

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

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

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

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
	1974, n° 1
	1974, n° 2
	1974, n° 3
	1974, n° 4
	1975, n° 1
	1975, n° 2
	1975, n° 3
	1975, n° 4
	1976, n° 1
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
	1977, n° 1
	1977, n° 2
	1977, n° 3
	1977, n° 4
	1978, n° 1
	1978, n° 2
	1978, n° 3
	1978, n° 4
	1979, n° 1
	1979, n° 2
	1979, n° 3
	1979, n° 4
	1980, n° 1
	1982, n° spécial

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

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	1955, n° 2 (avril-juin)
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1955

Collation	1 vol. (p. [27]-45) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	36
Cote	INDNAT (30)
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.30

Note d'introduction à [l'Industrie nationale \(1947-2003\)](#)

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

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

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

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

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

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

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

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

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

Bibliographie

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

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

L'INDUSTRIE NATIONALE

•
COMPTES RENDUS ET CONFÉRENCES
DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE
•

PUBLIÉS AVEC LE CONCOURS
DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

1955

N° 2

L'INDUSTRIE NATIONALE

COMPTES RENDUS ET CONFÉRENCES DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

publiés sous la direction de **M. Georges DARRIEUS**, Membre de l'Institut, Président,
avec le concours de la Commission des Publications et du Secrétariat de la Société.

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

N° 2 : AVRIL-JUIN 1955

SOMMAIRE

GÉNÉRALITÉS SUR LA SÉPARATION INDUSTRIELLE DES ISOTOPES, par M. J. GUÉRON	27
LES APPLICATIONS DU RADAR, par M. E. VASSY.	37

44, rue de Rennes, PARIS 6° (LIT 55-61)
Publication trimestrielle

GÉNÉRALITÉS SUR LA SÉPARATION INDUSTRIELLE DES ISOTOPES (I)

par M. J. GUÉRON,
Directeur au Commissariat à l'Énergie Atomique.

Des atomes sont dits isotopes lorsqu'ils appartiennent à un même élément, mais ont des masses différentes. Dans le langage actuel, les noyaux de ces atomes contiennent autant de protons, mais des neutrons en nombres différents.

Nous ne serons donc pas surpris que des atomes isotopes aient des caractéristiques

nucléaires différentes, souvent même très différentes, alors qu'ils se distinguent à peine par leurs autres propriétés.

Le fait qu'une industrie des isotopes est née et se développe avec vigueur depuis dix ans est un des signes de notre entrée dans l'ère nucléaire.

* *

Après un bref rappel des notions théoriques fondamentales, je vais ce soir vous présenter certains caractères généraux des séparations isotopiques.

Décrivant ensuite sommairement la sé-

paration de l'uranium-235 par diffusion gazeuse et divers modes de préparation de l'eau lourde, j'insisterai sur les problèmes non résolus et sur divers aspects économiques et industriels de ces processus.

* *

NOTIONS FONDAMENTALES

L'existence des isotopes a été reconnue vers 1910, par Soddy, en conséquence des lois du déplacement radioactif. Peu après J. J. Thomson la découvrait chez le néon, non radioactif, et, après la première guerre,

les travaux d'Aston montraient la généralité du phénomène.

Il a donc fallu pour percevoir l'existence d'atomes isotopes, d'une part suivre des transmutations naturelles (Soddy), d'autre

(I) Conférence faite le 16 décembre 1954 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.
L'Industrie nationale. — avril-juin 1955.

part (J. J. Thomson, Aston) mettre en œuvre des méthodes capables de trier des atomes isolés (spectrométrie de masse). Tant qu'on opérait avec des atomes en grand nombre, l'isotopie restait masquée. Ce fait suffit à souligner que les isotopes ont des propriétés extrêmement voisines.

Dans la théorie actuelle, ceci se représente de la manière suivante : les propriétés physiques et chimiques courantes sont régies par les atmosphères électroniques des atomes. Pour divers isotopes d'un élément, ces atmosphères comportent le même nombre d'électrons (égal au numéro atomique Z) et le noyau étant très lourd par rapport aux électrons (plusieurs milliers de fois), sa masse exacte (A) peut être considérée comme infinie en première approximation, quelle qu'en soit la valeur exacte. Dans les équations qui décrivent le comportement des électrons, seule intervient alors la charge Z du noyau, exactement identique pour tous les isotopes d'un même élément.

Deux sortes de propriétés cependant dépendent directement de la masse. Les unes concernent le mouvement des molécules, considérées isolément, dans un champ de gravité, ou (lorsqu'elles ont perdu un ou plusieurs électrons, donc acquies une charge électrique) dans des champs électriques ou magnétiques (I). Les autres concernent leur mouvement statistique, brownien. A température donnée, l'énergie moyenne étant constante, la vitesse quadratique moyenne des diverses molécules est inversement proportionnelle à la racine carrée de leur masse. Ce fait est depuis longtemps connu, en particulier, sous la forme de la loi (dite de Graham) régissant l'effusion des gaz à travers une membrane poreuse (II).

On a longtemps résumé la situation dans

une formule frappante mais fautive : « l'isotopie affecte les propriétés physiques, mais n'altère pas les propriétés chimiques ».

En fait, l'isotopie modifie toutes les propriétés, en particulier les propriétés physico-chimiques (III). C'est F. Lindemann (célèbre, depuis, sous le nom de Lord Cherwell) qui, en 1919, tenta le premier d'obtenir des équations générales décrivant l'influence physico-chimique de l'isotopie (1) (IV). Depuis, la théorie statistique des vitesses de réaction a précisé ces relations (2).

Sans nous étendre sur ce sujet, digne à lui seul de plusieurs leçons, rappelons que les phénomènes physico-chimiques se décrivent dans un espace ayant pour coordonnées les distances interatomiques d'une part, l'énergie potentielle d'autre part. Toute transformation est représentée comme le cheminement d'un point, représentatif du système, d'un état initial à un état final sur une surface dont la forme ne dépend que des Z en cause et des distances interatomiques. La cote de la surface est, pour chaque configuration, l'énergie potentielle du système, et, au voisinage des maxima, minima et seuils, sa forme définit les forces de rappel qui s'exercent sur le système examiné, donc les fréquences fondamentales de ce système — compte tenu de sa masse réduite (V) — donc l'énergie résiduelle au zéro absolu associée à la configuration en question (VI).

Cette image peut être traitée en détail, sous réserve des difficultés de calcul. Bornons-nous à indiquer que, pour des systèmes isotopes (VII), la différence d'énergie relative à une transformation donnée est égale à la différence des différences des énergies résiduelles relatives aux deux systèmes dans leurs configurations finale et initiale.

(I) Quel que soit l'état physique, gaz sous basse pression, solution électrolytique, métal fondu.

(II) C'est ainsi qu'a été finalement déterminé le poids moléculaire de l'ozone (Soret 1868).

(III) Qu'elles soient, au sens ancien, physiques (tensions de vapeur, point de fusion) ou chimiques (constantes d'équilibre, constantes de vitesse de réaction).

(IV) V. Références bibliographiques en fin d'article.

(V) La masse réduite μ du système de n constituants de masse m_i est définie par $\frac{1}{\mu} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i}$. La fréquence d'une vibration harmonique provoquée par une force de rappel $f = kx$ est $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$.

(VI) Cette énergie est, pour chaque vibration, $E_0^0 = \frac{1}{2} h \nu$.

(VII) Nous employerons, par souci de brièveté, cette expression peu usuelle pour indiquer des systèmes qui ne diffèrent que par la substitution à un ou plusieurs de leurs atomes constituants d'isotopes de ces atomes.

Le rapport de fréquence de passage de points représentatifs de systèmes isotopes en deux endroits donnés de la surface est de l'ordre de grandeur de

$$\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)^p e^{-\frac{\delta \Delta E_0}{RT}} \quad (\text{I}).$$

Lorsque les emplacements considérés de la surface sont des minima, on a affaire à l'effet isotopique dans un système en équilibre (tension de vapeur, équilibre chimique, etc...). Si l'on considère, sur la surface, un minimum et un seuil (état de transition), on est en présence d'un phénomène cinétique (diffusion, vitesse de réaction).

Les effets isotopiques sont donc universels.

Le terme exponentiel (généralement très voisin de 1) tend rapidement vers l'unité quand la température s'élève, c'est-à-dire que les effets isotopiques sont d'autant plus sensibles que la température est plus basse. A température élevée, l'effet est du même ordre que celui d'une simple effusion. Ce terme exponentiel n'est sensiblement différent de 1 que dans des cas exceptionnels, à savoir grande différence relative des masses réduites ou réactions impliquant de fortes modifications des atmosphères électroniques autour des atomes intéressants, c'est-à-dire réactions avec grands changements de valence.

L'effet isotopique unitaire α est défini comme suit :

$$\alpha = \frac{N_1}{N_0} \frac{(1 - N_0)}{(1 - N_1)}.$$

— N_0 est la fraction molaire (II) de l'isotope considéré comme rare (III) dans le système initial;

— N_1 est cette même fraction dans le système ayant subi une opération capable de discriminer entre les isotopes.

Par exemple, dans un système liquide vapeur, α est le rapport des pressions de vapeur des deux systèmes isotopes; dans un système en équilibre chimique, α est le rapport

des constantes d'équilibre; dans un système en réaction, α est le rapport des coefficients de vitesse.

La séparation physicochimique des isotopes pourra donc consister en la répétition systématique d'opérations unitaires dont chacune aura, au maximum, l'efficacité α (IV).

Schématiquement, nous aurons à considérer le mouvement à contre-courant des deux isotopes à séparer, ce qui nous ramène, en principe, à la théorie bien connue de la distillation. En fait, nous nous trouvons ramenés aussi à son appareillage s'il est possible de choisir un système liquide-gaz.

Le coefficient de séparation, α , correspond alors à l'effet d'un plateau théorique. On trouvera dans la suite les valeurs de α pour un certain nombre de phénomènes utilisables dans la séparation isotopique. Par comparaison, rappelons que α varie de 3 à 10 pour les distillations courantes, de 2 à 5 environ pour la cristallisation fractionnée des chlorures de sodium et de baryum et vaut moins de 2 pour les très difficiles cristallisations fractionnées des terres rares (V).

