

Copy 2

30^e ANNÉE N° 283

OCTOBRE 1950

PRIX: 160 FRANCS

L'ONDE

ÉLECTRIQUE

BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ DES RADIOÉLECTRICIENS
ÉDITIONS CHIRON, 40, RUE DE SEINE, PARIS-6^e

National Bureau of Standards
Library, N. W. Bldg.
NOV 1 1950



NOTRE COUVERTURE

Klystron rétro-modulateur local ou
générateur de laboratoire
Gamme: 3 cm, de la C. F. T. II.

LIRE DANS CE NUMÉRO

La vie et l'œuvre de HEAVISIDE;
Allocutions prononcées par le Prince Louis de Broglie
et Messieurs L. Pissati, Appellon, W. Jackson,
P. Humbert, S. Calvete, P. M. Prache, L. Bouthillier,
à l'occasion de la commémoration
du centenaire de sa naissance.
Les ondes centimétriques et la structure moléculaire.
R. Freymann
Méthodes et appareils d'essai pour le dével-
opement des klystrons basse tension, 3 cm
R. Musson-Genon - J. Chantreau - R. Métivier
Les échos radioélectriques autour de la terre.
A.-H. de Voost
Théorie des servomécanismes à relais
J.-R. Dutilh

Emporter

DANS VOTRE POCHE...



tout... UN LABORATOIRE

avec...



CONTROLEUR 470 C

83 SENSIBILITÉS — Mesure des courants et tensions cont. (5.000 ohms par V.) et alt. (1500 ohms par V.) sur les gammes de 1-3-10-30-100-300-1.000 V. et mA, 1-3 et 10 A.
CAPACIMÈTRE : 3 G. de 0.001 à 20 μ F.
OHMMÈTRE : 4 G. de 0 à 2 M Ω . DECIBELMÈTRE : 7 G. de -15 à 55 db. GALVANOMÈTRE de PRÉCISION 100 μ A.



CONTROLEUR 476

à sécurité totale par relais et dispositifs spéciaux de protection (2 brucets) — 45 sensibilités — 10.000 ohms par volt. — 9 G. en C. cont. 7 G. en tens. cont. 6 G. en c. alt. 8 G. en tens. alt. 4 G. en Décibels. 4 G. en Output. 4 G. de Résist. 3 G. de Capacités. Galvanomètre de 100 μ A.

● LE CONTROLEUR DE POCHE 450 à ohmmètre incorporé

NOUVEAU, PRÉCIS, ROBUSTE ET BON MARCHÉ !

C'est l'outil idéal pour le dépannage et les mesures radioélectriques : il comporte

18 SENSIBILITÉS

Résistance interne : 2.000 ohms par volt. — Tensions : 4 sensibilités cont. et 4 alt. de 0 à 750 V. — Intensités : 4 sensibilités cont. et 4 alt. de 0 à 1,5 A. — Ohmmètre : 2 sensibilités de 0 à 1 M Ω . Livré avec accessoires.

● LE CONTROLEUR DE POCHE 451

Pour l'Electricité industrielle à 19 sensibilités

Résistance interne 400 ohms par volt. TENSIONS : 4 sens. cont. et alt. de 0 à 750 V. INTENSITÉS : 4 sens. cont. et alt. de 0 à 15 A. OHMMÈTRE : 1 sens. de 0 à 5.000 Ω . Prise pour shunts extérieurs jusqu'à 750 A. Pince transformateur. Livré en mallette avec accessoires.

● TOUS RENSEIGNEMENTS sur notre gamme de contrôleurs et documentation complète sur nos nombreuses fabrications O. E. R. 1.050 sur demande, à la

COMPAGNIE GÉNÉRALE DE METROLOGIE

S. A. R. L. AU
CAPITAL DE
6.500.000 frs
TÉLÉPH. 8-61
Téleg. MÉTRIX



SIÈGE SOCIAL
CHEMIN DE LA
CROIX-ROUGE
ANNECY
(Haute-Savoie)

AGENT PARIS, Seine, S.-et-O. : R. MANÇAIS, 15, F. Montmartre, PARIS (9^e) - Tél. PRO 79-00
Agences : STRASBOURG, M. Bismuth, 15, pl. des Halles — LILLE, M. Collette, 81, r. des Postes — LYON, D. Auriol, 8, cours Lafayette — TOULOUSE, Taleyrac, 10, rue Alexandre-Cabanel — CAEN, A. Liais, 66, rue Bicoquet — MONTPELLIER, M. Alonso, 32, cité Industrielle — MARSEILLE, Ets Musetta, 3, rue Nau — NANTES, porte 10, allée Duquesne — TUNIS, Timsit, 3, rue Annibal — ALGER, M. Roujas, 10, r. de Rovigo — BEYROUTH, M. Anis E, Kehdi, 9, av. des Français

Haute fidélité et puissance!



DE
40 à 16.000
PÉRIODES
VOICI
NOTRE DEUXIÈME
MODÈLE
" **EXPONENTIEL** "
X.F. 51

Puissance admissible 12 watts
Puissance modulée sans
distorsion à 400 pps : 6 watts



MODÈLE

X.F. 50

Puissance admissible 6 watts
Puissance modulée sans
distorsion à 400 pps : 3 watts

Ces modèles sont équipés
de transformateurs spéciaux
DE TRÈS HAUTE QUALITÉ
à enroulements symétriques
dans le cas de push-pull



SEM

Ag. PUBLÉDITEC-DOMENACH

HAUT-PARLEURS ET MICROPHONES - 26 RUE DE LAGNY PARIS XX^e - TÉL. DOR. 43-81
DÉPENSEZ À NOS MODÈLES COURANTS DE 6 À 28 cm. DONT LA QUALITÉ FAIT LA FIDÉLITÉ DE NOS CLIENTS

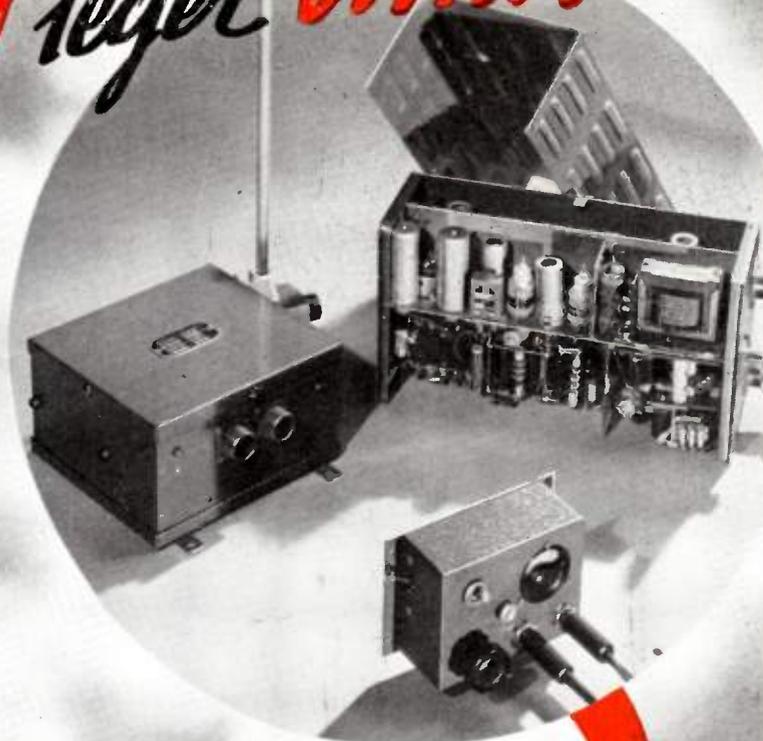
Agence exclusive de la Publicité de l'Onde Electrique : Agence-Publéditec-Domenach, 21, Rue des Jeuneurs, PARIS-2^e, Tél. CENTRAL 97-63



Équipement léger V.H.F.

★ **ÉMETTEUR-RÉCEPTEUR
A MODULATION
D'AMPLITUDE P. H. F.**
3 watts. Poids de l'émet-
teur-récepteur 3 kgs. 500.
Sensibilité récepteur :
2 microvolts.

★ **ÉMETTEUR-RÉCEPTEUR
A MODULATION
DE FRÉQUENCE P.H.F.**
5 watts. Poids de l'émet-
teur-récepteur 3 kgs 500.
Sensibilité récepteur :
2 microvolts.

