^{-7}$ torr) à 1750°C (les valeurs reportées le long de la courbe indiquent la densité de dislocations) (22).

flux magnétique piégé, sous champ nul, croît avec le taux de déformation et un changement de pente se produit lorsqu'une structure cellulaire est formée (figure 19 haut) ; ensuite, la densité de dislocations dans les parois augmente,

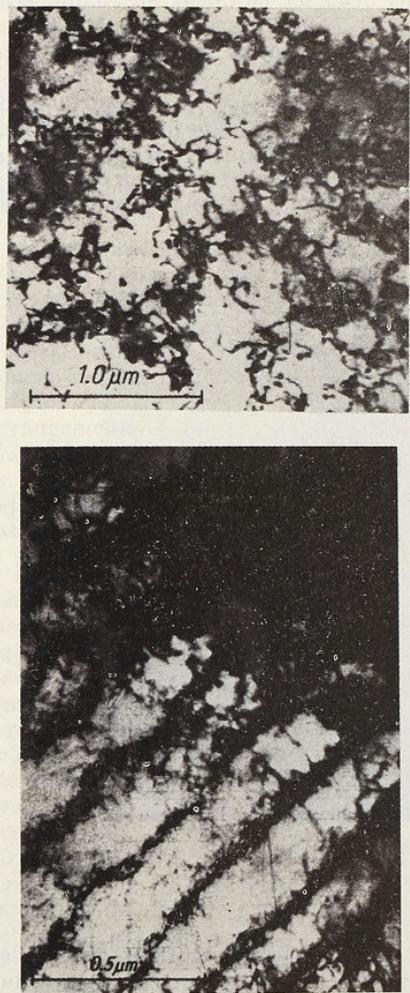


FIG. 19. — Micrographies électroniques d'échantillons de niobium recuits à 2 h à 1750 °C sous un vide de 10^{-7} torr, avant déformation (22) ; Haut : laminé de 14 % (formation d'une structure cellulaire) ; Bas : laminé de 62,5 % et plié plusieurs fois. Les parois de dislocations sont alignées parallèlement aux plans {100}.

sans modification importante de la taille des cellules, et la fraction de flux croît plus faiblement. Si, après laminage de 62,5 %, l'échantillon est plié un grand nombre de fois, le flux magnétique piégé devient beaucoup plus important et la micrographie de la figure 19 (bas) montre un arrangement des dislocations en parois parallèles aux plans {100}.

Effet de la précipitation.

Les alliages de niobium avec les métaux du groupe IV B de la classification périodique : titane, zirconium, hafnium, sont des matériaux supraconducteurs qui possèdent l'avantage d'être ductiles. Actuellement Nb-Ti, qui présente les meilleures performances et dont l'élaboration est moins coûteuse, est le plus utilisé commercialement. L'amélioration de leurs propriétés est obtenue par écrassage, par addition d'éléments interstitiels et par des traitements thermiques appropriés, de façon à faire apparaître une deuxième phase. En effet, les précipités d'une phase normale, noyés dans une matrice supraconductrice, s'ils présentent les dimensions requises, sont très efficaces pour ancrer les lignes de flux. Ainsi, dans un alliage de niobium contenant 25 at. % de zirconium, déformé à froid, Hillmann (23) a pu mettre en évidence des zones de Guinier-Preston, de l'ordre de 100 Å par recuit de 1 heure à 500 °C (figure 20).

En fait, la structure métallurgique de ces matériaux est mal connue ; l'utilisation assez empirique de traitements mécaniques et thermiques accroît leurs performances, mais les mécanismes fondamentaux qui permettent d'ancrer les lignes de flux ne sont pas encore complètement compris.

4) *Emploi des matériaux supraconducteurs pour le transport de l'électricité.*

Outre la réalisation de bobinages magnétiques, l'emploi des supraconducteurs de type II dans des conditions correspondant à l'état mixte a été envisagé pour le transport de puissances

élevées de courant continu. Cependant, dans le cas de courants alternatifs, les lignes de flux sont continuellement sollicitées par des déplacements, dus à l'inversion du sens du courant, un grand nombre de fois par seconde. Ces mouvements produisent une dissipation de puissance qui croît linéairement avec la fréquence et augmente comme une puissance 3 ou 4 de l'intensité du courant (24). Les pertes sont si élevées qu'il n'est pas possible d'envisager une telle utilisation des supraconducteurs dans l'état mixte. Cependant, des recherches récentes ont montré que le niobium, qui possède un champ critique inférieur

H_{c1} élevé (1,4 k Oe à 4 °K) peut être employé dans des conditions correspondant à l'état Meissner. Les courants alternatifs sont alors véhiculés dans une mince couche, à la surface des supraconducteurs, et peuvent être de l'ordre de 790 A par cm de circonférence, sans dépasser la valeur du champ critique H_{c1} (24). Cependant, l'expérience montre que, même dans ce cas, se produisent des pertes qui dépendent fortement de la qualité de surface du conducteur. Des rugosités de l'ordre de grandeur du diamètre des vortex augmentent localement la valeur du champ, au-dessus de H_{c1} et l'état mixte apparaît.