Pour terminer cette introduction (trop aride peut-être pour les non spécialistes, mais à coup sûr outrageusement simpliste pour les initiés), examinons l'énergie minima nécessaire à la séparation des isotopes. Elle s'exprime thermodynamiquement par le travail qu'exige une séparation isotherme réversible, à savoir :

$$RT \log N_1 \text{ par mole (VI).}$$

Ainsi pour le carbone-13, présent à 1 p. 100 environ dans le carbone naturel ($N_1 = 0,01$) il suffirait, à température ordinaire, de $2,7 \cdot 10^{-4}$ kWh/g. Dans le cas de l'eau lourde ($N_1 = 1,6 \cdot 10^{-4}$) le travail minimum nécessaire serait de $3,4 \cdot 10^{-4}$ kWh/g, à 25° C, mais de $5,5 \cdot 10^{-5}$ kWh/g seulement à 50° K.

Nous verrons qu'il n'est pas possible — et de loin — d'obtenir des résultats aussi favorables.

(I) Il s'agit d'une approximation très grossière; p est un nombre petit, $\delta \Delta E_0$ dépasse rarement 500 calories par mole.

(II) Fraction molaire = $\frac{\text{nombre de molécules de l'espèce considérée}}{\text{nombre total de molécules du système}}$.

(III) Celui donc que l'on désire enrichir. Pour simplifier nous nous bornons au cas du mélange de deux isotopes seulement.

(IV) Comme il s'agit toujours d'opérations réversibles, l'efficacité α n'est évidemment atteinte que pour un état stationnaire du système (fonctionnant en vase clos) ou pour un transport de matière tendant vers zéro. Tout prélèvement, toute production, donne un facteur efficace inférieur, la perte étant calculable.

(V) En comparant ces valeurs à celles que l'on trouvera plus loin pour diverses séparations isotopiques, il faut se souvenir que $(\alpha - 1)$ représente mieux que α l'efficacité des étapes de séparation; en effet, si α vaut exactement 1, il n'y a pas de séparation possible. Si $\alpha = 1 + \varepsilon$ (ε petit), n passages donnent une séparation maxima de $\alpha^n = 1 + n\varepsilon + \dots = 1 + n(\alpha - 1) + \dots$.

(VI) Les solutions d'espèces isotopiques sont supposées être idéales.

RÉALISATIONS

I. — Séparation électromagnétique.

Les ions, accélérés par un champ électrique et déviés par un champ magnétique, suivent des trajectoires différentes selon leur masse et sont recueillis sur des électrodes collectrices convenablement placées (I).

Les avantages de cette méthode sont évidents :

1° en principe, on obtient des isotopes purs en une seule opération;

2° un appareil donné peut servir à la séparation d'isotopes quelconques, pourvu que les champs soient ajustables dans d'assez larges limites et que les produits à séparer puissent être mis sous une forme convenable à la production d'ions sous vide poussé (car il ne faut pas « bousculer » les ions sur leur trajectoire par trop de collisions accidentelles).

Ces avantages ont été exploités de façon spectaculaire aux Etats-Unis pendant la guerre pour la séparation de l'uranium-235. Et le nom de code « calutron », donné alors aux séparateurs magnétiques, est resté en usage courant pour désigner ces spectromètres de masse géants.

Des instruments de ce type sont actuellement employés pour produire en quantités modérées (0,1 à 10 g) les isotopes destinés à la recherche scientifique (3). Les Etats-Unis, la Hollande, l'Angleterre vendent des isotopes obtenus ainsi. D'autres pays, le nôtre en particulier (4), possèdent des instruments de ce type, sans suffire encore entièrement à leurs propres besoins.

Mais la séparation électromagnétique est abandonnée en fait pour la production industrielle. Elle est en effet très coûteuse :

1° en investissements : un instrument capable de séparer 10 mg/jour (II) d'uranium 235 coûte au moins 200 MF;

2° en fonctionnement :

a) les rendements d'ionisation étant faibles (quelle que soit la nature des sources) on met en jeu des quantités de matières beaucoup plus grandes (1 000 fois au moins) que celles que l'on peut espérer récolter;

b) mais, surtout, la consommation d'énergie est énorme, pouvant atteindre 1 000 kWh/g.

II. — Méthodes dépendant directement de la masse moléculaire.

Ces méthodes sont :

- A) la centrifugation;
- B) la diffusion thermique;
- C) la diffusion isotherme;
- D) la migration électrolytique (III).

Tous ces procédés opèrent sur des solutions ou des gaz. La séparation est donc contrecarrée par l'agitation thermique qui tend à remélanger les isotopes séparés.

A) LA CENTRIFUGATION.

Le facteur de séparation α obtenu par centrifugation marque particulièrement bien cette opposition. Il est donné par l'équation :

$$\alpha = e^{-\frac{\Delta E_c}{RT}}$$
 où ΔE_c est la différence d'énergie cinétique par molécule gramme des molécules isotopes soumises à la centrifugation et RT l'énergie d'agitation ther-

(I) Un ion de masse m portant n charges électroniques e , accéléré par un potentiel V , décrit dans un champ magnétique H un cercle de rayon r . Ces quantités sont liées par la formule : $r^2 H^2 = 2,1 \cdot 10^4 \frac{mV}{n}$ (r en cm, H en oersted, n en unités de masse atomique V en volts).

(II) Je renvoie le lecteur aux articles spécialisés (3) pour le détail des problèmes de construction et d'opération (charges d'espace etc.).

(III) Je me borne à mentionner cette méthode qui n'a pas eu, à ma connaissance, d'application industrielle.

mique. ΔE_c est égal à $V^2 \Delta M$, V étant la vitesse périphérique de la centrifugeuse et ΔM la différence de masse (I) (5).

La séparation par centrifugation présente seule ce caractère d'être fonction de la différence des masses et non de leur rapport. Il est donc tentant de l'appliquer à la séparation des isotopes lourds.

Les Allemands avaient construit pendant la guerre des centrifugeuses à gaz très rapides pour séparer l'uranium sous forme de UF_6 (6). La complexité des problèmes de construction et d'étanchéité paraît rendre la méthode impraticable à grande échelle.

B) DIFFUSION THERMIQUE.

Connue sous le nom d'effet Soret, la séparation des molécules suivant leurs masses sous l'effet d'un gradient de température a été traitée théoriquement par Chapman et Enskog (7). Clusius et Dickel (8) l'ont appliquée dès 1938 à la séparation isotopique. Le gradient de température est obtenu en tendant un fil chauffé électriquement dans l'axe d'une colonne cylindrique dont la paroi extérieure est refroidie. Dans chaque section droite, les molécules lourdes tendent à s'accumuler vers la paroi froide. De plus, elles descendent dans la colonne par un effet de thermosiphon, tandis que les molécules légères, pour la même raison, montent le long du fil axial. On réalise donc simplement un système à multiples étages.

Cette méthode semble utilisable pour la séparation des isotopes 10 et 11 du bore (II) (sous forme de BF_3). Mais son efficacité varie beaucoup d'un gaz à l'autre, car la théorie, fort complexe, montre que la séparation dépend, de façon très marquée, de la loi de variation avec la distance des forces intermoléculaires.

C) LA DIFFUSION ISOTHERME, a fait l'objet des plus considérables réalisations industrielles. Dès le temps de guerre, aux Etats-Unis et récemment en Angleterre, des usines de diffusion ont été construites et

exploitées pour la concentration de l'uranium-235 ($\alpha = 1,00437$ ce qui rend nécessaires des milliers d'étages).

Les productions, les prix d'établissement et d'exploitation sont encore soigneusement tenus secrets. Mais des détails frappants sont publiés sur l'étendue des bâtiments et sur les sources d'énergie nécessaires au fonctionnement des usines (9). C'est ainsi que les dernières installations construites aux Etats-Unis par l'A. E. C. semblent avoir exigé la construction de centrales d'une puissance totale voisine du million de kilowatts.

Les problèmes posés par la construction d'une telle usine sont les suivants :

1° Matériaux.

a) Il faut mettre l'uranium sous forme gazeuse; on utilise l'hexafluorure UF_6 . C'est un gaz très réactif, qui attaque les moindres traces d'eau et de nombreux métaux. Ces propriétés soulignent l'importance des questions de vide et de dégazage dont la complexité est accrue par l'immense volume des installations.

b) La réactivité d' UF_6 a fait pousser vigoureusement l'étude des substances en présence desquelles il peut se trouver. Les dérivés fluorés et chlorofluorés des hydrocarbures, en particulier les huiles fluorées et le téflon — dont les applications se généralisent rapidement — sont des descendants directs de l'industrie nucléaire du temps de guerre.

2° Technologie.

a) Il est nécessaire d'avoir des membranes très sélectives qui, en même temps, présentent une bonne tenue mécanique et la meilleure perméabilité possible. Il en existe certes de praticables (témoins les usines en marche), mais aucune publication ne les a encore décrites avec la moindre précision.

b) A chaque étage, le gaz amené à une pression convenable diffuse dans un compartiment où la pression est notablement plus basse, car on veut une vitesse de passage

(I) On calcule aisément qu'une centrifugeuse ayant la même efficacité qu'un étage de diffusion ($\alpha = 1,0043$) ou dix de ces étages ($\alpha^{10} = 1,044$) et opérant sur UF_6 à 80 °C doit avoir une vitesse périphérique de 70 ms^{-1} dans le premier cas et 200 ms^{-1} dans le second soit, avec un rayon de 1 m (ce qui est grand) des vitesses de rotation respectives de 4 000 et 12 000 tours par minute environ.

(II) A titre d'exemple on peut maintenant commander le bore 10 isolé par centaines de grammes, voire par kilogrammes. Son prix, à la pureté isotopique de 95 p. 100 au moins, est actuellement de l'ordre de 10 000 F par gramme.

suffisante et il convient d'éviter une rétro-diffusion qui diminue la valeur efficace de α . Le gaz recueilli doit donc être recomprimé avant de subir une nouvelle diffusion. D'où la nécessité de pompes capables de fonctionner dans UF_6 (I).

c) Des instruments de contrôle très variés doivent être installés.

3° Dessin d'usine.

Nous avons affaire à une cascade d'étages distincts.

a) Sans entrer dans le détail de la théorie, il faut attirer l'attention sur le soin avec lequel doivent être harmonisés les deux courants circulant en sens inverse.

Les questions les plus délicates à régler sont :

— i) le choix des points de réinjection aux étages antérieurs du produit partiellement appauvri;

— ii) la perte de l'isotope rare que l'on peut se permettre en rejetant, à un certain stade, ce produit appauvri (en terme de distillateur, le dimensionnement du stripping);

— iii) la chasse aux volumes morts.

b) Dans le cas particulier qui nous occupe, il faut de plus veiller à ce qu'aucune section de l'usine, qui, je le répète, est énorme (plusieurs km de tour dans certaines réalisations américaines) ne puisse devenir le siège d'une réaction nucléaire en chaîne.