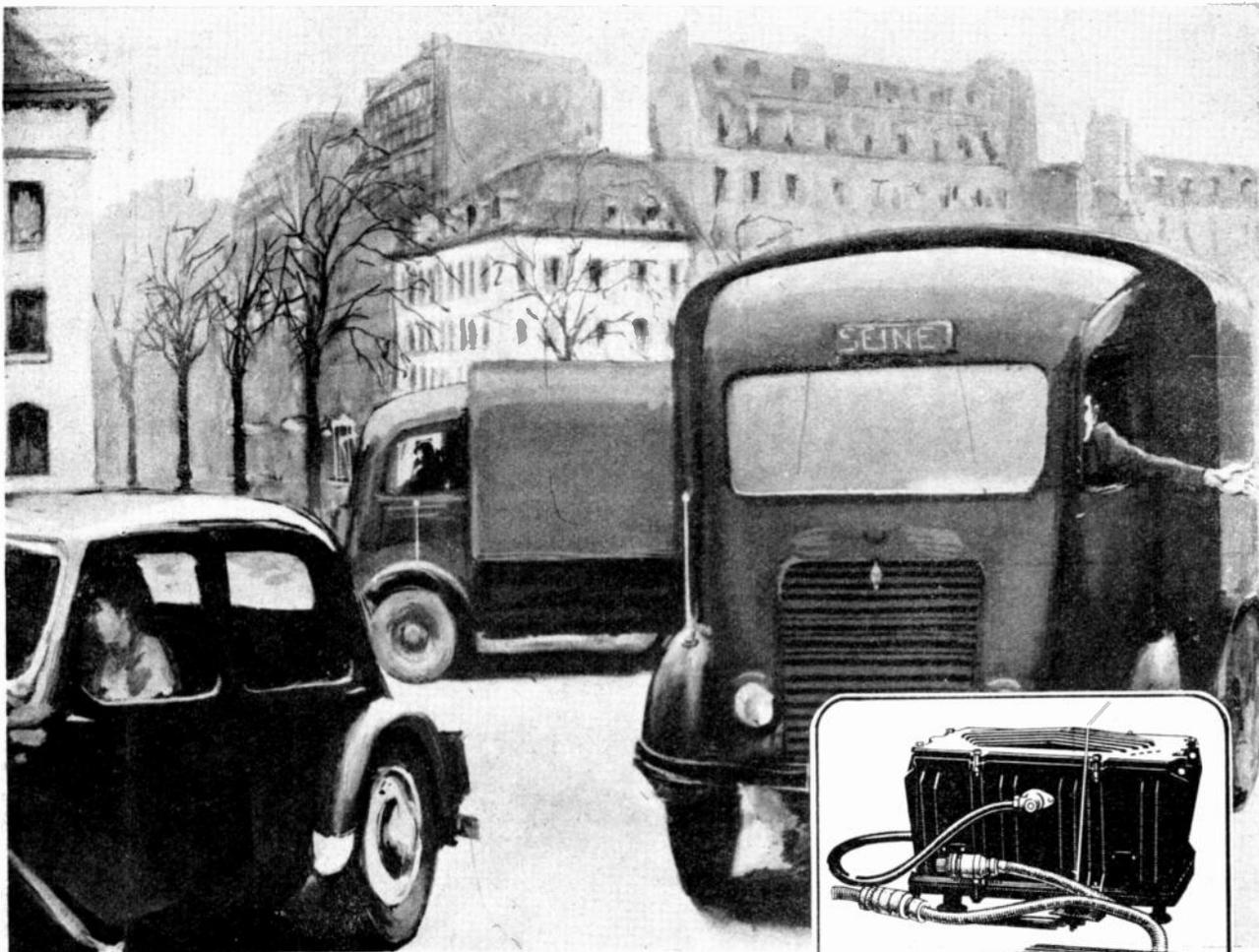


SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'ÉQUIPEMENTS POUR LA NAVIGATION AÉRIENNE
25 à 29, RUE DU PONT - NEUILLY-SUR-SEINE - + MAI. 49-35

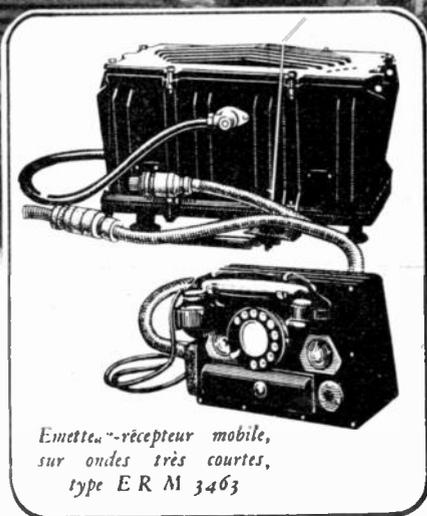
Autres fabrications : Alimentation stabilisée - Télémessures par Radio de 1 à 6 voies - Télécommandes - Téléasservissements - Récepteur panoramique de 400 Kc. s de bande passante - Interrogateur-répondeur - Hyperfréquences - Toutes études d'équipement aéronautique en pilotage automatique et en Radio.

AGENCE PUBLÉDITEC-DOMENACH

Régisseur exclusif de la Publicité de l'Onde Electrique : Agence-Publéditec-Domenach, 21, Rue des Jeuneurs, PARIS-2^e, Tél. CENTral 97-63



De votre bureau
SUIVEZ vos camions...



*Émetteur-récepteur mobile,
 sur ondes très courtes,
 type E R M 3463*

CONSULTEZ-NOUS

**sur nos autres
 fabrications.**

Téléphonie automatique • Redresseurs • Dispatching • Émetteurs radio • Radiogoniomètres • Récepteurs de Radiodiffusion • Liaisons radio multivoies • Public Address • Équipements de Studio • Microphones, etc...

Un chargement imprévu à prendre, une livraison immédiate à faire, un itinéraire à modifier sur le champ... un camion qui réclame du secours ou un dépannage d'urgence... autant de contacts que vous pouvez établir de *votre bureau* avec vos chauffeurs *au cours de leurs tournées* si vos camions sont équipés avec les émetteurs-récepteurs mobiles L. M. T.

Ils se placent facilement sur toutes les carrosseries, assurent toutes vos communications avec régularité, rapidité et économie, évitent les temps morts, le kilométrage "à vide"... et vous aident à réduire vos frais généraux.

L.M.T.

Le Matériel Téléphonique

BOULOGNE-BILLANCOURT (SEINE)





Département Industriel S.I.F.
de la Compagnie Générale de T.S.F.
168, Boul^d Gabriel-Péri, Malakoff (Seine)

**RÉCEPTEUR
STABILIDYNE**

GAMME: 2-30 Mc/s

Seul appareil permettant l'affichage de la fréquence, l'écoute en veille calée avec variation continue de la fréquence stabilisée par un seul quartz

Indicateur des harmoniques

Compteur des unités kc/s

Compteur des centaines kc/s

Indicateur d'accord



Réglage d'accord

Commutateur de sous-gammes

Ag. PUBLÉDITEC-DOMENACH

PUBL. RAPPY

VEDOVELLI

*La grande marque
française de renommée
mondiale*



**TRANSFORMATEURS
D'ALIMENTATION**

**SELS INDUCTANCE
TRANSFOS B. F.**

Tous modèles pour
RADIO-RÉCEPTEURS
AMPLIFICATEURS
TÉLÉVISION

Matériel pour applications
professionnelles
Transformos pour tubes fluorescents
Transformos H.T. et B.T.
pour toutes applications industrielles
jusqu'à 200 KVA

Documentation sur demande

ETS VEDOVELLI, ROUSSEAU & C^{IE}
5, Rue JEAN-MACÉ, Suresnes (SEINE) - LON. 14-47, 48 & 50

**2 MICROPHONES
de grande classe**



DEPUIS
25 ANNÉES
*La Radiodiffusion
Française*
LES UTILISE

TYPES

42-B A-RUBAN
75-A DYNAMIQUE

MELODIUM

296, RUE LECOURBE - PARIS-15^e - LEC. (50-80 3-1.)

3

PRODUCTIONS
INDISPENSABLES A L'INDUSTRIE FRANÇAISE

PRODUCTIONS
L.M.T.

STABILOVOLTS

TUBES A GAZ
STABILISATEURS
DE TENSION

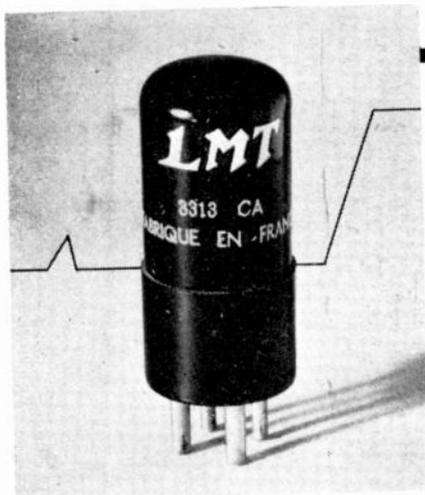
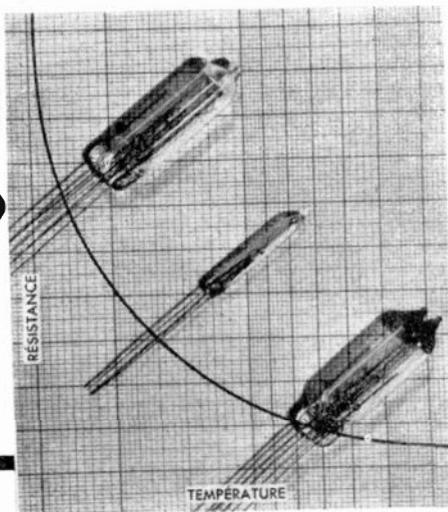


300 V	}	40 & 80 mA
280 V		
260 V		
150 V	}	200 mA
85 V		
75 V		
70 V		

THERMISTORS

RÉSISTANCES A COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE NÉGATIF

- SOUS VIDE
- SOUS ATMOSPHERE GAZEUSE
(CHAUFFAGE DIRECT OU INDIRECT)
- AGGLOMÉRÉS



UNE IMPULSION
DE 10 P A
CONTROLE
UN COURANT
DE 10mA

TUBES RELAIS

A GAZ

**CONSULTEZ-NOUS
SUR NOS AUTRES FABRICATIONS**

Téléphonie automatique - Redresseurs - Dis-
patching - Émetteurs radio - Radiogoniomètres
Récepteurs de radiodiffusion - Liaisons radio
multivoies - Public-address - Équipements de
studios, microphones, tubes à vide et à gaz, etc...

L.M.T.



Le Matériel Téléphonique

BOULOGNE BILLANCOURT (SEINE)

SERVICE COMMERCIAL TUBES A VIDE

46, Avenue de Breteuil, PARIS 7^e - SÉG. 90-04

C?

LE

MATÉRIEL DE QUALITÉ N°29

Spécialisé

DEPUIS 1928

DANS

LE MATÉRIEL

B.F.

TOUTES PIÈCES DÉTACHÉES
TOUS APPAREILS de MESURES
TOUTES INSTALLATIONS
MATÉRIEL
DE RADIODIFFUSION
FILTRES ÉLECTRIQUES
ÉTUDES — RECHERCHES
CONSTRUCTIONS

LABORATOIRE INDUSTRIEL
D'ÉLECTRICITÉ

41, r. Émile-Zola, MONTREUIL-S.-BOIS
TÉL. : AVR. 39-20 †

L'ONDE ÉLECTRIQUE

Revue Mensuelle publiée par la Société des Radioélectriciens
avec le concours du Centre National de la Recherche Scientifique

BONNEMENT D'UN AN
FRANCE 1650 »
ÉTRANGER 1950 »

ÉDITIONS CHIRON
40, Rue de Seine — PARIS (6^e)
C. C. P. PARIS 53-35

Prix du Numéro :
160 francs

Vol. XXX

OCTOBRE 1950

Numéro 283

SOMMAIRE

	Pages
La vie et l'œuvre de HEAVISIDE : Allocutions prononcées par le Prince Louis de BROGLIE et Messieurs E. PICAULT, Ed. APPLETON, W. JACKSON, P. HUMBERT, S. COLOMBO, P.-M. PRACHE L. BOUTHILLON, à l'occasion de la commémoration du centenaire de sa naissance.....	394
Les ondes centimétriques et la structure moléculaire	R. FREYMANN 416
Méthodes et appareillages d'essais pour le développement des klystrons basse tension, 3 cm.....	R. MUSSON-GENON J. CHANTREAU R. MÉTIVIER 425
Les échos radioélectriques autour de la terre.....	A.-H. de VOOGT 433
Théorie des servomécanismes à relais	J.-R. DUTILH 438
<i>Sur la couverture :</i>	
Klystron réflex-oscillateur local ou générateur de laboratoire. Gamme : 3 cm. de la C. F. T. H.	