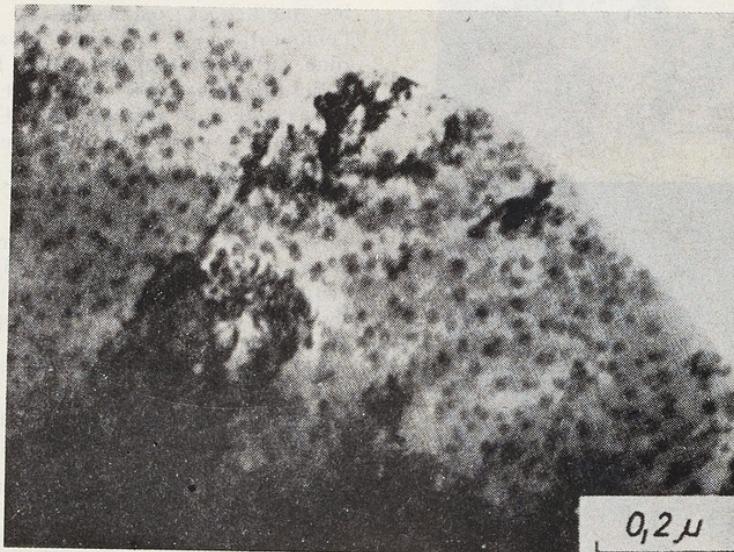


FIG. 20. — Zones de Guinier-Preston dans un alliage Nb-Zr (25 at %) déformé et recuit 1 heure à 500 °C (23).

5) Effets de l'irradiation sur les propriétés des supraconducteurs.

Il est intéressant de considérer les effets de l'irradiation par des particules élémentaires sur les supraconducteurs puisque, dans les projets de réacteurs à fusion thermonucléaire, le plasma serait confiné à l'aide de champs magnétiques intenses produits par des bobines

supraconductrices. Dans ce cas, les problèmes qui se posent sont assez ardu斯 car il y a interaction entre les défauts produits par l'irradiation et la structure métallurgique, parfois complexe de certains matériaux supraconducteurs. Des études ont été effectuées sur le niobium, le vanadium et les alliages Nb-Zr, Nb-Ti. Les résultats obtenus sur les métaux

purs : vanadium, niobium sont assez bien compris et sont les suivants (25) :

a) Les défauts produits par l'irradiation entraînent un faible abaissement de la température critique T_c , dû à des modifications dans les mécanismes d'interaction électron-phonon ;

b) La valeur du champ critique supérieur H_{c2} augmente, par suite d'un accroissement du paramètre de Ginsburg-Landau λ , qui varie dans le même sens que la résistivité résiduelle du matériau irradié (les défauts d'irradiation contribuent à accroître la résistivité résiduelle) ;

c) La densité de courant critique, qui est liée à l'ancrage des lignes de flux dans l'état mixte, est accrue dans les cas où l'irradiation introduit des boucles de dislocations, des hétérogénéités de concentrations de défauts, des cavités, notamment si celles-ci forment des arrangements réguliers ayant des dimensions du même ordre de grandeur que le réseau des lignes de vortex. Une répartition uniforme des défauts semble avoir peu d'influence.

Dans les alliages Nb-Ti et Nb-Zr, les défauts introduits par l'irradiation détériorent toutes les propriétés du matériau supraconducteur. La figure 21 montre l'évolution de la densité critique J_c (normalisée à la valeur J_{c0} , mesurée avant irradiation) dans un fil de Nb-Ti, irradié à 5 °K, par des neutrons rapides d'énergie supérieure à 1 MeV, puis recuit progressivement à des températures supérieures (26). L'irradiation abaisse de 15 % la valeur de la densité critique de courant et un réchauffement à la température ambiante ne permet pas de retrouver la valeur initiale J_{c0} . La structure métallurgique assez complexe de ces alliages, qui possèdent, avant d'être irradiés, des centres d'ancrage importants des lignes de flux, ne facilite pas l'interprétation des mécanismes de dégradation des performances supraconductrices.