4° Gestion.

Comme dans toutes les installations de ce genre, la régularité de marche est le souci majeur, aggravé ici par l'énorme volume qu'il faut maintenir en régime et par la longue durée nécessaire à établir ce régime (II).

L'ampleur des problèmes d'instruments de contrôle divers, de bilan matière, de consignes d'urgence, de mode d'entretien courant etc... peut être aisément imaginée par des ingénieurs et des industriels avertis.

Je m'excuse de cette description trop qualitative. Aucune donnée numérique officielle n'est publiée et je ne voudrais pas me faire ici l'écho de rumeurs, si bien fondées qu'elles puissent paraître.

III. — Méthodes qui dépendent indirectement de la masse moléculaire.

Il n'y a pas d'énumération exhaustive possible, tous les phénomènes physicochimiques étant, en principe, utilisables y compris ceux de la biochimie dont il ne faudrait pas, à long terme, méconnaître l'importance.

Les méthodes les plus employées sont la

distillation et les réactions d'échange (dont l'électrolyse est un cas particulier). C'est ainsi que sont obtenus les isotopes d'usage scientifique courant, dont la production est de l'ordre de quelques centaines de grammes à quelques kilogrammes par an.

Voici quelques exemples :

($\sim 1\%$) ^{13}C (III)	distillation de CO	$\alpha \sim 1,1$	à -190°C
	échange $\text{CN}^- + \text{CNH}$	$\alpha \sim 1,013$	à 25°C
($\sim 0,4\%$) ^{15}N	échange $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$	$\alpha = 1,023$	à 25°C
	échange $(\text{NO} + \text{NO}_3^-)$	1,09	à 25°C
(0,2%) ^{18}O	distillation H_2O	$\alpha = 1,008$	à 25°C
	électrolyse H_2O	1,01	
	échange $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	1,047	à 0°C (lent)
($\sim 4\%$) ^{34}S	échange $\text{SO}_2 + \text{SO}_3^{--}$	$\alpha = 1,012$	à 25°C

(I) On voit ici de façon très claire une des sources de consommation d'énergie qui nous éloigne de la faible exigence thermodynamique idéale citée plus haut.

(II) Le temps de mise en train d'une séparation aboutissant à 235U pur doit être de l'ordre de l'année. Ceci rend compte, entre autres raisons, de ce que la séparation électromagnétique a été nécessaire pendant la guerre et s'est vue abandonnée depuis lors.

(III) Les nombres entre parenthèses donnent l'abondance naturelle de l'isotope rare considéré.

On notera que tous ces procédés, sauf l'électrolyse, peuvent se traiter comme des distillations, le constituant gazeux représentant la vapeur et la solution le liquide. On travaille donc avec des colonnes garnies d'un remplissage. Le gaz est régénéré, dans l'équivalent d'un bouilleur, par réaction chimique; une solution capable de capter ce gaz en quantité convenable constitue, en tête de colonne, l'équivalent du liquide du reflux obtenu en distillation courante par condensation. Le brut à séparer est introduit au niveau convenable sous forme de solution, ou de gaz frais. Les coefficients de fractionnement étant faibles les taux de reflux sont élevés, atteignant aisément 20, parfois plus.

Pour la même raison, les soutirages sont très faibles par rapport à la quantité de matière mise en œuvre (I).

La théorie générale de la distillation s'applique, et plusieurs auteurs (10) en ont développé les cas particuliers à la séparation isotopique, sensiblement différents de ceux que connaissent bien les producteurs d'alcool et les pétroliers. Nous visons en effet à obtenir, avec un haut rendement et malgré des coefficients de fractionnement faibles, des fractions pures de produits rares. Disons simplement que plusieurs étages successifs sont nécessaires et que, à chacun d'eux, les colonnes mises en œuvre (de distillation ou d'échange) doivent comporter une centaine au moins de plateaux théoriques.

IV. — L'eau lourde.

A) LE PROBLÈME DE L'EAU LOURDE EST EN TOUS POINTS PARTICULIER :

1° Les quantités nécessaires sont très grandes : la moindre pile à uranium naturel ou légèrement enrichi (combustible nucléaire essentiel de notre génération) en exige de 5 à 15 tonnes. Certains projets de machines productrices d'énergie tablaient sur 200 t d'eau lourde (pour environ 100 MW de puissance motrice). On ne connaît pas la production mondiale actuelle, car les plus gros producteurs en gardent le chiffre secret. Mais on sait que la Norvège (seul vendeur jusqu'ici) en faisait moins de 10 t/an il y a peu d'années encore.

2° Si attrayantes qu'elles soient par certains aspects, les piles à eau lourde et uranium naturel ou peu enrichi n'ont d'avenir que si le prix de l'eau lourde tombe bien au-dessous du prix de vente norvégien (environ 75 F/g à ce jour).

3° Les coefficients de séparation entre hydrogène et deutérium sont souvent très grands, étant donné l'énorme rapport de masse entre ces deux isotopes. Leur séparation est donc en principe facile.

4° Mais le deutérium est exceptionnellement peu abondant, sa teneur moyenne étant voisine de 1 pour 6 000 d'hydrogène, et très constante d'une source naturelle à l'autre (II).

B) L'ÉLECTROLYSE.

1° L'eau lourde est un produit secondaire de la fabrication électrolytique de l'hydrogène. Il se trouve que les conditions industrielles courantes (bains de soude ou potasse caustique, cathodes de fer pur) sont particulièrement favorables à la séparation : l'eau lourde s'enrichit dans la solution qui, normalement, stagne dans les bacs. Le coefficient de séparation est au moins égal à 5 dans les conditions industrielles. Le transport de l'eau d'un étage au suivant de la cascade se fait aisément par simple condensation de la vapeur entraînée par les gaz. Les seuls frais consistent en une faible capitalisation pour l'aménagement des cascades, pour la construction des étages de finition et en une certaine perte de production (III) (de l'ordre de 1 p. 100 au plus).

(I) Ex. Dans une installation (non modèle) de distillation d'eau produisant du deutérium (et non de l'oxygène-18) la production mensuelle était égale à la quantité d'eau lourde présente dans les colonnes. Dans une installation de distillation d'hydrogène, on prévoit que la vie moyenne du produit dans l'unité sera de 1,5 h, dont 0,2 à l'état liquide.

(II) Des variations extrêmes de 25 p. 100 ont été signalées, mais elles n'ont pas de valeur industrielle (fumerolles de volcans néozélandais pour les échantillons les plus riches connus).

(III) En effet, lorsque l'électrolyte devient assez concentré, l'hydrogène est lui-même riche en deutérium; il vaut mieux alors le brûler et recycler l'eau obtenue.

Dans ces conditions, une usine d'hydrogène électrolytique peut, au prix de moins de 1 p. 100 de sa production (ou au prix de quelque kWh par gramme d'eau lourde), fournir, à la concentration de 99,5 p. 100 ou plus, le dixième environ de l'eau lourde entrant normalement dans son circuit.

Malheureusement, l'hydrogène électrolytique n'est pas économiquement viable dans les pays en famine d'énergie comme le nôtre. Aucune production importante n'est donc possible de cette manière pour nous (I). L'économie d'une production électrolytique d'hydrogène, déficitaire en elle-même et restaurée par une production d'eau lourde, semble n'avoir pas encore de bases solides.

Mais toute production rentable d'hydrogène électrolytique serait maintenant hérétique si elle négligeait de récupérer l'eau lourde.

2° Le faible rendement global conduit à combiner l'électrolyse à d'autres méthodes qui permettent de concentrer le deutérium. Il s'agit de l'échange entre hydrogène et eau, d'une part, de la distillation de l'eau, d'autre part. Nous verrons celles-ci plus loin (II).

C) ÉPUISEMENT DE L'HYDROGÈNE INDUSTRIEL.

La distillation de l'hydrogène liquide et l'échange entre hydrogène et eau concentrent le deutérium dans la phase liquide. La première offre un coefficient de séparation de environ 1,25 à 40° K et 1,75 à 20° K. Pour la seconde ce coefficient est de l'ordre de 3 à 25° C, de 2 à 100° C.

L'une et l'autre méthode semblent pouvoir donner de l'eau lourde au prix de 2 à 5 kWh par g, avec cependant des investissements beaucoup plus lourds que dans l'électrolyse.

Ces procédés peuvent donc vivre en parasites sur le fleuve d'hydrogène qui abreuve l'industrie chimique des pays industriels. On calcule aisément que, en France comme aux États-Unis, ce fleuve transporte, chaque année, par habitant, 0,6 à 0,8 g de deutérium, soit 3 à 4 g d'eau lourde. Cela fait pour nous

plus de 100 t par an. Nos besoins actuels ne sont pas si élevés.

1° La distillation de l'hydrogène liquide est étudiée pour le C. E. A. par la Compagnie Française de l'Eau Lourde. Celle-ci, constituée par l'Air Liquide et l'O. N. I. A., va construire une unité pilote, conçue pour produire 2 à 3 tonnes par an, et dont la mise en marche est espérée bien avant la fin de 1956. On escompte des investissements de l'ordre de 150 MF par tonne-an d'eau lourde.

La marche de cette unité pilote aidera à déterminer la dimension optima d'installations ultérieures.

2° L'échange isotopique $HD + H_2O \rightleftharpoons HDO + H_2$ serait un moyen idéal de séparation de l'eau lourde si cette réaction s'effectuait avec une vitesse appréciable en l'absence de catalyseur. Mais tel n'est pas le cas. Elle est fort accélérée par tous les catalyseurs d'hydrogénation. Mais nous n'en connaissons pas encore d'assez efficaces en présence d'eau liquide. Il n'est donc pas facile d'établir un système à contre-courant, qui exige des rebouilleurs intermédiaires. De plus, comme nous l'avons déjà dit, l'élévation de la température abaisse le facteur de séparation. Cependant ce procédé a été monté pendant la guerre (associé à une électrolyse) et fonctionne encore à l'usine de Trail (C. B.) de la Canadian Mining Smelting and Refining Co. Aucune publication ne donne à son sujet de données économiques ou techniques précises, encore qu'une description générale assez poussée ait été présentée l'été dernier au Congrès d'Ann Arbor (11).

D) AU-DELA DE L'HYDROGÈNE INDUSTRIEL.

Si les besoins viennent à dépasser la quantité d'eau lourde que peut fournir l'hydrogène industriel « légitime », il faut se tourner vers d'autres matières premières. L'eau est évidemment tout indiquée.