Les opinions émises dans les articles ou comptes-rendus publiés dans L'Onde Électrique n'engagent que leurs auteurs.

SOCIÉTÉ DES RADIOÉLECTRICIENS

FONDATEURS

† Général FERRIÉ, Membre de l'Institut.

† H. ABRAHAM, Professeur à la Sorbonne.
† A. BLONDEL, Membre de l'Institut.
P. BRENOT, Directeur à la Cie Générale de T. S. F.
J. CORNU, Chef de bataillon du Génie e. r.

† A. PÉROT, Professeur à l'Ecole Polytechnique.
† J. PARAF, Directeur de la Sté des Forces Motrices de la Vienne.
La Société des Ingénieurs Coloniaux.

BUTS ET AVANTAGES OFFERTS

La Société des Radioélectriciens, fondée en 1921 sous le titre « Société des Amis de la T.S.F. », a pour buts (art. 1 des statuts) :

1^o De contribuer à l'avancement de la Radiotélégraphie théorique et appliquée, ainsi qu'à celui des Sciences et Industries qui s'y rattachent ;

2^o D'établir et d'entretenir entre ses membres des relations suivies et des liens de solidarité.

Les avantages qu'elle offre à ses membres sont les suivants :

1^o Service gratuit de la revue mensuelle *L'Onde Électrique* ;

2^o Réunions mensuelles, avec conférences, discussions et expériences sur tous les sujets d'actualité technique ;

3^o Visites de diverses installations radio-électriques : stations d'émission et de réception, postes de navires et d'avions, laboratoires, radiophares, expositions, studios, etc. ;

4^o Renseignements de tous ordres (joindre un timbre pour la réponse).

Adresser la correspondance administrative et technique, et effectuer le versement des cotisations à l'adresse suivante :

SOCIÉTÉ DES RADIOÉLECTRICIENS
10, Avenue Pierre-Larousse, Malakoff (Seine)

Tél. : ALÉSIA 04-16 — Compte de chèques postaux Paris 697-38

Les correspondants sont priés de rappeler chaque fois le numéro d'inscription porté sur leur carte.

CHANGEMENTS D'ADRESSE : Joindre 20 francs à toute demande.

COTISATIONS

Elles sont ainsi fixées :

1 ^o Membres titulaires, particuliers	1.200 Fr.
— sociétés ou collectivités 6.000 fr. } au gré	
12.000 fr. } de la Société	
ou 25.000 fr. } ou Collectivité	
2 ^o Membres titulaires, âgés de moins de vingt-cinq ans, en cours d'études	600 fr.
Les membres de ces deux catégories, résidant à l'étranger, doivent verser en plus un supplément pour frais postaux de 300 fr.	
3 ^o Membres à vie :	
Les particuliers, membres titulaires, peuvent racheter leur cotisation annuelle par un versement unique égal à dix fois le montant de cette cotisation soit	
	12.000 fr.
4 ^o Membres donateurs :	
Seront inscrits en qualité de donateurs, les membres qui auront fait don à la Société, en plus de leur cotisation, d'une somme égale au moins à	
	5.000 fr.
5 ^o Membres bienfaiteurs :	
Auront droit au titre de « Bienfaiteurs », les membres qui auront pris l'engagement de verser pendant cinq années consécutives, pour favoriser les études ou publications techniques ou scientifiques de la Société, une subvention d'au moins	
	15.000 fr.

SOCIÉTÉ DES RADIOÉLECTRICIENS

PRÉSIDENTS D'HONNEUR

† R. MESNY (1947) — † H. ABRAHAM (1947).

ANCIENS PRÉSIDENTS DE LA SOCIÉTÉ MM.

- 1922 M. de BROGLIE, Membre de l'Institut.
 1923 H. BOUSQUET, Prés. du Cons. d'Adm. de la Cie Gle de T.S.F.
 1924 R. DE VALBREUZE, Ingénieur.
 1925 † J.-B. POMEY, Inspecteur Général des P. T. T.
 1926 E. BRYLINSKI, Ingénieur.
 1927 † Ch. LALLEMAND, Membre de l'Institut.
 1928 Ch. MAURAIN, Doyen de la Faculté des Sciences de Paris.
 1929 † L. LUMIÈRE, Membre de l'Institut.
 1930 Ed. BELIN, Ingénieur.
 1931 C. GUTTON, Membre de l'Institut.
 1932 P. CAILLAUX, Conseiller d'Etat.
 1933 L. BRÉGUET, Ingénieur.
 1934 Ed. PICAULT, Directeur du Service de la T. S. F.
 1935 † R. MESNY, Professeur à l'Ecole Supérieure d'Electricité.
 1936 † R. JOUAUST, Directeur du Laboratoire Central d'Electricité.
 1937 F. BEDEAU, Agrégé de l'Université, Docteur ès-Sciences.
 1938 P. FRANCK, Ingénieur général de l'Air.
 1939 † J. BETHENOD, Membre de l'Institut.
 1940 † H. ABRAHAM, Professeur à la Sorbonne.
 1945 L. BOUTHILLON, Ingénieur en Chef des Télégraphes.
 1946 R.P. P. LEJAY, Membre de l'Institut.
 1947 R. BUREAU, Directeur du Laboratoire National de Radio-
 électricité.
 1948 Le Prince Louis de BROGLIE, Secrétaire perpétuel de l'Académie
 des Sciences.
 1949 M. PONTE, Directeur Général Adjoint de la Cie Gle de T.S.F.

BUREAU DE LA SOCIÉTÉ

Président :

M. P. BESSON, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

Vice-Présidents :

MM. G. LEHMANN, Ingénieur-Conseil.
 de MARE, Ingénieur.

B. DECAUX, Ingénieur en Chef au L. N. R.

Secrétaire Général :

M. R. RIGAL, Inspecteur Général Adjoint des P. T. T.

Trésorier :

M. R. CABESSA, Ingénieur au L. C. T.

Secrétaires :

MM. M. PIRON, Ingénieur du Génie Maritime.

J. DOCKES, Ingénieur des P. T. T.

J. BOULIN, Ingénieur des P. T. T.

SECTIONS D'ÉTUDES

N°	Dénomination	Présidents	Secrétaires
1	Etudes générales.	M. de MARE.	M. FROMY.
2	Matériel radioélectr.	M. AUBERT.	M. ADAM.
3	Electro-acoustique.	M. BEDEAU.	M. POINCELOT.
4	Télévision.	M. MALLEIN.	M. ANGEL.
5	Hyperfréquences.	M. GOUDET.	M. GUÉNARD.
6	Electronique.	M. LÉAUTÉ.	M. BRACHET.
7	Documentation.	M. VILLENEUVE.	M. CHARLET.

Les adhésions pour participation aux travaux des sections doivent être adressées au Secrétariat de la Société des Radioélectriciens, 10, Avenue Pierre-Larousse, à Malakoff (Seine).

INFORMATIONS

DEMANDES D'EMPLOI

071. — Ingénieur Radioélectricien Gde Ecole, 15 ans Expr. Réception professionnelle radioguidage expr. de Laborat. 4 Langues. etc... cherche situation. Ecrire à la Société qui transmettra.

072. — Ingénieur Gde Ec. Spec. Hyperfréquences et Impuls. ayant créé et dirig. Lab. Indust., Ser. Conn. Mec., Exc. Prés., nbses relat., Angl., rech. Poste en rapport. Ecrire à la Société qui transmettra.

OFFRE D'EMPLOI

073. — Importante firme du Sud-Est cherche Ingénieur Radioélectricien de classe, capable d'assurer des responsabilités de commandement. Curriculum vitae et prétentions à la revue qui transmettra.

* *

Le Bureau des Temps Elémentaires nous informe que les Cours Supérieurs d'Etude du Travail vont reprendre à partir d'octobre dans un grand nombre de centres à Paris et en Province.

Ces cours comprennent les sections suivantes :

Formation d'agents d'étude du travail ;

Formation d'agents de méthodes ;

Formation des cadres ;

Information de la maîtrise et des ouvriers ;

Cycle de perfectionnement ;

Session d'étalonnage de jugement d'allure.