En conclusion, l'utilisation des cryoconducteurs et des supraconducteurs,

dans les applications électrotechniques, pose aux métallurgistes des problèmes qui présentent parfois des aspects opposés. En effet, l'emploi des cryoconducteurs normaux dans le transport de puissances électriques élevées ou comme stabilisant des supraconducteurs néces-

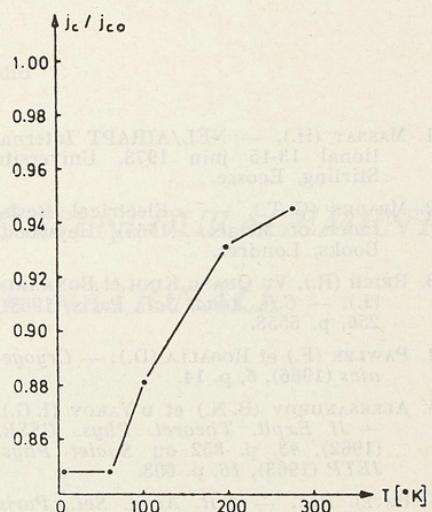


FIG. 21. — Restauration de la densité de courant critique J_c (normalisée à la valeur avant irradiation J_{c0}) d'un fil de Nb-Ti irradié à 5 °K par les neutrons rapides, à une dose de $4,5 \cdot 10^{18} n. cm^{-2}$ (26).

site des métaux de haute pureté, dont l'élaboration et la mise en forme soient relativement faciles, dans des conditions économiques favorables. Dans le cas de transport de courant alternatif, l'extrême division des brins conducteurs permet d'éliminer l'effet de peau, mais entraîne une diminution néfaste de la conductibilité, due aux effets de dimensions, dont il est nécessaire de tenir compte.

Au contraire, les meilleurs supraconducteurs sont des alliages dont les propriétés mécaniques parfois mauvaises (Nb_3Sn) nécessitent des techniques de fabrication élaborées. Les performances de ces matériaux sont améliorées par la présence de défauts chimiques (impure-

tés interstitielles) ou de défauts de structure (précipités, dislocations, cavités...). Le rôle de ces défauts sur les propriétés est relativement bien compris dans les métaux supraconducteurs de type II (niobium, vanadium). En particulier, les configurations ou les arrangements de défauts qui facilitent l'ancrage des lignes

de flux magnétique, dans l'état mixte, augmentent fortement la densité de courant que peuvent supporter ces matériaux. Cependant dans le cas des alliages, une meilleure connaissance de leur structure métallurgique permettrait d'accroître encore leurs qualités supraconductrices.

Bibliographie

1. MASSAT (H.). — NEL/AIRAPT International 13-15 juin 1973, Université Stirling, Ecosse.
2. MEADEN (G. T.). — « Electrical Resistance of Metals » (1965), Heywood-Books, Londres.
3. REICH (R.), VU QUANG KINH et BONMARIN (J.). — *C.R. Acad. Sci., Paris* (1963), 256, p. 5558.
4. PAWLEK (F.) et ROGALLA (D.). — *Cryogenics* (1966), 6, p. 14.
5. ALEKSANDROV (B. N.) et D'YAKOV (I. G.). — *Jl Explor. Theoret. Phys. USSR*, (1962), 43, p. 852 ou *Soviet Phys. JETP* (1963), 16, p. 603.
6. RÉVEL (G.). — *C.R. Acad. Sci., Paris* (1964), 259, p. 4031.
7. DUBOIS (P.), AUPOIX, MOISSON, GRISON, CARBONELL (E.), LEHONGRE (S.), LEROUX (J. M.) et EYRAUD (M.). — *Annales des Mines* (1970), n° 1, p. 45.
8. FICKETT (F. R.). — *Appl. Phys. Letters* (1970), 17, p. 525.
9. FICKETT (F. R.). — *Phys. Rev.* (1971), 3 B, p. 1941.
10. DUBOIS (P.), CASACCI (S.), GOYER (J.) et BURNIER (P.). — « Problèmes posés à l'industrie par l'étude et la construction de grands aimants supraconducteurs », *Communication présentée au Congrès de la Société Française des Électriciens* (1971), 29 septembre-3 octobre, Nice.
11. FICKETT (F. R.). — Communication personnelle.
12. REICH (R.). — *Mém. Sci. Rev. Mét.* (1965), 62, p. 869.
13. MATTHIAS (B. T.). — *La Recherche* (1973), 4, n° 33, p. 319.
14. ESSMANN (U.), TRAÜBLE (H.). — *Scientific American* (1971), 224, p. 75.
15. TRAÜBLE (H.) et ESSMANN (U.). — *Phys. Status Solidi* (1966), 18, p. 813.
16. TRAÜBLE (H.) et ESSMANN (U.). — *Jl. Appl. Physics* (1968), 39, p. 4052.
17. ESSMANN (U.) et TRAÜBLE (H.). — *Phys. Stat. Solidi* (1969), 32, p. 337.
18. BETHOUX (O.). — *Revue de Physique Appliquée* (1970), 5, p. 495.
19. GOODMAN. — *I.B.M. Jl. Research Develop.* (1962), 6, p. 63.
20. DE SORBO (W.). — *Phys. Rev.* (1963), 132, p. 107.
21. LIVINGSTON (J. D.). — *Phys. Rev.* (1963), 129, p. 1943.
22. NARLIKAR (A. V.) et DEW HUGUES (D.). — *Phys. Stat. Solidi* (1964), 6, p. 380.
23. HILLMANN (H.). — *Z. Metallkunde*, 60, p. 157.
- HILLMANN (H.) et PFEIFFER (I.). — *Z. Metallkunde* (1967), 58, p. 129.
24. SNOWDEN. — *Scientific American* (1972) 226, p. 84.
25. ULLMAIER (H.). — *Proceedings of the 1973 International Conference on Defects and Defects Clusters in B.C. Metals and their Alloys*, 14-16 août 1973. N.B.S. Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
26. SOELL (M.), WIPF (S. L.) et VOGL (G.). — *I.E.E. Proceedings of 1972, Applied Superconductivity Conference*, 1-3 mai 1972, Annapolis, Maryland, U.S.A.