Nous ne l'avons pas prise en premier lieu pour deux raisons :

i) Les réactions d'échange où le corps associé à l'eau (hydrogène ou tout composé hydrogéné) sert simplement de vecteur au

(I) L'électrolyse de Pierrefitte de la société Pierrefitte-Kalaa Djerda est exploitée pour l'eau lourde.

(II) D'autres sont concevables, et ont été publiées ou brevetées, comme la consommation d'hydrogène dans des réactions rentables donnant de l'eau (par exemple réduction d'oxydes métalliques).

deutérium (par exemple, entre deux réservoirs d'eau à températures différentes) ne sont pas encore au point — du moins pour nous.

ii) La distillation de l'eau (en cours d'étude) a un coefficient de séparation nettement faible (1,026 à 100 °C; $\sim$ 1,05 vers 60 °C). Pour être économique, elle semble devoir exiger une au moins des conditions suivantes :

α) abondantes sources de chaleur à bas prix (ce que possèdent l'Italie et la Nouvelle Zélande avec des sources naturelles de vapeur chaude),

β) construction de colonnes efficaces à perte de charge très faible permettant d'utiliser économiquement des pompes à chaleur.

La distillation de l'eau fait l'objet d'études actives dans divers pays.

Une réalisation américaine du temps de guerre a été décrite récemment (11). Elle n'a

aucune prétention et ne saurait être, telle quelle, retenue pour l'avenir.

L'Angleterre s'est résolument dirigée vers la construction de colonnes peu coûteuses. Nos collègues de Harwell ont décrit un garnissage de type nouveau, capable de grands débits, mais au prix de fortes pertes de charge (12).

Ils viennent de décider d'alimenter par la vapeur naturelle de Nouvelle-Zélande un complexe, centrale et usine de distillation, fournissant de l'eau lourde.

Il ne semble pas que pareille association soit rentable dans des centrales à vapeur non gratuite (I).

Les études doivent continuer, au laboratoire comme sur la planche à dessin, si l'on veut satisfaire les besoins d'eau lourde — non encore bien définis — qu'exigera le développement de l'industrie nucléaire.

(I) Suivant les conditions opératoires il faut de 25 à 100 t/h de vapeur (qui peut être assez froide mais qui doit être très régulièrement disponible) pour produire 1 t/an d'eau lourde.

Bibliographie

1. F. A. LINDEMANN et F. W. ASTON, *Phil. Mag.*, 37, 523, 1919.
F. A. LINDEMANN, *Phil. Mag.*, 38, 173, 1919.
2. J. BIGEISEN, *J. Chem. Phys.*, 15, 261, 1947; 17, 675 1949.
H. C. UREY, *J. Chem. Soc.*, 562-581, 1947.
3. V. D. ALLEN, *Nature*, 168, 451, 1951.
C. P. KEIM, *Ann. Rev. Nuclear Sci.*, 1, 263, 1952.
C. P. KEIM, *J. Appl. Phys.*, 24, 1255, 1953.
4. R. BERNAS, *J. Phys.*, 14, 34, 1953.
5. H. S. TAYLOR, *A treatise on Physical Chem.*, I, 56-58.
6. W. GROTH et P. HARTECK *Z. Elektrochem.*, 54, 129, 1950.
W. GROTH et P. HARTECK, *Naturwiss.*, 37, 490, 1950.
7. S. CHAPMAN, *Phil. Mag.*, 38, 182, 1919.
8. K. CLUSIUS et G. DICKEL, *Naturwiss.*, 26, 546, 1938.
- K. CLUSIUS et G. DICKEL *Z. Physikal. Chem.*, 1939 et années suivantes.
9. H. d. W. SMYTH, *Atomic Energy for Military Purposes*, Princeton, 154-205, 1945.
Rapports semestriels de l'Atomic Energy Commission (U. S.), 13059, janv. 1950; 8-12, juillet 1950, entre autres.
Britain's Atomic Factories, H. M. S. O., Londres, 43, 54, 1954.
10. K. COHEN, *The theory of isotope separation*, Mc Graw Hill, 1951.
I. DOSTROVSKY, J. GILLIS et D. R. LLEWELLYN, *L. Farkas Memorial volume*, publication du Research Council of Israel, 62-94.
M. SILVESTRI, *Nuovo Cimento*, 9, 97, 1952.
11. P. J. SELAK et J. FINKE, *Chem. Eng. Progress*, 50, 221, 1954.
12. *Atomics*, 5, 227, 1954.
Engineering, 178, 46, 1954.
Ind. Eng. Chem. 46, 13 A, 1954.

LES APPLICATIONS DU RADAR⁽¹⁾

par M. E. VASSY,

Professeur à la Faculté des Sciences de Paris.

Lorsque la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale m'a demandé de traiter ce sujet, je me suis trouvé dans la situation d'un élève qui doit tirer de deux lignes d'énoncé plusieurs pages de texte. Aussi sans craindre de parodier une de nos plus pures gloires militaires, je me suis dit aussi : « De quoi s'agit-il ? » Qu'est-ce que le radar ? Pour beaucoup, c'est une antenne parabolique ou en forme de fromage avec un écran de tube cathodique et beaucoup d'électronique entre les deux. Mais reportons-nous aux bons auteurs, à la conférence que M. Maurice PONTE, Directeur général de la Compagnie générale de T. S. F., a prononcée lors du 150^e anniversaire de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 17 octobre 1951.

« C'est la technique qui permet de détecter, localiser exactement dans l'espace et le temps, une discontinuité de propagation d'une onde électromagnétique qui peut être due à des causes très diverses. »

Donc cette détection électromagnétique n'est pas limitée aux hyper-fréquences. Aussi le champ des applications est-il très vaste. S'il fallait les développer toutes, je devrais énumérer des têtes de chapitre ; mon exposé serait nécessairement fastidieux. Aussi, me bornerai-je à parler des applications scientifiques, et il sera préférable de demander que les autres applications, telles

que celles à la navigation ou les applications industrielles, soient traitées par un marin, un aviateur, ou un ingénieur.

Tout d'abord, quelques mots d'histoire. Lorsque le problème de la courbure des ondes radioélectriques autour de la Terre s'est posé, les calculs ont montré qu'un faible gradient de densité électronique est suffisant pour donner une courbure analogue à celle de la Terre.

C'est BREIT et TUVE, qui, en 1926, en utilisant la méthode des échos, ont mis expérimentalement en évidence l'existence des couches ionisées qu'APPLETON et BARNETT avaient découverte auparavant par de toutes autres méthodes. Vers 1930, après avoir découvert les couches E et F, on avait recherché s'il existait des couches à plus basse altitude. Pour cela, on avait dû diminuer la fréquence, et on était arrivé à déceler effectivement quelques échos à des altitudes de 4 à 5 kilomètres. Un beau jour on put lire dans un numéro du « Physical Magazine » que ces échos dont la présence n'était pas continue coïncidaient avec la présence d'avions au-dessus du sondeur. A partir de ce jour, la détection des avions par les ondes électromagnétiques était née. Le secret l'enveloppa aussitôt, et, si quelques réalisations pacifiques telles que celles utilisées sur le « Normandie » avant la guerre pour déceler les icebergs virent jour, on

(1) Conférence faite le 12 novembre 1953 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

travaille, dans les uns et les autres pays, dans le plus grand secret. En France, cette technique était appelée la détection électromagnétique, mais au cours de la dernière guerre le terme de radar s'imposa. Nous

laisserons donc de côté les applications dont on a déjà beaucoup parlé; en particulier les applications techniques, pour passer à d'autres moins connues : les applications scientifiques.

I. — ÉTUDE DES MÉTÉORES

En étudiant systématiquement l'ionosphère on s'était aperçu dès 1931 que les météores ou étoiles filantes laissaient derrière eux une traînée ionisée. Il fallut attendre 1945 pour que les radars laissés comme surplus de l'Armée en Angleterre et confiés à HEY et STEWART permettent d'accomplir un grand progrès. Ceci parce qu'ils étaient mieux adaptés. Si leur longueur d'onde était de 4 à 5 mètres, ils avaient une plus grande sensibilité, et les impulsions étaient d'une durée très brève (8μ sec.); en outre le rayonnement sur ces longueurs d'ondes métriques pénètre mieux dans les régions normalement ionisées, et permet de mieux mettre en évidence l'ionisation temporaire due aux météores. On a également pour les fréquences supérieures à 60 Mc/s la possibilité d'avoir une réflexion spéculaire suivant le schéma de la figure 1, lorsque le faisceau électromagnétique est perpendiculaire à la trace ionisée P, la réflexion suivant le même chemin est très intense.

Entre le 1^{er} juin et le 17 juillet 1945, les auteurs anglais enregistrèrent plus de 2 000 échos et la nuit, en l'absence de nuages, ils constatèrent effectivement des coïncidences avec l'observation visuelle.

La Comète de GIACOBINI-ZINNER avait produit en 1933 une importante averse de météores. Pendant la nuit du 9 au 10 octobre 1946, la Terre devait traverser l'orbite de la Comète. La station de Jodrell Bank dirigea son radar (5 antennes Yagi montées sur un projecteur de D. C. A.). Jusqu'à minuit on nota environ deux échos par heure. Puis, soudain l'observation visuelle et la radio montrèrent un accroissement considérable avec un maximum à 3 h 40 : plus de 200 échos radar par *minute*, puis une décroissance et à 6 h 30 on était revenu à deux échos par heure. L'observation radio-électrique des météores était donc devenue possible et depuis 1949 cette observation est continue en plusieurs points du globe.

Elle a permis tout d'abord l'étude de météores pendant la journée, même en présence de nuages. Cela a conduit à connaître parfaitement la distribution de l'activité météorique au cours de l'année, la figure 2 en donne un exemple. De plus, grâce à l'observation radioélectrique, il a été possible de déterminer le point radiant des météores, c'est-à-dire les coordonnées du point d'où ils semblent provenir. Il y a pour cela trois méthodes :

La première, due à HEY et STEWART, utilise le fait que si un aérien directif est en position fixe il en résulte que les échos de météores provenant d'une région à 90° produisent une réflexion spéculaire. Considérons sur la figure 3 un point radiant X : il ne donnera pas d'écho mais par suite du mouvement apparent de la sphère céleste il arrivera un moment où on le détectera. C'est donc de la variation diurne des échos que l'on pourra déduire la position du point radiant.

Une seconde méthode, celle de MC KINLEY et MILLMAN, mise en œuvre au Canada, consiste à disposer 3 stations de radar avec des aériens ayant une faible directivité. On mesure de chaque station les distances à deux points du parcours. Ayant ainsi la direction, on a celle du point radiant. Ici on utilise la réflexion non spéculaire; aussi la méthode est-elle applicable à un faible pourcentage de cas, seulement lorsqu'il s'agit de grosses particules météoriques.