TABLE DES MATIÈRES

Année 1973

ACTIVITÉS DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT

POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

- Discours, par ses amis, devant la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, par M. André GAILLARD, p. 1
- Histoire du dévelement d'un produit industriel nouveau dans le domaine de la chimie organique, par M. Robert MUREAU, p. 2
- Les molécules conductrices produites faire à par M. M. LEGMAND, p. 3
- La Séparation thermique et ses applications. Procédé Bif-Bertin, par M. Philippe MATHIAS, p. 4
- Le mélange d'hydrogène, par M. Maurice BARTHALON, p. 5
- Problèmes énergétiques des très propres des supraconducteurs et des cryogéniques, par M. G. Dimitrov, p. 6
- Des régions - nouvelles sources de problèmes industriels dans l'industrie humaine, par M. Théodore STARON, p. 7
- Un exemple de travail scientifique dans l'industrie : le développement des nanopuces à la S.N.E.C.M.A., par Raymond MARSHAL, p. 8
- Conférence prononcée à l'occasion de la remise du Grand Prix Lamy, le 17 février 1973, publiée dans le n° 3, 1972, p. 9

2^e Divers

- Liste des Prix et Médailles décernés pour 1972, p. 10
- Remise du Grand Prix Lamy à la Société Nationale d'Etude et de Construction de Matériaux d'Aviation (S.N.E.C.M.A.), Séance du 1^{er} février 1973, consultez le n° 2, 1972 de *l'Institut*, p. 11

TRAITEMENT DES COURBATURES ET DES TÉNÉRÉTÉS

PAR LA MÉTHODE DE LA TÉNÉRÉTÉ

PAR J. P. BOURGEOIS, M. D. — PARIS

ÉDITIONS DE LA SOCIÉTÉ DE PHYSIQUE
PARIS — 1900 — 120 PAGES

— 1000 FRANCS — 1000 EXEMPLAIRES

— 1000 EXEMPLAIRES — 1000 EXEMPLAIRES

TABLE DES MATIÈRES

Année 1973

1°) Conférences

- Développements récents en analyse par activation (31^e Conférence *Bardy*), par M. Gilles REVEL n° 1, p. 3
- Histoire du lancement d'un produit industriel nouveau dans le domaine de la chimie organique, par M. Robert SUREAU n° 1, p. 25
- Les matériaux composites, pourquoi faire ? par M. G. LEOMAND .. n° 2, p. 3
- Le séparateur thermique et ses applications. Procédé Elf-Bertin, par M. Philippe MARCHAL n° 2, p. 15
- Le moteur électromagnétique, par M. Maurice BARTHALON n° 3, p. 3
- Problèmes métallurgiques liés aux propriétés des supraconducteurs et des cryoconducteurs, par M^{me} Colette DIMITROV n° 4, p. 23
- Les légumines, nouvelles sources de protéines utilisables dans l'alimentation humaine, par M. Thadée STARON n° 4, p. 3
- Un exemple de travail scientifique dans l'industrie : le développement des compresseurs à la S.N.E.C.M.A., par Raymond MARCHAL. n° 3, p. 7
- Conférence prononcée à l'occasion de la remise du Grand Prix Lamy, le 1^{er} février 1973, publiée dans le n° 3, 1972 n° 3, p. 3

2°) Divers

- Liste des Prix et Médailles décernés pour 1972 n° 1, p. 41
- Remise du Grand Prix Lamy à la Société Nationale d'Etude et de Construction de Moteurs d'Aviation (S.N.E.C.M.A.). Séance du 1^{er} février 1973 (Consulter le n° 3, 1972 de l'I.N.) :

— Allocution de M. Jacques TREFOUËL, Président de la Société d'Encouragement	n° 3, p. 3
— Rapport de J.-J. TRILLAT, au nom du Comité des Arts Physiques	n° 3, p. 3
— Allocution de M. l'Ingénieur général RAVAUD, Président-Directeur Général de la S.N.E.C.M.A.	n° 3, p. 5
— Remise de la Grande Médaille Annuelle à M. Albert LAPRADE, Membre de l'Institut, au cours d'une cérémonie spéciale, le 7 juin 1973	n° 2, p. 15
— Rapport de M. Jean FRESSINET, Président du Comité des Constructions et Beaux-Arts	n° 2, p. 25
— Rapports sur les Prix et Médailles décernés au cours de la séance du 29 septembre 1973	n° 3, p. 15
— Répertoire quinquennal (années 1969-1973)	n° 4, p. 47

INDEX DES AUTEURS

DES CONFÉRENCES PUBLIÉES

Année 1973

- BARTHALON (Maurice). — Le moteur linéaire électromagnétique « mb » (principe-développement-applications) *n° 3, p. 3*
- DIMITROV M^{me} (Colette). — Les problèmes métallurgiques liés aux propriétés des supraconducteurs et des cryoconducteurs *n° 4, p. 23*
- LEOMAND (Gérard). — Les matériaux composites : pourquoi faire ? ... *n° 2, p. 3*
- MARCHAL (Philippe). — Principe et applications du séparateur thermique. Nouveau procédé frigorifique *n° 2, p. 15*
- REVEL (Gilles). — Développements récents en analyse par activation .. *n° 1, p. 3*
- STARON (Thadée). — Les légumines, nouvelles sources de protéines utilisables dans l'alimentation humaine *n° 4, p. 3*
- SUREAU (Robert). — Histoire du lancement d'un produit industriel nouveau dans le domaine de la chimie organique *n° 1, p. 25*

RÉPERTOIRE QUINQUENNAL

Années 1969-1973

I

RÉPARTITION

Répartition, par domaines scientifiques, des textes publiés. Ces textes sont désignés ici par leur indice alphabétique (premières lettres en caractères gras, de leur mention dans le « Répertoire général des matières » qui fait suite).

AGRICULTURE : ENV - LEG - PES.

ARTS CHIMIQUES : BAR - CAR - CHI - COL - CRY - ORG - POL.

ARTS ÉCONOMIQUES : BRU - FAB - FIA - NUC.

ARTS MÉCANIQUES : COM - D.S. - FIL - FLU - MAT - MET - MOT - PRO - ULT.

ARTS PHYSIQUES : EAU - HOR - HEU - PHO.

II

RÉPERTOIRE GÉNÉRAL DES MATIÈRES

BARDY (Conférences) :

- 26° : Problèmes de corrosion et moyens d'études dans une grande industrie. Electricité de France 1969, n° 1, p. 5
- 27° : Les alliages réfractaires, leurs applications dans les techniques les plus modernes 1969, n° 2, p. 17

— 28° : Les propriétés et les applications des métaux du groupe IV	1970, n° 2, p. 23
— 29° : Préparation du fer de très haute pureté et propriétés particulières de ce métal	1971, n° 2, p. 17
— 30° : Influence des éléments étrangers dans les métaux irradiés	1972, n° 1, p. 3
— 31° : Développements récents en analyse par activation ..	1970, n° 1, p. 3
CARRION (Conférences) :	
— 32° : Les bactériophages	1970, n° 2, p. 3
— 33° : Traitement des eaux résiduaires industrielles	1970, n° 4, p. 3
— 34° : Actualité du choléra asiatique	1971, n° 1, p. 13
— 35° : Acquisitions récentes dans le domaine de la toxine et de l'anatoxine tétaniques	1972, n° 1, p. 23
CHIMIQUE, la formation de ses Ingénieurs et l'industrie	1969, n° 4, p. 3
COLLABORATION entre Science et Industrie dans le passé	1970, n° 1, p. 3
COMPRESSEURS, Henry LE CHATELIER. Le développement des... à la S.N.E.C.M.A. Un exemple de travail scientifique dans l'Industrie	1972, n° 3, p. 7
CRYOCONDUCTEURS, Problèmes métallurgiques liés aux propriétés des supraconducteurs et des	1973, n° 4, p. 23
D.S., La D.S. 70	1969, n° 3, p. 5
EAU, Un nouveau procédé français pour la fabrication d'eau lourde	1971, n° 4, p. 3
ENVIRONNEMENT microbien des animaux et son contrôle	1971, n° 4, p. 11
FABRICATION, Problèmes posés à l'intérieur des entreprises par la fabrication en série	1972, n° 2, p. 3
FIABILITÉ, La	1970, n° 4, p. 25
FILAGE, Procédé de filage par turbines à fibres libérées	1972, n° 4, p. 17
FLUIDIQUE, La	1969, n° 3, p. 21
FLUVIALE, Aspects modernes de la navigation	1971, n° 1, p. 3
HEURE, L'atome nous donnera-t-il l'	1970, n° 3, p. 3
HORLOGES atomiques	1970, n° 3, p. 13
LEGUMINES, Nouvelles sources de protéines utilisables dans l'alimentation humaine	1973, n° 4, p. 3