Il est possible également, d'après les observations à l'aide du radar, de déterminer la vitesse des météores. Voyons d'abord la première méthode. On connaît le mode d'observations classiques en scope A. La base de temps est calibrée en kilomètres. Normalement elle n'est pas visible, mais l'écho sur une trace ionisée provoque un renforcement de son intensité et produit une tache brillante sur le tube cathodique. Un film photographique se déplace perpendiculairement à la base de temps, et l'enre-

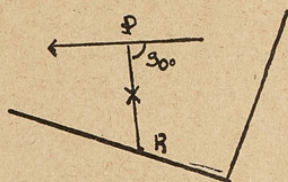


Fig. 1.

Fig. 2.

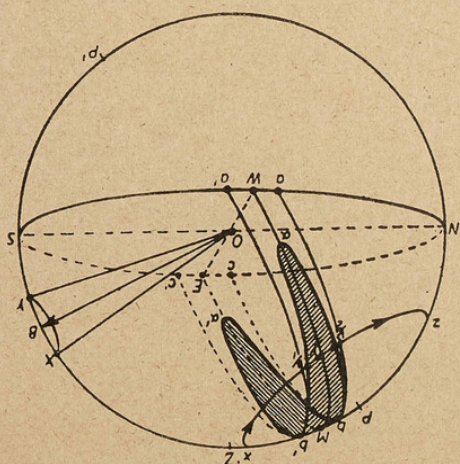
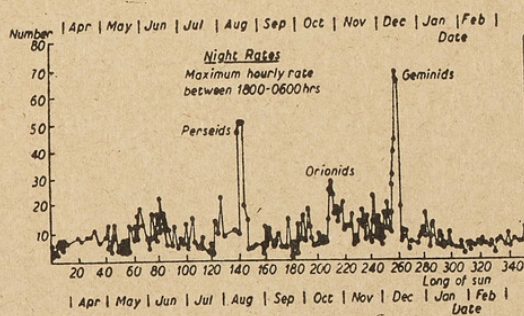


Fig. 3.

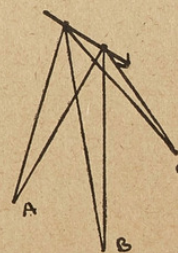


Fig. 4.



Fig. 5.

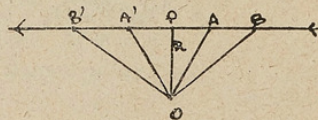


Fig. 6.

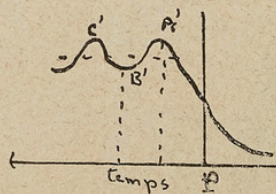


Fig. 7.

gistroment permet de mesurer la distance et la durée de l'écho. On distingue sur les photographies un écho faible avant l'écho principal qui correspond à la réflexion spéculaire. Ce fait s'explique facilement d'après la figure 5; en B il y a diffusion sur la trace ionisée; tandis qu'en A il y a réflexion.

$$\sqrt{R^2 - R_0^2} = (T - T_0) V$$

d'où il est possible de tirer la vitesse V.

Il existe une autre méthode due à R. HERLOFSON, basée sur la diffraction des ondes. Considérons la trace ionisée laissée par un météore, et de la station radar O, la perpendiculaire OP sur cette trace, soit R cette distance OP; considérons les points A et A' de la trajectoire ionisée tels que

$$OA = OA' = R + \frac{\lambda}{4},$$

les points B et B', tels que :

$$OB = OB' = R + \frac{\lambda}{2},$$

$$OC = OC' = R + \frac{3\lambda}{4},$$

λ , est la longueur d'onde sur laquelle fonctionne le radar.

Les électrons de la traînée ionisée oscillent sous l'influence de l'onde émanant du radar O, et vont rerayonner dans toutes les directions; les ondes diffusées par PA et PA',

auront parcouru une distance comprise entre le double de R et de $R + \frac{\lambda}{4}$.

Les ondes diffusées par AB et AB' auront parcouru une distance comprise entre le double de $R + \frac{\lambda}{4}$ et le double de $R + \frac{\lambda}{2}$. Si

les ondes diffusées par PA et PA' représentent une amplitude positive en O, celles diffusées par AB et A'B' seront déphasées et auront une amplitude négative. On conçoit donc l'existence des zones de FRESNEL et, si on suppose que l'ionisation débute à la verticale de l'observation, la figure 7 montre en fonction du temps, si on suppose que l'ionisation débute à la verticale de l'observation, la courbe représentant l'intensité reçue, et il est possible de déduire de là la vitesse.

De nombreuses applications de cette méthode ont été faites; on trouve couramment des vitesses de l'ordre de 30 à 40 kilomètres par seconde. L'intérêt de cette méthode est considérable pour l'astronomie parce que le calcul de l'orbite est possible, et connaissant l'orbite on peut alors résoudre de nombreux problèmes de cosmogénie. Pour ce qui concerne la physique atmosphérique, on sait que le rôle des météores est très important pour l'ionosphère, et pour la production, en partie du moins, de la région E sporadique.

II. — ÉTUDE DES AURORES POLAIRES

Les étoiles filantes ne sont pas les seuls phénomènes d'émission lumineuse dans la haute atmosphère que le radar a permis d'étudier. Il y a aussi les aurores polaires dont le maximum de fréquence se présente sur un cercle centré sur le point où l'axe magnétique terrestre perce la surface du globe. Leur altitude a été déterminée surtout par le physicien norvégien Carl STÖRMER. Deux stations sont à une distance suffisante pour constituer une base, et en chacune de ces stations se trouve un appareil photographique. Les opérateurs, reliés par téléphone, photographient au même instant la même lueur aurorale. Sur leurs clichés, ils obtiennent les images des étoiles qui leur serviront de repère. On conçoit qu'avec cette méthode, le dépouillement

soit long et difficile. Il conduit à la détermination de l'altitude. STÖRMER a effectué de nombreuses déterminations, et montré que l'altitude de ces phénomènes se trouve le plus souvent aux environs de 100 kilomètres, mais peut atteindre parfois 1 000 kilomètres. En 1940, à la Station aurorale de Trömsö, HARANG avait déjà constaté sur la fréquence de 40 Mc/s, plus grande que la fréquence critique de la région E, que des échos fluctuant de faible amplitude coïncidaient avec la présence d'aurores polaires.

En 1947, LOVELL, travaillant avec des radars fonctionnant sur 46 Mc/s et 72 Mc/s, put obtenir des échos. De là, il mesura la distance du phénomène, et, connaissant sa hauteur au-dessus de l'horizon, il put déterminer l'altitude. On a ainsi un procédé com-

mode pour étudier la distribution aurorale en fonction de l'altitude, de l'heure, du jour, etc. Et ce mode d'observation n'est pas faussé systématiquement comme l'observation visuelle par la durée du jour, la présence de nuages, etc. Il est possible en outre de déduire de ces mesures la valeur de l'ionisation qui a été trouvée de l'ordre de 10^8 à 10^9 électrons/cm². Un peu partout aux abords des régions aurorales d'importantes équipes se sont constituées pour étudier ces phénomènes. Il y a notamment celle de RYDBECK à Kiruna en Suède, qui a

obtenu de magnifiques films, et celle de CURRIE à Saskatoon au Canada, où elle dispose de six radars fonctionnant entre les fréquences de 3 000 et de 56 Mc/s. Ainsi de nombreux et importants résultats ont été obtenus et les bateaux de guerre français qui escortent les pêcheurs sur les bancs de Terre-Neuve ont obtenu également des échos; et lors de discussions récentes concernant l'Année Géophysique Internationale on s'est rendu compte que l'étude de la distribution des aurores à l'aide de radar était la seule valable et efficace.

III. — APPLICATIONS A LA MÉTÉOROLOGIE

Jusqu'ici le retour des ondes émises par un radar était dû à un phénomène de réflexion en milieu ionisé se ramenant sous l'incidence normale à un phénomène de réflexion pur et simple. Nous allons maintenant avoir affaire à un phénomène de diffraction par un obstacle tel que les gouttes d'eau (pluie), les gouttelettes (nuages) ou les particules de neige ou de grêle.

En 1940, on se posait la question de savoir si un avion pouvait se dissimuler dans un nuage, ou derrière un rideau de pluie? On savait qu'il était possible de construire des radars fonctionnant sur des longueurs d'ondes inférieures à 20 centimètres, mais on voulait auparavant connaître leur comportement en présence d'hydrométéores. Dans ce domaine le calcul a précédé l'expérimentation. RYDE appliqua alors les théories de Lord RAYLEIGH et de MIE.

Le 20 février 1941, on détecta en Angleterre un orage avec chute de grêle à l'aide d'un radar fonctionnant sur 10 centimètres. L'orage fut suivi sur la mer jusqu'à une distance de sept milles. Une observation semblable fut effectuée au Massachusetts Institute of Technology. Mais le développement de ces études attendit la fin des hostilités.

La théorie a montré qu'une onde électromagnétique est diffusée par des particules sphériques de dimensions faibles devant la longueur d'onde, proportionnellement à la 6^e puissance de leur diamètre, c'est-à-dire que, si l'on double la dimension de la goutte, la diffusion est multipliée par 64. L'écho reçu par le radar dépendra donc plus de la dimension des gouttes que de leur nombre.

La constante diélectrique de la goutte intervenant, l'écho reçu dépendra de la nature de la goutte. Suivant qu'on aura de l'eau ou de la glace on recevra cinq fois plus d'énergie dans le 1^{er} cas que dans le 2^e.

Enfin intervient la distance de l'obstacle par sa 4^e puissance, si la perturbation couvre le faisceau (obstacle large), alors qu'il s'agit de la 2^e puissance seulement dans le cas d'un obstacle quasi-punctuel (cas d'un avion).

Trois modes de représentation sont généralement utilisés : en scope A, où l'on a en abscisses la distance, en ordonnées l'amplitude de l'écho, — avec l'indicateur plan panoramique en coordonnées polaires, — et enfin dans un azimut donné où on a l'altitude en fonction de la distance.

Ceci va donc permettre : 1^o un repérage instantané des précipitations sur une très grande surface horizontalement et à toutes les altitudes et cela avec une seule station d'observation; 2^o la détermination de la marche et de la vitesse des précipitations; 3^o l'obtention d'un renseignement quantitatif sur l'intensité des précipitations.

On a obtenu des renseignements très complets sur la nature orageuse de certaines perturbations, notamment les cyclones, les typhons avec leur structure en spirale. Il est possible de déterminer leur position, leur vitesse de déplacement et la direction suivant laquelle ils se déplacent. De même, concernant le mécanisme de production de la pluie, on a pu observer la présence d'une bande brillante liée au changement d'état de l'eau. On a observé aussi la distribution

des vitesses de chute de pluie à tous les niveaux. Cette technique s'est révélée extrêmement précieuse au cours des études de pluie provoquée et même en pluviométrie une opinion actuellement admise prétend qu'avec le radar les résultats sont meilleurs qu'avec un pluviomètre pour 200 milles carrés (I).

Suivant la nature de la précipitation à étudier, on a intérêt à choisir la longueur d'onde. 10 centimètres convient très bien pour les pluies tropicales, tandis que 3 centimètres est préférable pour nos régions. Avec 1,25 cm, 47 p. 100 des nuages sont détectés, et ceci nous amène à parler de la détection de nuages.

Dans ce cas on a intérêt à aller vers des longueurs d'ondes encore plus courtes, et suivre une idée de R. BUREAU datant d'avant guerre : utiliser les ondes du domaine visible.

Le schéma représenté sur la figure 8 montre qu'il s'agit d'un véritable radar lumineux; la source d'énergie étant ici un arc dans l'air. Sa durée est de l'ordre de la micro-seconde. Le récepteur est une cellule photoélectrique et on enregistre sur l'oscillographe le temps qui s'écoule entre le départ du signal et le retour de l'écho diffusé par le nuage. Deux modèles de cet appareil ont été réalisés : l'un, relativement puissant, est intéressant pour les études de météorologie, car on perçoit assez fréquemment la première

couche de nuages et on peut voir les échos obtenus sur celles d'altitudes plus élevées; — un second modèle, d'encombrement plus réduit, est utilisé pour donner avec précision le plafond au-dessus des aérodromes. Sa portée est de 1 500 mètres, et l'altitude de la base d'un nuage est définie avec une précision de l'ordre du mètre, suivant la nature du nuage.

On a utilisé également le radar pour l'étude des mouvements de l'air. Il y a tout d'abord le problème de la détermination de la vitesse du vent. Par temps clair on utilise un ballon que l'on suit au théodolite. Par temps bouché on accroche au ballon un réflecteur et on utilise un radar pour avoir en fonction du temps la position du ballon. On a réalisé récemment en Angleterre un dispositif qui interroge les trois instruments météorologiques d'une radio-sonde (baromètre, thermomètre, hygromètre), sur 152 Mc/s, la réponse ayant lieu sur 2 850 Mc/s.

Pour des problèmes particuliers, tels que la turbulence à l'intérieur des nuages, un avion passant au-dessus laisse tomber de minces bandes d'aluminium telles que celles utilisées pendant la guerre pour les brouillages des radars. En suivant leur chute au radar il est possible d'enregistrer leurs mouvements en fonction du temps.

IV. — OCÉANOGRAPHIE

Une technique un peu analogue peut être utilisée en Océanographie pour l'étude des courants marins. Ici on a seulement deux degrés de liberté au lieu de trois, et le problème est plus simple. Le lieutenant de Vaisseau Broc a fait au musée Océanographique de Monaco une application très astucieuse du procédé. Il dispose en un lieu donné une série de flotteurs munis de réflecteurs. La seule précaution à prendre est de déterminer convenablement le profil du flotteur afin que l'action du vent ne prédomine pas

sur l'action du courant marin. On prend ainsi en fonction du temps des séries de photographies de l'écran du radar panoramique et il est facile par la suite de déterminer la vitesse du courant marin en surface. Ayant assisté à des pareilles mesures je me suis rendu compte que lorsque l'on veut repêcher les flotteurs après la fin de l'étude il est difficile de les trouver; aussi c'est du radar situé sur la côte que l'on donne au bateau par radio les indications sur la position des flotteurs.

V. — ASTRONOMIE

C'est depuis 1940 que l'on avait eu l'idée d'utiliser les radars pour obtenir des échos avec la Lune, mais il fallait pour cela une

puissance assez grande et une antenne bien dirigée. En 1945, l'U. S. Army Signal Corps a utilisé un radar fonctionnant sur 111,5

(I) Valeur approchée du mille carré = 2,59 km².

Mc/s avec des impulsions d'un millième de seconde et deux antennes associées donnant un gain de 250 par rapport au rayonnement isotrope. En portant la puissance émise à 15 kW, le 10 janvier et le 22 janvier 1946, 25 échos successifs à quatre secondes d'intervalle furent émis et, deux secondes et demie après, les échos furent reçus (fig. 9). De pareils essais ont été effectués aussi en Autriche en 1946 et en Australie en 1947. L'équipe anglaise de Jodrell Bank, travaillant sur la longueur d'onde de 4,2 m avec des impulsions de 20 millisecondes, fait des mesures systématiques. On s'est aperçu ainsi, en dehors de la possibilité de déter-

miner avec précision la distance de l'astre, de la présence du fading sur les échos de la Lune. On ne sait pas encore très bien à quelle cause il est dû. Il s'agit d'une variation du pouvoir réflecteur causé par la libration ou bien de l'ionosphère terrestre. On a songé aussi à utiliser l'effet Doppler pour une nouvelle détermination du rayon de la Terre. Enfin on envisage également l'utilisation de la Lune comme réflecteur passif afin de rendre possible les communications radio-électriques d'un point de la Terre à un autre dans le cas où la fréquence des ondes ne permet plus d'utiliser les réflexions sur l'ionosphère.

CONCLUSION

Voilà donc, sommairement esquissé un tableau de quelques applications du radar. J'espère que vous vous en irez avec une idée un peu précise des études que cette technique a permis d'effectuer dans des domaines assez divers et avec une idée quelque peu plus confuse des magnifiques possibilités que l'avenir nous réserve.

Et cela dans le domaine de l'investigation scientifique seulement. Je m'excuse auprès de certains d'entre vous de les avoir déçus en me limitant à ce domaine pourtant déjà suffisamment vaste.

Et je voudrais me permettre en outre de vous faire part de quelques réflexions que me suggère cet exposé.

Vous avez tous une idée plus ou moins exacte du matériel que représente un radar et par suite de son prix de revient. Aussi il n'y a pas en France un laboratoire universitaire dont le budget permette, même avec un étalement sur plusieurs années, l'achat d'un pareil instrument de travail et de recherche.

Je sais bien que la pauvreté des Universités françaises ne date pas d'aujourd'hui. Je me rappelle la désagréable impression laissée en 1932, peu après mon arrivée au Laboratoire de Physique de la Sorbonne, où, ayant besoin d'un moteur pour agiter un thermostat, le responsable du matériel me dit : nous n'avons pas de moteur, pas de crédits pour en acheter, mais je puis vous donner un tourne-broche que vous tournerez vous-même.

Plus grave, il n'y a guère plus d'une dizaine d'années, j'avais la charge des travaux pratiques d'électricité à la Sorbonne, et il n'a jamais été possible de mettre un oscillographe cathodique entre les mains des élèves.

Il ne faudrait pas croire cependant que les Universités anglaises peuvent toutes s'offrir des radars, bien que ce soit le cas pour des organismes comme Jodrell Bank, mais une interpénétration plus large entre les divers services de l'État et les industries permet l'utilisation de matériel provisoirement déclassé ou sans affectation. Pensez-vous que chez nous les radars existants soient en service continu et que, pour employer un terme à la mode, ils satisfassent au plein emploi?

Il faut que les barrières artificielles entre les divers services s'ouvrent de plus en plus largement, les questions de secret ne devant pas constituer des obstacles exagérément élevés.

— Que les industries également facilitent dans la mesure de leurs moyens des recherches qui un jour plus ou moins proche leur ouvriront des débouchés inattendus.

— Qu'elles songent en faisant cela non pas aux entraves que l'État impose à leur développement, mais qu'il ne serait pas question aujourd'hui de faire vivre une industrie de l'électronique s'il n'y avait eu les recherches par exemple d'un Braun, d'un Maxwell et de beaucoup d'autres de moindre renommée.

L'échange ne doit pas d'ailleurs être à sens unique et nombreux sont les universitaires qui, au risque d'être jugés sévèrement

par leurs collègues à l'esprit rétrograde, n'hésitent pas à venir là où s'élabore la physique qu'il n'est plus possible de faire avec des nicols ou de la cire molle. Et il est juste que si l'un apporte son matériel et ses moyens, l'autre apporte ses connaissances et son esprit créateur.

Mais je m'arrête là, car j'ai l'impression de prêcher des convertis et nous savons tous que la Société d'Encouragement à l'Industrie Nationale ne ménage pas les siens propres pour favoriser les progrès de la science et de l'industrie, indissolublement liés les uns aux autres.

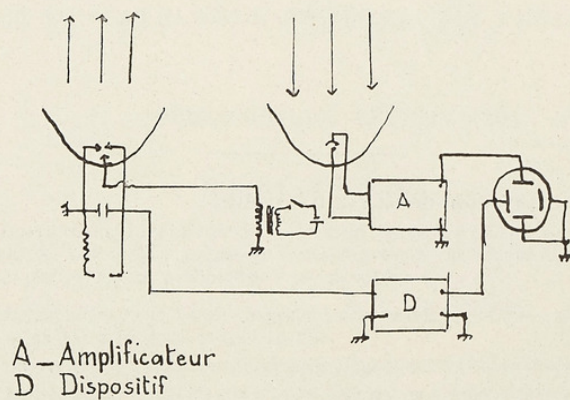


Fig. 8.

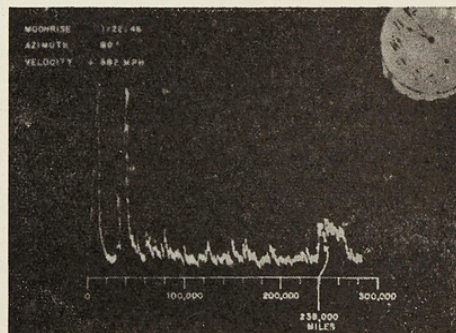


Fig. 9.

Le Président de la Société, Directeur Gérant : G. DARRIEUS.

D. P. n° 1080.

Imprimé en France par Brodard-Taupin, Imprimeur-Relieur, Coulommiers-Paris. — 7-1955.

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

EXTRAIT DU CATALOGUE GÉNÉRAL DES PUBLICATIONS

I. — PUBLICATIONS PÉRIODIQUES

Bulletin analytique

Le Centre de Documentation du Centre National de la Recherche Scientifique publie un « Bulletin Analytique » dans lequel sont signalés par de courts extraits classés par matières tous les travaux scientifiques, techniques et philosophiques, publiés dans le monde entier.