MATÉRIAUX composites : Pourquoi faire ?	1973, n° 2, p. 3
METHANIERS , Les techniques françaises de méthaniers à citernes intégrées	1971, n° 3, p. 3
MOTEUR électromagnétique	1973, n° 3, p. 3
NUCLÉAIRE , Contribution d'Ugine-Kulhmann au développement nucléaire français	1971, n° 2, p. 7
ORGANIQUE , Histoire du lancement d'un produit nouveau dans le domaine de la chimie	1973, n° 1, p. 25
PESTICIDES et environnement	1971, n° 3, p. 21
PHOTOGRAPHIQUES , Les progrès de la science et des techniques ..	1969, n° 2, p. 3
POLLUTION , atmosphérique	1972, n° 4, p. 3
PROCÉDÉ Elf-Bertin. Le séparateur thermique et ses applications.	1973, n° 2, p. 15
ULTRAFAILTRATION , De l'ultrafiltration à l'osmose	1971, n° 1, p. 25

PRIX ET MÉDAILLES

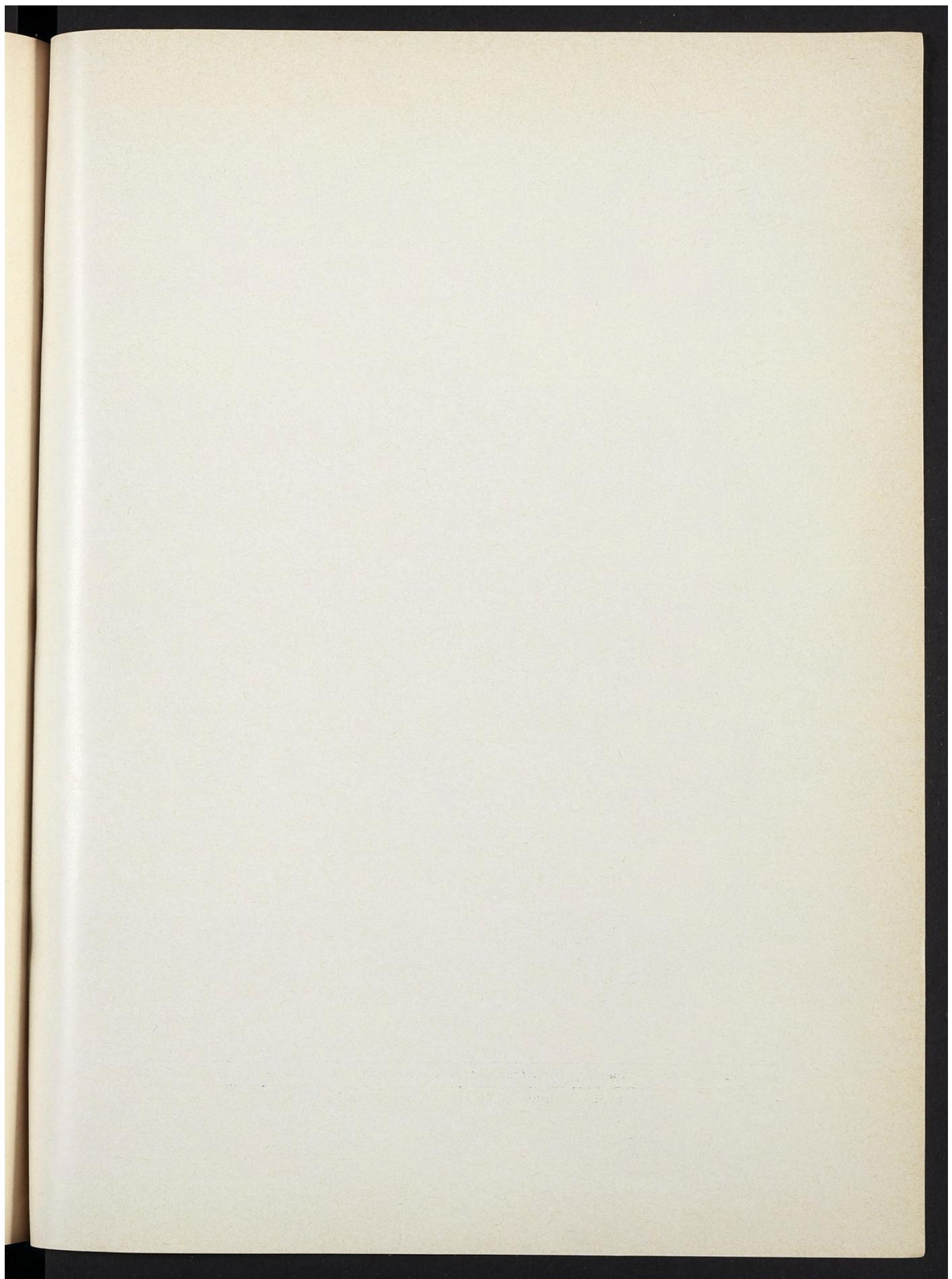
Liste des Prix et Médailles décernés :