Cette revue bibliographique, l'une des plus importantes du monde puisqu'elle a signalé, en 1953, environ 120 000 articles et mémoires, est scindée en trois parties :

- la première (mensuelle) est consacrée aux sciences physiques, chimiques et aux techniques connexes;
- la seconde (mensuelle) est consacrée aux sciences biologiques, à l'agriculture et aux industries alimentaires;
- la troisième (trimestrielle) est consacrée à la philosophie.

Des tirages à part sont mis, en outre, à la disposition des spécialistes.

Le Centre de Documentation du C. N. R. S. fournit également la reproduction sur microfilm ou sur papier des articles signalés dans le « Bulletin Analytique » ou des articles dont la référence bibliographique précise lui est fournie.

Ainsi expérimentateurs, ingénieurs et techniciens bénéficient, sans quitter leur laboratoire ou leur bureau, d'une documentation abondante et rapide.

ABONNEMENTS ANNUELS (y compris table générale des auteurs)

	FRANCE	ÉTRANGER
	<i>Prix de l'abonnement.</i>	
1 ^{re} Partie (mensuelle)		
Mathématiques, Astronomie, Physique, Chimie, Sciences de l'Ingénieur, Sciences de la Terre	6 000 F	7 000 F
2 ^e Partie (mensuelle)		
Sciences biologiques, Industries alimentaires, Agriculture.	6 000 F	7 000 F
3 ^e Partie (trimestrielle)		
Philosophie	2 500 F	3 000 F

TIRAGES A PART

	FRANCE	ÉTRANGER
1 ^{re} Partie.	<i>Prix de l'abonnement.</i>	
SECTION I. — Mathématiques pures et appliquées. — Mécanique. — Physique mathématique	1 050 F	1 300 F
SECTION II. — Astronomie et Astrophysique. — Physique du Globe	1 350 F	1 600 F
SECTION III. — Généralités sur la Physique. — Acoustique. — Optique. — Thermodynamique et Chaleur. — Électricité et Magnétisme.	1 800 F	2 000 F
SECTION IV. — Physique corpusculaire. — Structure de la matière	900 F	1 150 F
SECTION V. — Chimie générale et Chimie physique.	900 F	1 150 F
SECTION VI. — Chimie minérale. — Chimie organique. — Chimie appliquée. — Métallurgie	3 300 F	3 675 F
SECTION VII. — Sciences de l'Ingénieur	2 250 F	2 500 F
SECTION VIII. — Minéralogie. — Pétrographie. — Géologie. — Paléontologie.	1 050 F	1 300 F
2 ^e Partie.		
SECTION IX. — Biochimie. — Biophysique. — Sciences pharmacologiques. — Toxicologie	1 800 F	2 000 F
SECTION X. — Microbiologie. — Virus et bactériophages. — Immunologie .	1 200 F	1 325 F
SECTION XI. — Biologie animale. — Génétique. — Biologie Végétale . . .	3 300 F	3 675 F
SECTION XII. — Agriculture. — Phytatrie et Phytopharmacie. — Aliments et industries alimentaires	1 050 F	1 300 F
3 ^e Partie.		
Sociologie	1 000 F	1 200 F
N. B. — Les abonnés aux TIRAGES A PART de la première ou deuxième partie du Bulletin Analytique peuvent recevoir la TABLE GÉNÉRALE DES AUTEURS aux conditions suivantes :		
Première partie	600 F	700 F
Deuxième partie	600 F	700 F

Abonnement au Centre de documentation du C. N. R. S.
16, rue Pierre-Curie, PARIS (5^e).
C. C. P. PARIS 9131-62. — Tél. : DANTON 87-20.

C^{ie} DE FIVES-LILLE

POUR CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES ET ENTREPRISES

S. A. Capital 1.500.000.000 de Frs

7, Rue Montalivet, PARIS-8^e

Tél. : Anj. 22-01 et 32-40.

CONSTRUCTIONS
MÉCANIQUES
MÉTALLIQUES
ÉLECTRIQUES



COMPAGNIE INDUSTRIELLE
DES PILES ÉLECTRIQUES

CIPEL

Société Anonyme au Capital de 345.000.000 de Francs.

98 ter, Bld Heloise, ARGENTEUIL (S.-&-O.).

Piles " AD "

à grande capacité
pour SIGNALISATION
TÉLÉPHONES
TÉLÉGRAPHES.
etc...

Piles " MAZDA "

ÉCLAIRAGE PORTATIF
AMPOULES
BATTERIES
BOITIERS
RADIO

ANCIENS ÉTABLISSEMENTS EIFFEL

Constructions métalliques - Ponts et Charpentes
Entreprises Générales
Section Chaudronnerie (LEROUX et GATINOIS)
Chaudières, Réservoirs, Matériel routier
(Épandage, Stockage des Liants)



SIÈGE SOCIAL ET BUREAUX :

23, rue Dumont-d'Urville, PARIS 16^e

USINE :

7, rue du Parc, BLANC-MESNIL.

Compagnie Générale de GÉOPHYSIQUE



Application des procédés tellurique,
électriques, sismiques, gravimétrique
aux recherches pétrolières, minières,
travaux de Génie Civil.

50, rue Fabert, PARIS (7^e)

Téléphone : INVALIDES 46-24

MAISON BREGUET

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL 465.600.000 FR.
15, avenue d'Eylau - PARIS 16° - Tél. : KLÉBER 48-10

CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES ET MÉCANIQUES

GROUPES ÉLECTROGÈNES COMPLETS
TURBINES A VAPEUR — RÉDUCTEURS ASISMIQUES
MACHINES ÉLECTRIQUES - APPAREILLAGE
POMPES CENTRIFUGES - CONDENSATION
APPAREILS DE LEVAGE - PROJECTEURS

ÉCRIRE ET DESSINER "*avec le sourire !*"

M. GILBERT

CRITÉRIUM
Sergent-major
GILBERT
BLANZY-POURE

TRADITION DE QUALITÉ DEPUIS 1836



d'après
J. JACQUELIN

Société Générale d'Entreprises

Société Anonyme au Capital de 1.808.000.000 de francs

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

Registre du Commerce Seine 54 B 4990

ENTREPRISES GÉNÉRALES en FRANCE, dans L'UNION FRANÇAISE et à L'ÉTRANGER

CONSTRUCTION ET ÉQUIPEMENT D'USINES HYDROÉLECTRIQUES
ET DE CENTRALES THERMIQUES

USINES, ATELIERS ET BATIMENTS INDUSTRIELS

RÉSEAUX DE TRANSPORT D'ÉNERGIE A HAUTE TENSION

ÉLECTRIFICATION DE CHEMINS DE FER ET TRAMWAYS - ÉLECTROBUS

RÉSEAUX D'ÉLECTRIFICATION RURALE

CITÉS OUVRIÈRES - ÉDIFICES PUBLICS ET PARTICULIERS

TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

ASSAINISSEMENT DES VILLES - ADDUCTIONS D'EAU

AÉROPORTS - OUVRAGES D'ART

ROUTES - CHEMINS DE FER - TRAMWAYS

E N T R E P R I S E S

BOUSSIRON

10, Boulevard des Batignolles, PARIS-17^e.

ALGER - CASABLANCA - TUNIS

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

BÉTON ARMÉ

TRAVAUX PUBLICS

CONSTRUCTIONS INDUSTRIELLES

Compagnie Française de Raffinage

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 8.400.000.000 DE FR.S.

R. C. Seine n° 54 B 3492

SIÈGE SOCIAL : 11, rue du Docteur-Lancereaux, PARIS (8°)

RAFFINERIE DE NORMANDIE

à GONFREVILLE-L'ORCHER (Seine-Maritime)

RAFFINERIE DE PROVENCE

à MARTIGUES (Bouches-du-Rhône)

Société des Aciéries de **POMPEY**

61, rue de Monceau, PARIS (8°) — Tél. : LAB. 97-10 (10 lignes)

USINES : { POMPEY et DIEULOUARD (M.-et-M.)
 MANOIR (EURE) — LORETTE (LOIRE)
 CORMELLES-LE-ROYAL (CALVADOS)

ACIERS THOMAS, MARTIN et ÉLECTRIQUE
ACIERS FINS AU CARBONE et ACIERS ALLIÉS
ACIERS RÉSISTANT A LA CORROSION (acide et saline)
ACIERS MOULÉS A HAUTE TENEUR EN ÉLÉMENTS NOBLES
ACIERS FORGÉS (brides, pièces de robinetterie, pièces diverses)
ACIERS ÉTIRÉS et COMPRIMÉS
FONTES HÉMATITES — SPIEGEL — FERRO-MANGANÈSE

Tous Aciers de Construction et d'Outillage

APPAREILS DE LABORATOIRE
ET MACHINES INDUSTRIELLES

P. CHEVENARD

- pour l'analyse dilatométrique et thermomagnétique des matériaux;
- pour l'essai mécanique et micromécanique des métaux à froid et à chaud;
Essais de traction, de flexion, de compression, de dureté;
Essais de fluage (Traction-Relaxation) et de rupture;
Essais de torsion alternée;
Étude du frottement interne;
- pour l'étude des réactions chimiques par la méthode de la pesée continue;
- pour la mesure des températures et le réglage thermostatique des fours.



A. D. A. M. E. L.
4-6, Passage Louis-Philippe
PARIS (11^e)

L'AIR LIQUIDE

SOCIÉTÉ ANONYME

Téléph. :
INV. 44-30 à 38

75, Quai d'Orsay - PARIS (7^e)

Télégr. :
AIRLIQUID-PARIS

Ses DIVISIONS & FILIALES exploitent 173 usines DANS LE MONDE

OXYGÈNE
AIR - AZOTE

COMPRIMÉS ET LIQUIDES



ARGON

GAZ RARES EXTRAITS DE L'AIR



ACÉTYLÈNE DISSOUS

INSTALLATIONS de PRODUCTION
DES GAZ CI-CONTRE
ET DE **SÉPARATION** DE TOUS
MÉLANGES GAZEUX PAR **LIQUÉFACTION**



RÉCIPIENTS POUR LE
TRANSPORT ET L'UTILISATION
D'OXYGÈNE ET D'AZOTE LIQUIDES



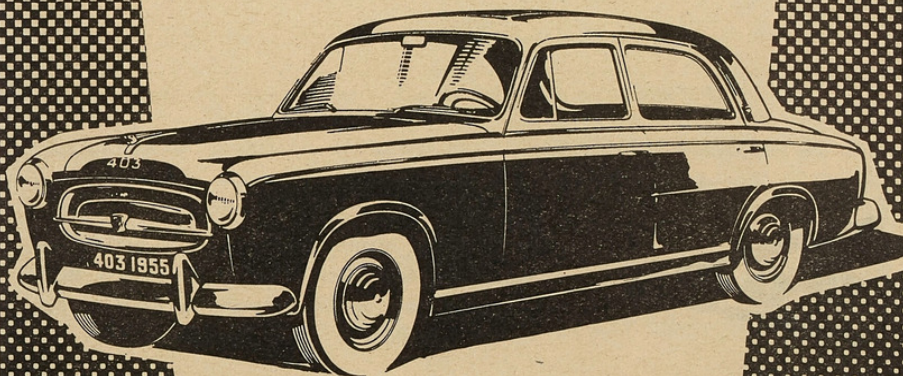
MATÉRIEL

POUR

SOUDAGE, TREMPÉ, OXYCOUPAGE, etc...

Consultez son « **SERVICE APPLICATIONS** » pour tous travaux de
Soudage, Oxycoupage, Décapage, Décricuage, Trempe superficielle au chalumeau
Emmanchement par contraction, Soudage en atmosphère d'Argon, Découpage à
la poudre, etc..., etc...

Dès son apparition
la **403**
remporte
un succès éclatant



*Vous pouvez demander
un essai dès maintenant
au Concessionnaire*

Peugeot

SOCIETE CHIMIQUE de la GRANDE PAROISSE

AZOTE ET PRODUITS CHIMIQUES

SOCIETE ANONYME AU CAPITAL DE 933.185.000 FRANCS

SIEGE SOCIAL: 8, rue Cognacq-Jay - PARIS (VII^e) ♦ Tél.: INV. 44.30 à 44.38

R. C. Seine n° 43.092

Adr. Télégr.: GRANPARG-PARIS

R. P. C. A. Ouest n° 102

INSTALLATIONS D'USINES:

SYNTHÈSE DE L'AMMONIAQUE (Procédé Georges Claude) ENGRAIS AZOTES

SYNTHÈSE DE L'ALCOOL METHYLIQUE

DISTILLATION A BASSE TEMPERATURE (des schistes, lignites, etc.)

HYDROGENE PAR CRACKING ET CONVERSION DES HYDROCARBURES

RECUIT BRILLANT (Licence I. C. I.)

CRISTALLISATION DES SELS (Licence Krystal)

PRODUITS FABRIQUES:

AMMONIAC ANHYDRE

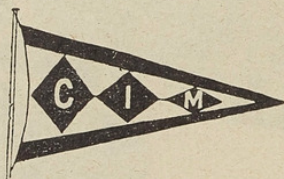
—:—:

ALCALI A TOUS DEGRES

—:—:

ENGRAIS AZOTES

USINES OU ATELIERS: GRAND-QUEVILLY (Seine-Inférieure) - WAZIERS (Nord) - FRAIS MARAIS (Nord) - PARIS, 25, rue Vicq d'Azir - AUBERVILLIERS (Seine), 65, rue du Landy



La C. I. M. assure au Havre la réception des hydrocarbures à destination de la Région Parisienne et plus particulièrement la desserte des Raffineries de la Basse-Seine.

Bassins accessibles aux plus grands navires pétroliers avec stockage disponible de 300.000 m³

Distribution assurée dans la Région Parisienne par un dépôt spécialisé à Gennevilliers (40.000 m³)

COMPAGNIE INDUSTRIELLE MARITIME

Concessionnaire du Port Autonome du Havre

36, rue de Liège

PARIS (VIII^e)

EUROPE 44-30

PROGIL

Société Anonyme au Capital de 1.200.000.000 de Francs

79, Rue de MIROMESNIL, PARIS 8^e. Tél. Laborde 91-60

PRODUITS CHIMIQUES

CHLORE ET DÉRIVÉS - SOUDE - SOLVANTS CHLORÉS, HYDROGÉNÉS ET DESHYDROGÉNÉS - HUILES DIÉLECTRIQUES "PYRALÈNES" - SULFURE DE CARBONE - PHOSPHATES DE SOUDE MONO, DI ET TRISODIQUE - PYRO ET POLYPHOSPHATES - SILICATES DE SOUDE ET DE POTASSE - MÉTASILICATES - PARADICHLOROBENZÈNE - OXYDE D'ÉTAIN - CHLORURES D'ÉTAIN ET DE ZINC - ACÉTATE DE PLOMB - ACIDES OXALIQUE ET FORMIQUE - FLUIDES DE CHAUFFAGE "GILOTHERM".

CRYPTOGILS ET XYLOPHÈNES POUR LA PROTECTION DES BOIS

LUTTE CONTRE L'ÉCHAUFFURE, LES PIQURES D'INSECTES, LA MERULE ET LE BLEUISSEMENT DES RÉSINEUX

SPÉCIALITÉS POUR LE NETTOYAGE DU MATÉRIEL LAITIER ET DE LA VERRERIE

"PROGICLAIRS" ORDINAIRES ET ANTISEPTIQUES

SPÉCIALITÉS POUR TEXTILE ET TANNERIE

ADJUVANTS POUR TEINTURE, IMPRESSION ET BLANCHIMENT - SPÉCIALITÉS "GILTEX" - TANINS VÉGÉTAUX ET SYNTHÉTIQUES - HÉMATINES - TITANOR - "CRYPTOTAN"

PAPETERIE

CELLULOSE DE CHATAIGNIER BLANCHIE - PAPIERS D'IMPRESSION ET D'ÉCRITURE

Ingénieurs spécialisés et Laboratoires à la disposition de toutes industries.

Notices sur demande adressée à PROGIL, 79, rue de Miromesnil, PARIS 8^e

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

ACIERS
PRODUITS CHIMIQUES
ALUMINIUM
MAGNÉSIUM
FERRO-ALLIAGES
ÉTAIN

SIÈGE SOCIAL : 10, RUE DU GÉNÉRAL-FOY - PARIS (8^e)

TÉLÉPHONE : EUROPE 31-00

ADRESSE TÉLÉGRAPHIQUE : TROCHIM-PARIS

LE VIDE

LES RAYONS X

LA HAUTE TENSION

au Laboratoire

à l'Atelier



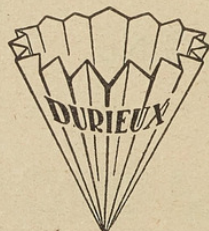
COMPAGNIE GÉNÉRALE DE RADIOLOGIE

DÉPARTEMENT INDUSTRIEL

34, BOULEVARD DE VAUGIRARD — PARIS-XV^e

SUF. 50-04

LES FILTRES DURIEUX



PAPIER A FILTRER

En disques, en filtres plissés, en feuilles 52x52

SPÉCIALITÉS :

FILTRES SANS CENDRES

N^{os} 111, 112 et Crêpé N^o 113 extra-rapide

Filtres Durcis n^o 128 & Durcis sans cendres n^o 114

Cartouches pour extracteurs de tous systèmes

PAPIER " CRÊPÉ DURIEUX "

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

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

Téléphone : ARCHIVES 03-51

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

18, rue Pavée, PARIS (4^e)

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



ETABLISSEMENTS
KUHLMANN

SOCIÉTÉ ANONYME au CAPITAL de 6.100.000.000 de FRS

Siège Social : 11, rue de La Baume, PARIS (8°)



PRODUITS CHIMIQUES

DÉRIVÉS DU SOUFRE - DÉRIVÉS DU CHLORE - PRODUITS
AZOTÉS - DÉRIVÉS DU BARYUM - DÉRIVÉS DU BROME
DÉRIVÉS DU CHROME - DÉRIVÉS DU COBALT - DÉRIVÉS
DU NICKEL - DÉRIVÉS DU CERIUM - DÉRIVÉS DU PHOS-
PHORE - LESSIVES - SILICATES - DÉRIVÉS DE L'ÉTHYLÈNE
DÉRIVÉS DU PROPYLÈNE - ALCOOLS DE SYNTHÈSE
HYDROCARBURES DE SYNTHÈSE



PRODUITS POUR L'AGRICULTURE

ENGRAIS PHOSPHATÉS - ENGRAIS AZOTÉS - ENGRAIS
COMPLEXES - PRODUITS INSECTICIDES ET ANTICRYPTO-
GAMIQUES - PRODUITS POUR L'ALIMENTATION DU
BÉTAIL - AMENDEMENTS - HERBICIDES - DÉSINFECTANTS



PRODUITS CHIMIQUES ORGANIQUES

RÉSINES SYNTHÉTIQUES - COLLES SYNTHÉTIQUES
MATIÈRES PLASTIQUES - TANINS SYNTHÉTIQUES
PRODUITS INTERMÉDIAIRES - PRODUITS AUXILIAIRES
INDUSTRIELS - PRODUITS R. A. L.



TEXTILES CHIMIQUES

RAYONNE VISCOSE - FIBRANNE VISCOSE - CRINODOZ

COMPAGNIE FRANÇAISE THOMSON-HOUSTON

Société Anonyme au Capital de 4.975.200.000 Francs

SIÈGE SOCIAL : 173, BOULEVARD HAUSSMANN, PARIS-VIII'

R. C. Seine 54 B 8973

TELEPHONE : ÉLYSÉES 83-70

Télégr. Elixu 42 Paris

RADIODIFFUSION

RADIOCOMMUNICATIONS - TÉLÉVISION

HAUTE FRÉQUENCE INDUSTRIELLE

TOUTES LES APPLICATIONS DU RADAR
ET DES HYPERFRÉQUENCES

TUBES ÉLECTRONIQUES - SEMI-CONDUCTEURS

TUBES HYPERFRÉQUENCES

RÉCEPTEURS DE T.S.F. ET DE TÉLÉVISION,

ÉLECTROPHONES, DISQUES

"DUCRETET-THOMSON"

CHAUFFAGE ET CUISINE DOMESTIQUES

APPAREILS MÉNAGERS

RASOIRS ÉLECTRIQUES

APPAREILLAGE - TUBES ISOLATEURS

RÉFRIGÉRATEURS ÉLECTRIQUES



TOUTES VARIÉTÉS DE CABLES ET FILS ÉLECTRIQUES

CUIVRE, ALUMINIUM, ALMELEC EN FILS, CABLES, MÉPLATS

FILS ET MÉPLATS ÉMAILLÉS - FILS GUIPÉS POUR BOBINAGE

CABLES SPÉCIAUX INCOMBUSTIBLES - CABLES COAXIAUX