— au titre de 1967 (rapports)	1969, n° 1, p. 37
— au titre de 1967 (rapports, suite)	1969, n° 2, p. 43
— au titre de 1968 (palmarès)	1969, n° 3, p. 42
— au titre de 1968 (rapports)	1970, n° 1, p. 19
— au titre de 1968 (rapports, suite)	1970, n° 2, p. 55
— au titre de 1969 (palmarès)	1970, n° 3, p. 33
— au titre de 1969 (rapports)	1970, n° 4, p. 51
— au titre de 1969 (rapports, suite)	1971, n° 1, p. 49
— au titre de 1970 (palmarès)	1971, n° 2, p. 37
— au titre de 1970 (rapports)	1971, n° 3, p. 43
— au titre de 1971 (palmarès)	1972, n° 1, p. 37
— au titre de 1971 (rapports)	1972, n° 2, p. 39
— au titre de 1971 (rapports, suite)	1972, n° 4, p. 29
— au titre de 1972 (palmarès)	1973, n° 1, p. 41
— au titre de 1972 (rapports)	1973, n° 3, p. 15
Grande Médaille Annuelle de la Société à M. Albert LAPRADE, Membre de l'Institut	1973, n° 2, p. 25

III

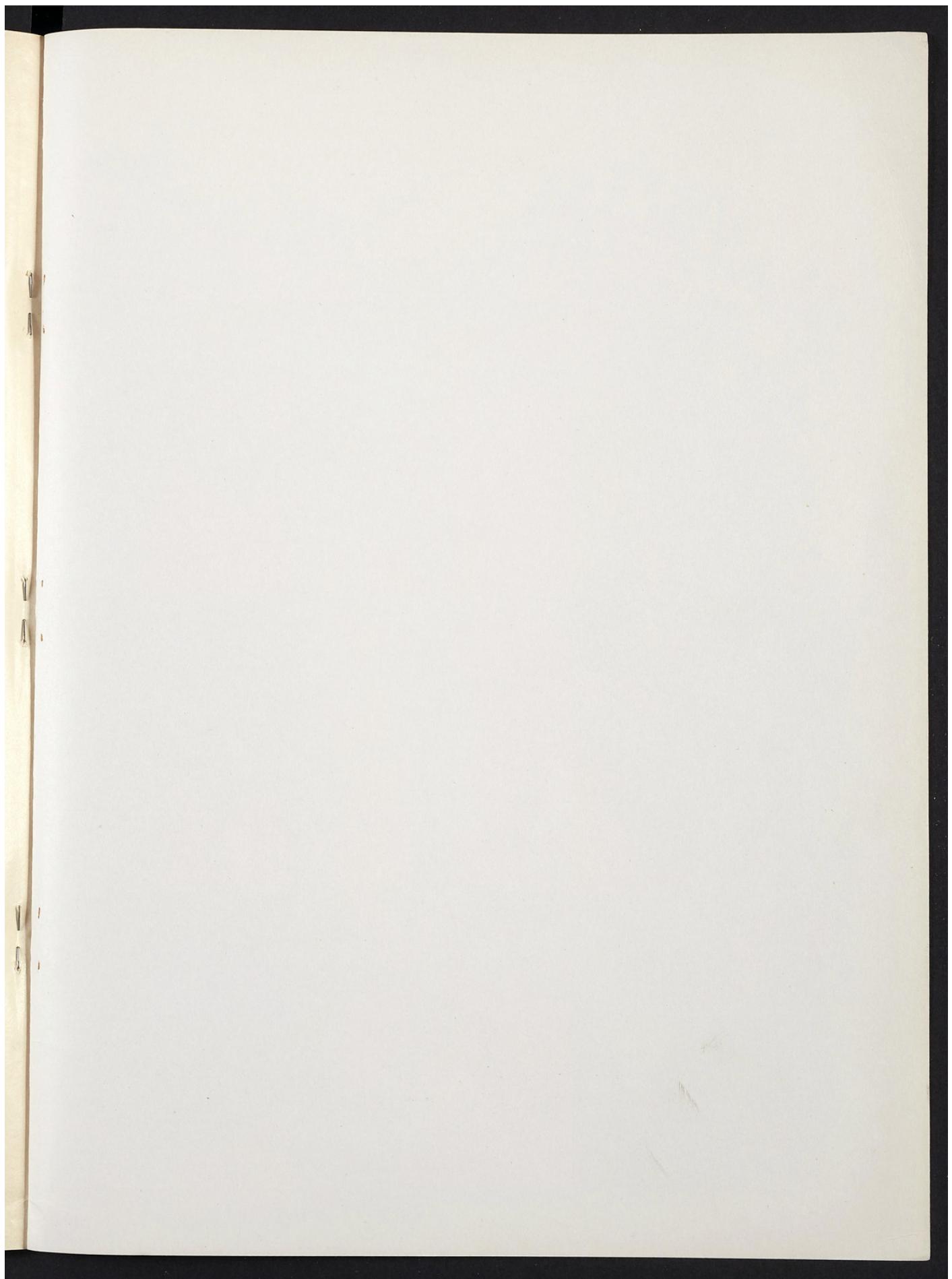
INDEX DES AUTEURS DE TEXTES

- | | | | |
|-------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| AUDOUIN Claude .. | 1970, n° 3, p. 13 | LANGERON J.-P. | 1969, n° 2, p. 17 |
| BARTHALON Maurice. | 1973, n° 3, p. 3 | LE CHATELIER François | 1970, n° 1, p. 3 |
| BEDHOME René .. | 1971, n° 4, p. 3 | LEGER JeanEtienne . | 1971, n° 2, p. 7 |
| BERTIN Jean | 1969, n° 3, p. 21 | LEHR Pierre | 1970, n° 2, p. 21 |
| BREBION Georges .. | 1970, n° 4, p. 3 | LEOMAND Gérard .. | 1973, n° 2, p. 3 |
| BRUGEROLLE Henri. | 1971, n° 1, p. 3 | LHOSTE Jean | 1971, n° 3, p. 21 |
| CABRILLAC Claude . | 1969, n° 1, p. 5 | MARCHAL Raymond. | 1972, n° 3, p. 7 |
| CADIOU Jean | 1969, n° 3, p. 3 | MARCHAL Philippe . | 1973, n° 2, p. 15 |
| CHOVIN Paul | 1972, n° 4, p. 3 | MARIE Guy | 1971, n° 1, p. 25 |
| CLEMENT P. | 1969, n° 2, p. 3 | NICOLLE Pierre | 1970, n° 2, p. 3 |
| DELERM Jean-Claude. | 1972, n° 4, p. 17 | PAVLIN C. | 1969, n° 3, p. 32 |
| DIMITROV Omourtague | 1972, n° 1, p. 3 | PERRIN Pierre | 1972, n° 2, p. 3 |
| DIMITROV
Mme Colette | 1973, n° 4, p. 23 | PONTE Maurice | 1970, n° 4, p. 25 |
| DUCLUZEAU Robert. | 1971, n° 4, p. 11 | REVEL Gilles | 1973, n° 1, p. 3 |
| ENGERRAND Jacques. | 1971, n° 3, p. 3 | STARON Thadée | 1973, n° 4, p. 3 |
| ETIENNE André | 1969, n° 4, p. 3 | SUREAU Robert | 1973, n° 1, p. 25 |
| GALLUT Jean | 1971, n° 1, p. 13 | TALBOT-BESNARD
Mme Simone | 1971, n° 2, p. 17 |
| GUINOT Bernard ... | 1970, n° 3, p. 3 | THIEBAULT Robert. | 1972, n° 2, p. 21 |
| KADOSCH M. | 1969, n° 3, p. 26 | TURPIN André | 1972, n° 1, p. 23 |
| | | WEISS Francis | 1969, n° 4, p. 33 |



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires

Le Président de la Société, Directeur de la publication : J. TRÉFOUËL, D.P. n° 1080
I.T.Q.A.-CAHORS. — 40.115. — Dépôt légal : II-1974



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires