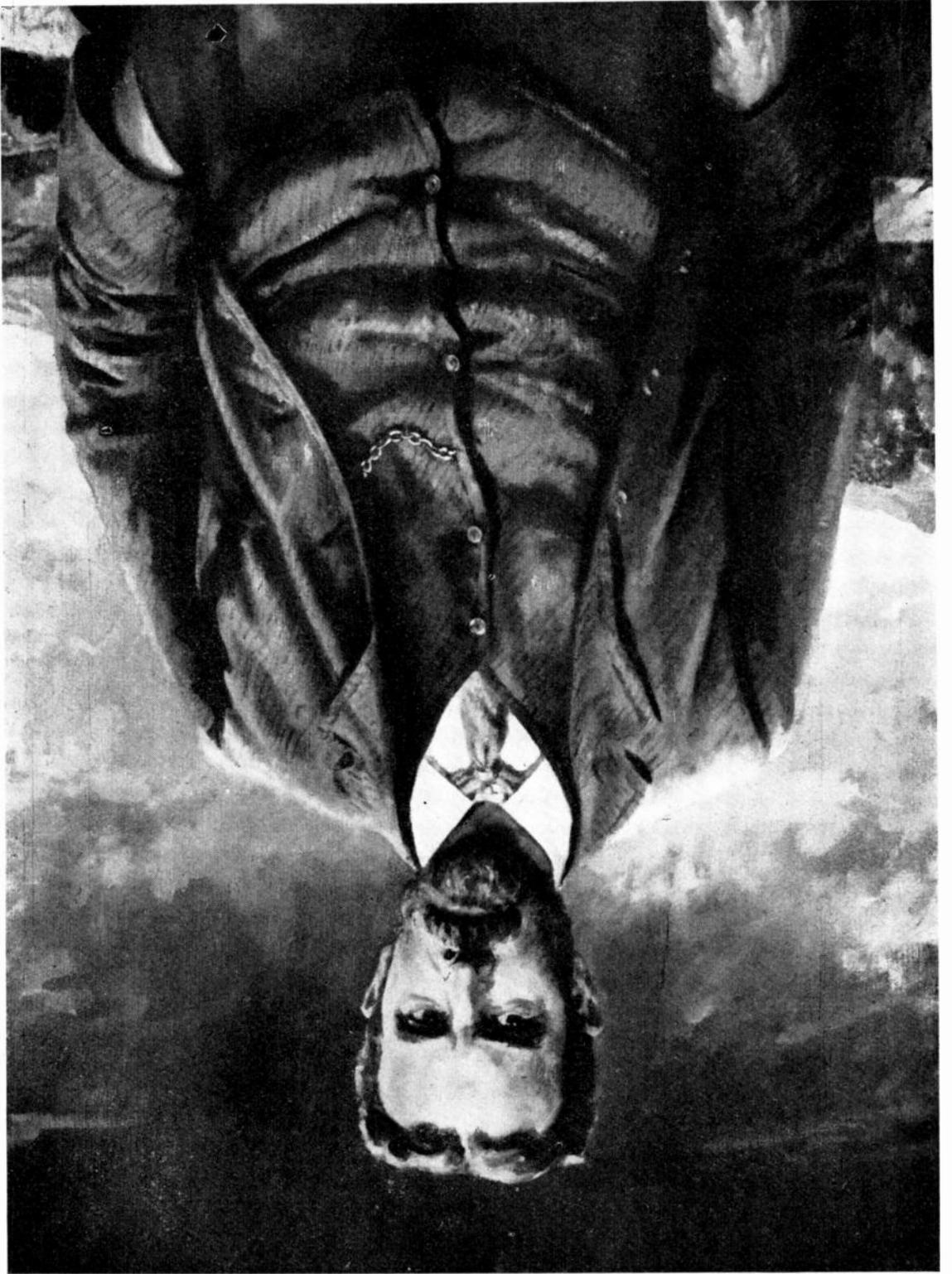
Pour tous renseignements complémentaires s'adresser : 8, rue Alfred-de-Vigny, Paris-8^e. Tél. . WAG. 92.74.

* *

Un ouvrage ayant pour titre " Le Savant et inventeur Joseph BETHENOD ", a été rédigé par M. Amédée Fayol, avec préface de M. Georges Darrieus.

Un certain nombre d'exemplaires de cet ouvrage de 166 pages ont été déposés au Secrétariat de la Société et peuvent être rétrocédés au prix de 450 fr.

HEAVISIDE 1850-1925



LE CENTENAIRE DE LA NAISSANCE D'OLIVER HEAVISIDE

PAR

Léon BOUTHILLON

Maître de Conférences honoraire à l'Ecole polytechnique

Ancien Président de la Société des Radioélectriciens

Le 20 mai 1950, le centenaire de la naissance du savant anglais O. HEAVISIDE a été célébré à la Sorbonne, sur l'initiative de la Société des Radioélectriciens et sous le patronage de la Société Française des Electriciens, de la Société Française de Physique, de la Société Mathématique de France et du Comité français de Radioélectricité Scientifique.

Cette manifestation comporta, outre une séance solennelle dans laquelle furent rappelés les principaux aspects de l'œuvre et de la vie de HEAVISIDE, une exposition d'intéressantes lettres envoyées à J. BETHENOD, ancien président de la Société des Radioélectriciens, ainsi que des ouvrages des continuateurs français de l'œuvre mathématique du savant.

La ROYAL SOCIETY et l'INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, de Londres, étaient représentées par Sir Edward APPLETON, F. R. S., prix Nobel et par le professeur Willis JACKSON.

MM. H. VILLAT, Louis de BROGLIE, Pierre LEJAY, René BARTHELEMY, Georges DARRIEUS et Hippolyte PARODI représentaient l'Académie des Sciences.

M. Louis de BROGLIE, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, prix Nobel, ancien président de la Société des Radioélectriciens, avait bien voulu accepter de présider la manifestation et, dans une éloquente introduction, précisa rapidement les principales caractéristiques de l'œuvre de HEAVISIDE, remercia les représentants de la science britannique et présenta les conférenciers.

Des allocutions furent ensuite prononcées par :

— M. Ed. PICAULT, Inspecteur Général des Postes, Télégraphes et Téléphones, ancien président de la Société des Radioélectriciens, sur « La Vie de HEAVISIDE ».

— Sir Edward APPLETON, G. B. E., K. C. B.,

F. R. S., prix Nobel, sur « HEAVISIDE et l'ionosphère » ;

— Le professeur Willis JACKSON, D. Sc., D. Phil., M. I. E. E., sur « La commémoration du centenaire de HEAVISIDE en Grande-Bretagne » ;

— M. P. HUMBERT, professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier, examinateur des élèves à l'Ecole Polytechnique, sur « HEAVISIDE et le calcul opérationnel » ;

— M. S. COLOMBO, attaché de recherches au Centre National de la Recherche scientifique sur « Les continuateurs de HEAVISIDE » ;

— M. P. M. PRACHE, président de la section des Télécommunications à la Société Française des Electriciens, sur « HEAVISIDE et la téléphonie » ;

— M. Léon BOUTHILLON, Maître de conférences honoraire à l'Ecole Polytechnique, ancien président de la Société des Radioélectriciens sur « HEAVISIDE et la rationalisation des unités et des formules de l'électricité et du magnétisme » .

Enfin M. Maurice PONTE, président de la Société Française des Electriciens, ancien président de la Société des Radioélectriciens, avait, le 18 mai 1950, représenté ces deux sociétés à la cérémonie organisée par l'INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, à Londres pour commémorer le centenaire de HEAVISIDE, et dans une allocution, apporté l'hommage de la science et de l'industrie françaises.

Ainsi, les témoignages de reconnaissance adressés au grand précurseur se sont doublés de journées d'amitié franco-britannique. La Société des Radioélectriciens, à laquelle en revient, pour la France, l'initiative, remercie tous ceux qui ont bien voulu lui apporter leur concours, les auteurs des communications et notamment ses quatre anciens présidents qui figurent parmi eux.

ALLOCATION

PAR

Louis de BROGLIE

de l'Académie française, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences

L'hommage que la SOCIÉTÉ DES RADIOÉLECTRICIENS rend aujourd'hui à Oliver HEAVISIDE va tout d'abord au créateur d'une méthode de calcul qui s'est révélée un puissant instrument de recherche, au précurseur qui a prévu, longtemps avant sa découverte expérimentale, l'existence de cette « couche d'HEAVISIDE », cette ionosphère qui, canalisant les ondes courtes et les ramenant vers la terre, permet et explique les radiocommunications à grande distance.

Pour les mêmes raisons et parce que, l'ionosphère est l'un des principaux objets de ses études, le COMITÉ FRANÇAIS DE RADIOÉLECTRICITÉ SCIENTIFIQUE ne pouvait manquer de s'associer à cette manifestation.

Pour la SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS qui, elle aussi, a répondu à l'appel de la SOCIÉTÉ DES RADIOÉLECTRICIENS, HEAVISIDE est tout ce que je viens de dire, et bien plus encore. Les phénomènes transitoires, dont l'importance sans cesse croissante suscite d'innombrables travaux, est un domaine d'élection pour le calcul opérationnel. Mais beaucoup d'électriciens oublient qu'ils ont d'autres motifs de célébrer HEAVISIDE. C'est lui qui a créé les termes impédance, réluctance, inductance, rationalisation, etc ... C'est lui qui, pour les applications à l'électricité, a repris et précisé les méthodes de l'algèbre et de l'analyse vectorielles et en a fait l'outil qui, perfectionné ensuite notamment par KENNELLY et STREINMETZ, n'a pas fini de rendre d'immenses services. Ses travaux sur la propagation du courant le long des fils ont eu une importance fondamentale pour la théorie des radiocommunications ; la plus importante application est la fameuse formule du câble sans distorsion et l'invention du câble chargé qui, avant l'amplificateur à lampes, a été l'instrument de la téléphonie à grande distance. Une autre idée de HEAVISIDE qui, après plus de cinquante ans, a la faveur de nombreux électriciens, est la nécessité de rationaliser, en éliminant les facteurs 4π des formules les plus utiles à la pratique et à la théorie. Les techniciens lui doivent encore d'importantes études sur la théorie élémentaire des alternateurs, le microphone, le récepteur téléphonique, etc ... Et, par dessus tout, ayant repris pour la simplifier, la préciser et la continuer l'œuvre gigantesque de MAXWELL sur l'électro-magnétisme, il fait

figure de pionnier dans le vaste mouvement qui a caractérisé l'évolution de la théorie et des applications dans la première moitié du vingtième siècle.

HEAVISIDE a dit beaucoup de mal des mathématiciens. Il aimait, nous rappelle BETHENOD, « à considérer les mathématiques comme un art et à répéter les sentences suivantes : « *Mathematics is an experimental science* » et « *Rigorous mathematics is narrow, physical mathematics bold and broad* », etc. Et les mathématiciens ne l'ont pas toujours compris. Mais les années ont passé. Il est pour les jeunes, un maître, préféré et la SOCIÉTÉ MATHÉMATIQUE DE FRANCE est présente à la commémoration du centenaire de la naissance de HEAVISIDE.

D'autres questions, nombreuses, ont retenu l'attention du célèbre électricien : l'âge de la terre, la thermo-électricité, la théorie de l'électron ; il est l'un des précurseurs de la théorie de la relativité, ayant prévu l'augmentation de la masse avec la vitesse quand la vitesse devient très grande. Plus que toutes les autres, la SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE devait donc s'associer à la manifestation d'aujourd'hui.

Ainsi toutes les activités qui ont profité des travaux de HEAVISIDE se trouvent réunies ici. Mais je dois remercier tout particulièrement l'ACADÉMIE DES SCIENCES qui, reconnaissant l'aspect d'universalité de sa contribution au développement de la connaissance, a voulu apporter son hommage. Je remercie mes éminents confrères, MM. Henri VILLAT, Camille GUTTON, Pierre LEJAY, René BARTHELEMY, Georges DARRIEUS, Hippolyte PARODI qui, ayant enrichi de leurs travaux et de leurs découvertes les domaines explorés avant eux par HEAVISIDE, savent bien ce que nous devons au glorieux précurseur.

Mais nous avons voulu faire plus que la commémoration d'un illustre savant, fût-ce la plus enthousiaste. Nous avons voulu que cette journée fût une manifestation d'amitié franco-britannique. Aussi sommes-nous particulièrement sensibles à l'honneur que nous a fait la ROYAL SOCIETY de Londres en nous envoyant Sir Edward APPLETON. C'est un ami qui nous revient. Nous tous, qui le connaissons personnellement, ou qui avons assisté à la belle conférence de 1945 devant la Société des Radioélectriciens, quand il est venu renouer entre les électroniciens français et la science anglaise les relations d'amitié interrompues par la guerre, ou qui avons, sous sa

présidence, participé aux assemblées de l'UNION INTERNATIONALE DE RADIODÉLÉGRAPHIE SCIENTIFIQUE, ou qui ne le connaissons que par sa gloire scientifique, sommes heureux de le recevoir à nouveau dans cette maison de la science française. Et nous le remercions tout particulièrement de bien vouloir nous parler aujourd'hui sur « HEAVISIDE ET L'IONOSPHERE ». Car, si HEAVISIDE a pressenti l'ionosphère, c'est Sir Edward APPLETON qui l'a découverte.

Si Edward APPLETON représente également ici, avec M. le professeur Willis JACKSON, L'INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, que je remercie du témoignage de sympathie qu'elle donne ainsi aux sociétés françaises avec lesquelles elle est, depuis longtemps, en relations d'amitié. Le professeur Willis JACKSON nous parlera de la célébration, en Angleterre, du centenaire de la naissance de HEAVISIDE, et nous écouterons avec reconnaissance ce que ce maître éminent, qui continue en Angleterre la tradition des grands électriciens du siècle dernier, nous dira de son illustre prédécesseur.

Je n'ai pas besoin de vous présenter les auteurs français des autres communications qui vous seront faites aujourd'hui. Vous les connaissez tous par leurs travaux et pour les avoir déjà entendus à la Société des Radioélectriciens et à la Société Française des Electriciens.

M. PICAULT rappellera la vie de HEAVISIDE. Ancien Président de la Société des Radioélectriciens, longtemps directeur du service de télégraphie sans fil de l'Administration Française des Postes et Télégraphes, il a toujours su allier à l'activité réalisatrice le souci des valeurs spirituelles et le culte de la grande tradition scientifique. Ceux qui ont assisté à la dernière assemblée de l'U. R. S. I. n'ont pas oublié son rapport sur le rôle des mathématiciens français dans la théorie des télécommunications.

M. Pierre HUMBERT, professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier, examinateur des élèves à l'École Polytechnique, parlera sur « HEAVISIDE ET LE CALCUL OPÉRATIONNEL ». Eminent mathématicien, grand historien des sciences, nul n'a fait plus que lui, et que l'école dont il est le chef, pour développer ce puissant instrument et multiplier les services qu'il rend aux mathématiques et à la technique.

M. S. COLOMBO, attaché de recherches au Centre National de la Recherche scientifique, a publié plusieurs livres ou articles sur le calcul opérationnel. Il est connu des radioélectriciens par des communications très remarquées. Lui-même continuateur du précurseur que nous célébrons aujourd'hui, il était parfaitement qualifié pour nous présenter « LES CONTINUEURS DE HEAVISIDE ».

M. PRACHE, ingénieur des Postes et Télégraphes, s'est consacré aux recherches sur les télécommunications. Il s'est signalé par des travaux dont ses pairs ont reconnu l'importance en le nommant président de la section des télécommunications de la Société Française des Electriciens. Il nous résumera ce que beaucoup considèrent comme l'œuvre la plus

importante de HEAVISIDE, celle qui concerne la téléphonie.

Enfin, M. L. BOUTHILLON, ancien président de la Société des Radioélectriciens, ancien président de la section de la Société Française des Electriciens chargée des études relatives aux unités, parlera du rôle de HEAVISIDE dans la rationalisation des unités et des formules de l'électricité et du magnétisme.

M. PONTE, ancien président de la Société des Radioélectriciens, président de la Société Française des Electriciens, a représenté la France, le 18 mai, à la commémoration, en Angleterre, du centenaire de la naissance de HEAVISIDE.

Et il me reste à vous inviter à regarder les quelques documents qui ont été rassemblés ici.

La meilleure preuve de la vitalité d'une œuvre scientifique réside dans les travaux qu'elle suscite. Nous n'avons pu rassembler d'innombrables articles, mais vous pouvez voir les livres français qui traitent du calcul opérationnel.

Voici ensuite les grands ouvrages de HEAVISIDE et d'abord les « ELECTRICAL PAPERS » où il a rassemblé ses premiers articles et avec eux, a-t-il dit dans une lettre à BETHENOD, l'essentiel de son « lourd travail ». L'exemplaire exposé appartient à l'Académie des Sciences, qui le considère comme une relique de grande valeur. BETHENOD, qui avait le culte des grands théoriciens de la physique, avait demandé à HEAVISIDE de le lui procurer « à tout prix ». Il reçut une réponse pleine d'humour. « ... Il semble probable qu'il n'y a absolument pas un seul exemplaire en vente, neuf ou d'occasion. Mais vous désirez le volume « à tout prix ». Combien est-ce ? Vous pouvez certainement l'avoir pour 10⁶ livres sterling, ou même 10⁸ ou peut être quelque pauvre diable pourrait vous le vendre 10 livres ... » Et finalement HEAVISIDE put lui procurer cet exemplaire « non coupé » pour 40 livres, ce qui était un bon prix, et lui envoyer en même temps une liste d'errata.

A côté de ce précieux ouvrage, vous verrez les trois volumes de l'« ELECTROMAGNETIC THEORY ».

Voici maintenant quelques lettres de HEAVISIDE à BETHENOD, extraites d'une longue correspondance qui dura de 1917 à 1924.

Le 24 février 1918, BETHENOD lui ayant écrit que les 40 livres payées pour les « Electrical papers » étaient « le meilleur placement de ma vie », HEAVISIDE revient sur lui-même et ces mots évoquent ce qu'a été pour lui le livre de MAXWELL. M. PICAULT vous le dira dans un instant.

Voici d'intéressantes appréciations sur CAUCHY qu'il reconnaît en particulier comme l'auteur de l'introduction de l'opérateur e^{nit} dans la physique mathématique, sur Fleming, Fessenden, Searle, Preece, Lodge, Fitzgerald, Pupin.

Voici le récit des travaux sur la télégraphie sans fil et notamment sur la couche de HEAVISIDE.

Voici la genèse de la découverte de l'effet de la self-induction sur le fonctionnement du câble télé-

phonique, et les difficultés de mise en œuvre qui s'ensuivirent.

Dans cette correspondance, HEAVISIDE se livre tout entier, avec une émouvante spontanéité, avec sa vie, ses œuvres, ses amis, son humble existence quotidienne, ses ennuis d'argent, mais aussi sa légitime fierté, son intransigeante indépendance.

Au plus fort des difficultés, et sa vieillesse en fut pleine, il savait conserver sa sérénité. Lui qui avait écrit, le 15 septembre 1918 : « Je n'ai pas besoin de titres, un ou deux suffisent : D^r O. HEAVISIDE, F. R. S. » signa ensuite plusieurs lettres : Oliver HEAVISIDE, W. O. R. M. (Worm, ver de terre), et nous trouvons, dans une lettre du 7 février 1920 l'explication de cette humilité et sa réaction devant l'adversité :

« Ne vous lamentez pas sur moi. Mon état de ver (worm) m'a toujours obligé à regarder le côté plaisant des choses, même quand je suis haletant de détresse ».

Il était plus fort que le mauvais sort. Il écrit le 2 novembre 1920 :

« Un politicien au pouvoir, un amiral, un général peut par ses folies appauvrir le pays de millions de livres, de centaines de millions, ou même de milliers, et être honoré, être anobli, et récompensé pécuniairement pour cela ... D'un autre côté des hommes qui enrichissent le monde entier par leurs découvertes, gratis, sont découragés et réduits à la misère. Je n'en dis pas davantage ... Je suis si indépendant, vous savez, et ne m'abaisse pas à prier, ou argumenter, ou soulever une controverse quelconque ».

Il avait des amis. LODGE, SEARLE, FITZGERALD en Angleterre, BETHENOD en France. Ils lui furent fidèles et il leur fut fidèle.

Il était cependant un isolé. A la fin de sa vie il vivait en ermite dans sa petite maison de Torquay. Il n'eut ni maître ni disciple. C'est dans le recueillement permis par la solitude qu'il s'est formé, puis qu'il a, toujours davantage, approfondi, pour notre bénéfice, sa vision de l'intime réalité des choses. En ces jours où l'on glorifie la recherche par équipe quitte à oublier parfois l'efficacité de l'effort personnel, l'exemple du grand travailleur solitaire est de ceux sur lesquels il faut méditer.

LA VIE D'HEAVISIDE

PAR

E. PICAULT

*Ancien Président
de la Société des Radioélectriciens*

Pour juger l'œuvre d'un savant, il convient d'étudier ses travaux ; pour avoir une idée de sa vie, on ne peut que se reporter à ceux qui l'ont connu. Le seul Français qui ait eu des relations avec Heaviside est notre ancien président, le regretté Béthenod, qui nous en a fait part à la mort d'Heaviside en 1925, et qui nous a laissé les lettres qu'il avait reçues de lui au cours de sept années de correspondance. Ces lettres ne se rapportent qu'à la fin de la vie d'Heaviside, et comme il vivait solitaire et qu'il s'est peu raconté lui-même, nous manquons d'informations directes à son sujet.

Les dates principales de la vie d'Heaviside tiennent en quelques lignes : il est né à Londres, le 13 mai 1850 ; il est mort à Torquay, localité de la côte de la Manche, le 4 février 1925, à l'âge de 75 ans, des suites d'une chute d'échelle, conséquence de sa vie solitaire, nous dit Béthenod.

Il a publié ses travaux dans diverses revues, mais principalement dans « The Electrician » et il les a rassemblés en les complétant dans deux ouvrages : « Electrical Papers » en 1892, et « Electromagnetic theory » en trois volumes parus respectivement en 1893, 1899 et 1912 ; il a donné la notice sur la théorie de la télégraphie de l'Encyclopédie britannique de 1902.

Il a reçu les distinctions suivantes :

Fellow de la Royal Society de Londres, en 1891.

Fellow of the Institution of Electrical Engineers de Londres, en 1908.

Fellow of the American Institute of Electrical Engineers, en 1917.

Docteur de l'Université de Gottingue en 1905.

En dernier lieu, la médaille Faraday de l'Institution of Electrical Engineers de Londres lui a été conférée en 1921. Il en a été le premier titulaire et ses collègues ont voulu, par cette distinction toute particulière, lui donner la marque de l'estime qu'ils avaient pour ses travaux.

De l'œuvre d'Heaviside, nous connaissons tous quelques points : il est le créateur du calcul opérationnel ; il a eu le premier l'idée de l'ionosphère ; il a préconisé la rationalisation des unités électriques ; il a créé la théorie de la propagation du courant téléphonique et a mis en évidence le rôle de l'inductance des lignes. Bien que, en France, nous soyons

plus familiers avec les travaux de notre compatriote Vaschy sur ce dernier sujet, nous reconnaissons l'importance et l'originalité des travaux d'Heaviside, publiés de 1885 à 1887 dans la revue « The Electrician ». Il me sera permis de rappeler ici que ses idées ont été connues en France par l'ouvrage d'un autre savant britannique, J. A. Fleming, traduit en 1912 par notre collègue, M. Ravut, qui constituait une mise au point, fort précieuse à l'époque, de cette importante question de la propagation des courants téléphoniques. Heaviside et Vaschy étaient aussi désintéressés l'un que l'autre ; aucun d'eux n'a tiré le moindre profit matériel de sa découverte malgré l'importance pratique qui s'y attachait. Vaschy n'en a même pas connu la suite, puisqu'il a été emporté par la maladie avant que les travaux de Pupin aient permis de la mettre en pratique. Quant à Heaviside, les questions de brevet lui étaient complètement étrangères, nous dit encore Béthenod. De plus, en ce cas comme en d'autres, il a rencontré de très grandes difficultés pour faire admettre ses idées dans son propre pays.

La manière dont Heaviside s'est formé est mal connue et les auteurs britanniques nous ont dit peu de choses à ce sujet, sinon que ses premiers travaux dénotent une connaissance profonde du traité de Maxwell. Heureusement, Béthenod nous a conservé une lettre d'Heaviside lui-même qu'il a citée dans sa notice de 1925. Cette lettre, datée du 24 février 1918, répond à celle où Béthenod lui disait que l'achat des « Electrical Papers » avait été le meilleur placement de sa vie. Reprenant la phrase de Béthenod, Heaviside commence ainsi :

« Le meilleur placement de ma vie (en français). Peut-être ce serait si vous aviez le temps et la persévérance de l'assimiler... (1) Je me souviens de mon premier coup d'œil sur le grand traité de Maxwell quand j'étais jeune homme. Il n'existait alors aucune théorie compréhensive, quelques fragments (scraps) seulement ; je cherchais ma voie pour comprendre l'électricité au milieu d'une grande obscurité. Quand je vis sur la table de la librairie

De (1) à (2), nous reproduisons la traduction de Béthenod (Annales des P.T.T., Bulletin de la Sté Française des Electriciens, 1925).

l'ouvrage qui venait de paraître (1873), je me mis à le parcourir et je fus étonné ! Je lus la préface et le dernier chapitre, et quelques morceaux par ci par là ; je vis que cela était grand, plus grand et le plus grand (it was great, greater, and greatest), avec de prodigieuses possibilités dans sa puissance. Je me commandai le livre sur le champ et je me mis au travail. J'étais très ignorant. Je n'avais aucune connaissance de l'analyse mathématique (ayant appris juste l'algèbre scolaire et la trigonométrie, que j'avais fortement oubliées), et ainsi me fut tracé mon travail. Cela me prit quelques années avant que j'eusse compris aussi bien que je le pouvais vraisemblablement. Je mis alors Mawxell de côté et suivis ma propre voie. Et j'avançaï beaucoup plus vite » (2).

Si l'on se rappelle maintenant que les principales découvertes d'Heaviside se trouvent dans les « Electrical Papers », qui avaient été publiés en partie dans les colonnes de « The Electrician » avant d'être édités en volume, on voit que son œuvre date



La Maison d'Heaviside à Torquay (1)

de sa jeunesse. Il semble qu'il ait cessé de publier après 1912, date du dernier volume de « Electromagnetic Theory », quoiqu'il ait continué à travailler bien après cette date.

Après ce coup d'œil rapide sur la carrière d'Heaviside, revenons à sa vie. Son père était graveur, et graveur de talent ; Heaviside lui-même avait du goût pour les arts, mais surtout pour la musique et il était bon pianiste amateur. Il était neveu par alliance du fameux Wheatstone, un des grands pionniers de la télégraphie, dont le nom reste attaché à une méthode fondamentale de mesures, ainsi qu'à l'appareil télégraphique A. B. C. qui sert encore de base aux transmetteurs automatiques actuels.

(1) La personnalité photographiée devant la maison n'est autre que M. Giorgi. (Photographie prise en Juillet 1938, et aimablement communiquée par M. Diestch),

Son frère était ingénieur du Post Office britannique et il semble que Heaviside, à ses débuts, ait appartenu pendant quelque temps à la Grande Compagnie des Télégraphes du Nord, à Newcastle sur Tyne : puis il a voyagé au Danemark. Il est ensuite revenu à Londres, chez ses parents, et il a travaillé avec son frère vers 1882. Il a continué à habiter avec ses parents ; sans doute trouvait-il dans cette vie de famille le calme nécessaire à son travail, car ses découvertes les plus importantes datent de cette époque. En 1889, toute la famille s'est installée à Paignton, où les parents d'Heaviside sont décédés, sa mère en 1894, son père en 1896. A partir de ce moment, Heaviside a vécu à peu près seul, puis il est allé à Torquay, villa Homefield, chez une belle-sœur de son frère, Miss Way, qui, bien qu'infirmes elle-même, l'a soigné pendant des années avec le plus grand dévouement. Heaviside a acheté ensuite Homefield où il a vécu seul jusqu'à sa mort.

On a souvent cherché la cause de cette vie solitaire et retirée, sans épouse, loin de tout milieu intellectuel dans cette petite ville de Torquay, et au cours de laquelle Heaviside a entretenu une énorme correspondance avec ceux qui s'intéressaient à ses travaux. Heaviside n'avait pas de domestique et, dans ses dernières années, il vaquait seul aux soins du ménage ; Heaviside avait certainement choisi lui-même cette vie retirée, mais pour quelle raison ? On a parlé cependant d'une sorte de timidité qui l'aurait écarté du monde, du dépit de se voir incompris ; on l'a attribué aussi, sinon à la maladie, tout au moins à une certaine disposition malade car Heaviside était de santé délicate ; de plus, depuis sa vingt-cinquième année, il était affligé d'une surdité croissante dont une anecdote, contée par Sir George Lee, nous donne une idée. Un de ses correspondants et amis, Highfield, était venu à Torquay dans son yacht, et il avait envoyé à Heaviside le patron de l'équipage pour lui annoncer son arrivée. Cet homme, parvenu à Homefield, frappa avec le heurtoir qui se trouvait sur la porte, ne reçut pas de réponse et revint, disant qu'il n'y avait personne. Quand Heaviside l'apprit, il fut désolé et il lui écrivit « Mais pourquoi votre capitaine s'est-il servi du marteau ? Pourquoi n'a-t-il pas pris son sifflet et sifflé par la fente de la boîte aux lettres comme le policeman le fait tous les matins ? Je l'aurais entendu, mais je ne pouvais pas entendre ses coups de marteau ».

Heaviside se faisait apporter chaque matin, par l'agent de police du coin, la viande de son repas. Après avoir mis le paquet dans la boîte aux lettres, cet homme sifflait vigoureusement pour l'en prévenir.

Une autre anecdote sur la vie solitaire d'Heaviside nous est contée par le même Highfield, délégué par l'Institution of Electrical Engineers, pour annoncer à Heaviside que le conseil de cette Société se proposait de lui attribuer la première médaille Faraday. Heaviside vivait alors seul à Homefield, dont l'aspect extérieur dénotait une parfaite indifférence du propriétaire aux questions d'entretien. Il attendait son visiteur dans un jardin envahi par l'herbe, enveloppé d'une vieille robe de chambre. Armé d'un balai, il s'efforçait d'écarter les feuilles qui jonchaient l'allée, sans trop

y réussir d'ailleurs. Il lui témoigna un vif plaisir de le voir, non dans quelque timidité et il le conduisit à sa chambre, par un hall tout encombré de meubles couverts de poussière. Il avait tapissé les murs de cette chambre de pages de revues ou de reproductions. Il conversa longuement avec son visiteur et entendit avec le plus grand intérêt le récit des cérémonies du cinquantenaire de l'Institution of Electrical Engineers, et il fut réellement heureux d'apprendre qu'on l'y avait tenu pour l'un des plus célèbres de ses membres.

A l'isolement et à la maladie s'ajoutait une autre difficulté : la modicité des ressources. En dehors de quelques revenus personnels, il recevait du gouvernement une pension de 120 livres. Heaviside était d'un caractère fier et indépendant et il refusait toutes les offres d'assistance, nous disent Sir Oliver Lodge et Mr Gill, à moins qu'elles ne fussent faites avec des précautions inimaginables, et cela en Grande Bretagne, où les institutions privées, en cette matière, ont un rôle et une importance dont nous n'avons pas la moindre idée en France et où il aurait paru normal à tous qu'Heaviside fût aidé par les industries qui utilisaient ses découvertes.

Il avait rencontré au début de sa carrière de grandes difficultés. Ses premiers travaux, publiés dans la revue « The Electrician », sont passés à peu près inaperçus. En 1892, les « Electrical Papers » ne trouvèrent que peu d'acquéreurs et la majeure partie de l'édition ne fut pas vendue. Les mathématiciens n'accueillirent pas les théories du calcul opérationnel quand elles furent publiées ; il s'ensuivit une polémique très vive, où Heaviside fit preuve d'un humour caustique, criblant de plaisanteries acérées ses contradicteurs, « les mathématiciens de Cambridge ». N'allait-il pas jusqu'à prétendre, sans en donner d'explication, que les séries qu'il utilisait, toutes divergentes qu'elles fussent, se prétaient mieux aux calculs que les séries convergentes des mathématiciens ! Cette opinion paradoxale était fondée, car Heaviside utilisait ce que l'on nomme maintenant des séries asymptotiques, que Poincaré nous a appris à manier, mais, il y a 60 ans, elle ne pouvait que soulever des critiques.

Il ne faut cependant pas déduire de ces boutades des conclusions sur le caractère d'Heaviside, car on nous le montre souvent aimable et bienveillant. Sir George Lee nous dit que les pensionnaires de la maison de santé où Heaviside passa ses derniers

jours disaient de lui après sa mort : « He was such a dear old man » expression de sympathie, dont nous nous gardons de donner un équivalent français.

Vers la fin de sa vie, Heaviside a eu la joie de voir reconnaître la valeur de ses travaux. On avait appris à manier l'inductance des lignes et à construire des bobines de charge. Un réseau de lignes téléphoniques chargées, en câbles ou en fils nus, s'étendait maintenant sur l'Europe et l'Amérique du Nord, créant une industrie importante qui faisait vivre des milliers de personnes et mettant en jeu des capitaux énormes dont Heaviside ne percevait pas un penny. La propagation à grande distance des ondes courtes de la télégraphie sans fil donnait une confirmation éclatante à l'existence d'une région ionisée dans l'atmosphère, que l'on nommait universellement couche d'Heaviside. Enfin, suprême victoire pour un savant, ses anciens contradicteurs, les mathématiciens, avaient enfin admis le calcul opérationnel, s'y intéressaient et lui donnaient des développements nouveaux. Heaviside avait ainsi la satisfaction personnelle de voir sa valeur reconnue, et celle, beaucoup plus grande à ses yeux, de voir que la science progressait dans les voies qu'il avait ouvertes quelques trente ans plus tôt.

Ces succès ne sortaient cependant pas du domaine des idées. Heaviside continuait à vivre seul dans cette ville de Torquay, isolé de Londres, des Sociétés Savantes, des Académies. S'il vaquait aux soins du ménage, si son existence matérielle était médiocre, sa vie intellectuelle restait extrêmement active. Dans sa correspondance, comme dans sa conversation, il se montrait au courant de tout ce qui se passait dans le monde, mêlant aux idées scientifiques les plus élevées des considérations sur les événements du jour et sur les choses les plus diverses, y compris ses ennuis domestiques et ménagers. Mais, s'il poursuivait cette vie modeste, c'était par fierté et par indépendance, par une indépendance qui marque un sentiment de dignité d'une incontestable grandeur, et c'est ce qui nous rend particulièrement précieuse cette scène, digne du moraliste antique, d'Heaviside âgé, modestement vêtu, balayant lui-même son jardin pour mieux accueillir celui qui venait, au nom de l'une des premières Sociétés Savantes du monde, lui annoncer que ses collègues le tenaient pour un des hommes les plus remarquables de son pays et qu'ils voulaient lui en donner un éclatant témoignage.

HEAVISIDE ET L'IONOSPHERE

PAR

Sir Edward APPLETON

G.B.E., K.C.B., F.R.S.

Représentant la Royal Society

En apportant le salut de la Royal Society et de l'Institution of Electrical Engineers à la Société des Radio-Électriciens, je désire tout d'abord vous dire combien le monde scientifique de Grande Bretagne a été touché par ce tribut spontané de la France envers notre grand compatriote : Oliver HEAVISIDE. Notre sentiment est d'autant plus profond que nous nous rappelons les remarquables contributions que des mathématiciens et physiciens français ont apportées au développement, à l'extension et à l'utilisation pratique des travaux de Heaviside.

J'ai le privilège d'évoquer un des aspects des travaux d'Heaviside sa prescience de l'existence d'une couche conductrice atmosphérique réfléchissant les ondes électriques et, de ce fait, facilitant les radio-communications à longues distances.

Né en 1850, Heaviside vécut la période passionnante de la naissance et de l'enfance de la radioélectricité comme science et comme application technique. Il avait 36 ans lorsque, pour la première fois, Heinrich Hertz réussit à produire et à détecter des ondes électriques. Lors d'une visite que fit Hertz en Grande Bretagne, en 1890, Heaviside fut invité à un déjeuner pour le rencontrer ; il ne semble pas qu'en dehors de cette occasion ces deux grands pionniers se rencontrèrent personnellement quoiqu'ils aient échangé une correspondance des plus cordiales. Leur amitié fut telle que Hertz la sentit assez forte pour suggérer à Heaviside de rédiger une version simplifiée de ses écrits scientifiques. En cette matière, on peut ajouter que beaucoup d'autres que Hertz lui-même avaient éprouvé des difficultés à lire les écrits d'Heaviside, il faisait peu de concessions pour faciliter la lecture de ses travaux. Quelqu'un lui ayant dit un jour que ses écrits étaient difficiles à lire, Heaviside répondit qu'ils étaient encore plus difficiles à écrire.

Heaviside, comme les autres chercheurs dans le domaine des communications, suivit avec grand intérêt les premiers travaux de Marconi pour l'emploi des radio-communications. Jusqu'en 1901, les distances sur lesquelles des communications avaient été réalisées étaient assez courtes, pour pouvoir s'expliquer par la transmission directe, au-dessus d'une terre supposée plane. Mais, dès 1898, on com-

mença à se demander s'il ne serait pas possible de transmettre des ondes radioélectriques sur des distances pour lesquelles il faudrait tenir compte de la courbure de la terre. G. F. Fitzgerald écrivit à son ami Heaviside en ces termes : « Avez-vous travaillé à la propagation des ondes autour d'une sphère ? Ce cas préoccupe les spéculateurs qui envisagent la possibilité de télégraphier en Amérique à l'aide d'ondes électromagnétiques libres. C'est évidemment une question de diffraction et je pense qu'elle peut être résolue ». Un ou deux ans plus tard la conjecture faisait place à une certitude lorsque Marconi réussit, en 1901, à établir une communication radioélectrique entre Poldhu dans le Sud-Ouest de l'Angleterre et Signal Hill, en Terre Neuve.

Il apparaît qu'Heaviside ne travailla jamais le problème de la diffraction autour d'une sphère conductrice, car, écrivant au Docteur W. E. Eccles plusieurs années plus tard, il mentionne que c'est en lisant les travaux de Poincaré et de Rayleigh qu'il réalisa pour la première fois que la courbure due à la diffraction était insuffisante pour expliquer les radio-communications à longues distances. Mais, avant la publication de ces calculs, Heaviside avait déjà émis sa célèbre suggestion sur l'existence, dans la haute atmosphère, d'une couche conductrice facilitant les transmissions à longues distances. Cette suggestion apparaît dans un article écrit en 1902 sous le titre « Theory of Electric Telegraphy » dans la dixième édition de l'« Encyclopedia Britannica ». Le thème principal de cet article d'Heaviside est de faire ressortir le contraste entre les caractéristiques différentes des ondes électriques le long des fils et celles des ondes électriques dans l'espace. Il signale que dans la transmission des ondes le long d'une paire de fils, ces ondes peuvent être orientées le long d'un parcours courbé, surtout si le parcours change lentement de direction. « Cette possibilité d'orientation, dit-il, est certainement une très importante propriété des fils ». Et il ajoute « qu'il y a quelque chose de semblable dans la télégraphie « sans fil ». L'eau de mer bien que transparente à la lumière, possède une conductibilité suffisante pour agir comme conducteur des ondes hertziennes et la même chose est vraie d'une façon moins parfaite, pour la terre.

C'est pourquoi les ondes épousent la surface de la mer de la même façon qu'elles suivent des fils. Les irrégularités apportent une certaine confusion, sans doute, mais les ondes principales sont ramenées vers la surface de la terre et ne s'écartent pas. Il faut tenir compte d'une autre considération. Il peut exister dans la haute atmosphère une couche suffisamment conductrice. S'il en est ainsi, les ondes s'y attacheront plus ou moins, si l'on peut s'exprimer ainsi. Dans ce cas, l'orientation sera donnée d'une part par la mer et d'autre part, par la couche élevée.

Pour autant que j'en aie connaissance, cette citation est la seule qu'Heaviside ait publiée au sujet de l'existence d'une couche conductrice dans la haute atmosphère, je sais cependant qu'il a écrit d'autres choses, sur le même sujet, et développé mathématiquement sa suggestion, mais de toute façon ces écrits ne furent pas imprimés. Néanmoins son idée de base, qui fut mise en avant indépendamment par A. E. Kennelly aux Etats-Unis et par A. Blondel en France, suscita certainement de nombreuses discussions dans les milieux de la radio-électricité.

Je crois qu'il convient de signaler ici qu'Heaviside semble avoir pensé que l'espace entre la surface sphérique de la terre et la surface inférieure de l'enveloppe conductrice la haute atmosphère constituait un « GUIDE-ONDE » quoiqu'évidemment, il n'ait pas employé une expression aussi moderne. En effet, dans sa correspondance privée, il parle d'une « hypothèse d'orientation ». Il revint à W. E. Eccles et H. Salpeter de formuler la théorie de la couche réfléchissante sous une forme moderne, dans laquelle le rôle des électrons et des ions dans la détermination de l'index de réfraction et du coefficient d'absorption de la couche conductrice a été complètement exposé. De cette façon fut mise en évidence l'importance de la courbure due à la réfraction, particulièrement dans le cas d'ondes courtes. En 1921, on signala également que si les électrons étaient les particules électriques effectives influençant le trajet des ondes radioélectriques à travers une couche atmosphérique ionisée, l'influence du champ magnétique permanent de la terre pouvait provoquer une double réfraction.

J'aimerais rendre ici hommage au travail de W. E. Eccles, le premier auteur qui, soit dit en passant, parla de la « couche d'Heaviside ». C'est lui qui m'incita à essayer de prouver ou d'infirmer

par l'expérience l'hypothèse d'une couche ionisée. Depuis 1924, l'exploration de la haute atmosphère par l'emploi tant de la modulation de fréquence que de la modulation d'amplitude pour la mesure du « group-time » de dispersion a prouvé que, dans son essence, l'hypothèse d'Heaviside était exacte. Un tel travail a permis d'élucider la structure et les variations de l'ionosphère, comme on appelle ce complexe de couches ionisées.

On a constaté qu'il existe dans l'ionosphère deux couches réfléchissantes principales, l'inférieure étant la couche E et la supérieure la couche F ; quoique, dans certaines conditions la couche F décèle une double structure laissant supposer l'existence de deux couches se chevauchant, elles sont appelées F1 (l'inférieure) et F2 (la supérieure). En-dessous de la couche E, il existe une région ionisée (couche D), pour laquelle la réflexion n'est pas normalement détectée dans le sondage ordinaire par impulsions radioélectriques à incidence verticale. La couche D a cependant une importance comme étant la région principale d'absorption pour les ondes à haute fréquence qui la traversent. On l'a également identifiée comme étant la région réfléchissante pour les ondes radioélectriques de très grande longueur ; c'est ainsi, peut-être, que plus que toute autre couche, elle remplit les fonctions envisagées à l'origine par Heaviside.

Le radio-sondage de l'ionosphère est actuellement effectué toutes les heures par plus de cinquante stations dans différentes parties du monde, quatre d'entr'elles travaillant sous une direction française. Un des résultats d'un tel travail a été de rendre évidente la relation étroite entre le rayonnement solaire et l'ionisation de la haute-atmosphère. En même temps, grâce à notre connaissance plus approfondie sur la façon dont les ondes radioélectriques sont réfléchies et réfractées par l'ionosphère, nous avons pu parvenir à une sélection plus efficace des longueurs d'onde pour les besoins pratiques des radio-communications.

Comme nous l'avons vu, tout cela découle d'une indication donnée en passant par Heaviside et par d'autres. A l'occasion d'un hommage rendu à son grand prédécesseur, Clerk Maxwell, Heaviside lui-même dit : « De tels hommes vivent la meilleure partie de leur vie après leur mort ». Nous pouvons certainement affirmer aujourd'hui que cette citation peut s'appliquer à Heaviside lui-même.

LA COMMÉMORATION DU CENTENAIRE D'OLIVER HEAVISIDE EN ANGLETERRE

PAR

le professeur Willis JACKSON

D. Sc. D. Phil., M. I. E. E.

Représentant l'Institution of Electrical Engineers

Je tiens d'abord à vous saluer, M. le Président et Messieurs les membres des diverses Sociétés rassemblés ici ce soir, de la part du Président et des membres du Conseil de l'Institution des Ingénieurs Electriciens du Royaume Uni. Je tiens aussi à vous exprimer leurs remerciements pour l'invitation de participer à cette célébration du centenaire de la naissance d'Oliver HEAVISIDE. Nous avons nous-mêmes tenu une réunion commémorative dans l'après-midi et la soirée de jeudi dernier, et vous me donnez l'occasion d'en dire quelques mots.

La séance de l'après-midi eut pour objet la présentation d'une étude sur « HEAVISIDE, l'homme », par Sir George LEE ancien ingénieur en chef de l'Administration du Post Office Britannique, et d'un certain nombre d'autres exposés faits par d'éminents savants et ingénieurs, en particulier par le Dr. G. F. C. SEARLE, autrefois du Cavendish Laboratory, à Cambridge. Le Dr. SEARLE, aujourd'hui âgé de 85 ans, rencontra Oliver pour la première fois en 1892 à la suite d'une correspondance échangée entre eux sur les champs électriques et magnétiques associés à une sphère chargée et en mouvement. Il en résulta une étroite amitié — une des rares amitiés réelles dans la vie retirée de HEAVISIDE — et le Dr. et Mme SEARLE firent beaucoup pour le soutenir dans les difficultés domestiques des dix dernières années de sa vie.

La séance du soir eut pour objet la présentation d'extraits de quatre exposés sur les divers aspects du travail de HEAVISIDE. L'un par le Prof. van der Pol porta sur le calcul opérationnel créé par HEAVISIDE pour la solution des problèmes de transmission sur ligne, de télégraphie et de téléphonie, qui étaient sa principale préoccupation. Un autre, par moi-même, traita de sa nouvelle présentation des équations de MAXWELL et de sa théorie de la transmission sur ligne sur la base solide de la théorie de MAXWELL ; j'énumérerai aussi d'une façon générale ses œuvres publiées. Le troisième, par le Dr. RADLEY, Ingénieur en chef adjoint du Post Office, discuta de l'influence de l'œuvre de HEAVISIDE sur le développement des télécommunications ; le quatrième, par M. H. J.

JOSEPHS, Chef de la Section de Mathématiques du Bureau des Recherches du Post Office, eut pour sujet les nombreuses notes inédites de HEAVISIDE.

Le premier volume de l'œuvre importante de HEAVISIDE : « La Théorie électromagnétique » fut publié en 1893 et le second en 1899. Dans la préface à la première édition du troisième volume, HEAVISIDE annonçait qu'il avait eu l'intention de publier un troisième volume en 1901 et un quatrième en 1910. Mais les circonstances furent défavorables ; son troisième volume ne parût qu'en 1912 cependant que le quatrième et dernier ne fut jamais publié.

La partie des notes inédites considérée par M. Josephs devait faire partie de son dernier volume. On ne sait pas si le manuscrit fut jamais terminé, bien que HEAVISIDE eût négocié sa publication à différentes périodes de 1917 à 1922. C'est un grand malheur que beaucoup de ces notes, en ce moment sous la garde de l'Institution, sont en si mauvais état qu'il n'a pas été possible d'en extraire des informations utiles, mais M. JOSEPHS a néanmoins réussi à rassembler quelques parties importantes du volume projeté.

Il est évident que HEAVISIDE fut extrêmement actif jusqu'à peu avant sa mort en 1925.

Ayant apporté avec moi un certain nombre de copies de ma communication ainsi que de celles que j'ai déjà mentionnées, je me restreindrai à ne parler que très brièvement, pendant les quelques moments à ma disposition, de ces œuvres posthumes. On y trouve des études mathématiques tout à fait remarquables, y compris certains théorèmes à propos desquels il dit avec un peu d'amertume « d'autres publient ce qui se trouve dans mon Volume IV ». Ces notes témoignent de son grand intérêt pour les conceptions ayant trait à la théorie électrique de la matière et à la nature statistique des lois de la physique, et enregistrent son continuel effort vers le développement d'une théorie unifiée des champs électromagnétiques et gravitationnels, sujet sur lequel il fit sa première publication en 1893.

Je sens, cependant, que je dois dire quelques mots sur certains aspects des œuvres publiées de HEAVISIDE dont on n'a peut être pas suffisamment remarqué l'intérêt. Ainsi, on parle peu ou pas du tout aujourd'hui de sa contribution à l'éclaircissement et la simplification de la théorie de MAXWELL sur les champs électromagnétiques ; du fait qu'il fut le premier à écrire les équations de Maxwell sous la forme de l'algèbre vectorielle en fonction des intensités de champs électriques et magnétiques, forme sous laquelle elles sont aujourd'hui invariablement présentées ; et de ce que, indépendamment, il obtint le théorème de Poynting sur le flux d'énergie quelques mois après Poynting lui-même et dans une forme plus générale. En outre, il semble que l'on a méconnu le fait qu'il publia une étude, bien que limitée, sur la propagation des ondes électromagnétiques dans les tubes cylindriques conducteurs appelés aujourd'hui « guides d'ondes cylindriques », quelque neuf années avant l'étude approfondie de Rayleigh ; d'autre part, rares sont ceux, me semble-t-il, qui savent que jusqu'à l'an 1900 environ, il était à l'avant-garde de ceux qui étudiaient les effets électromagnétiques associés aux corps portant une charge électrique en mouvement uniforme et accéléré. En particulier, il semble avoir été le premier à écrire, bien que l'exposé de sa méthode de dérivation ne soit pas des plus satisfaisantes, l'expression, attribuée à Lorentz, qui donne

la force agissant sur une charge en mouvement dans un champ magnétique. Je voudrais aussi indiquer à quel point il a contribué à la terminologie de l'électricité et du magnétisme. Ainsi c'est lui qui a introduit les expressions « résistivité », « conductance », « inductance », « permittivité », « admittance », « reluctance », « perméance », « distorsion » et « électrets ». D'autre part plusieurs autres expressions, bien qu'elles ne soient pas dues à HEAVISIDE, ont été mises dans l'usage courant surtout grâce à lui. Dans la section finale de mon étude de ses œuvres publiées, j'ai signalé plusieurs sujets accessoires auxquels HEAVISIDE a donné son attention et qui, vu leur complexité mathématique et son mode de présentation, ont sans doute été peu lus.

A certains points de vue, la vie de HEAVISIDE fut une grande tragédie, mais il en est sorti un homme d'une grandeur intellectuelle remarquable ; individualiste à l'extrême, il écrit, dans une de ses lettres, « mes résultats, tout imparfaits qu'ils soient, ont du moins la recommandation d'avoir été obtenus par l'effort d'un esprit non contaminé par les préjugés engendrés par des connaissances préliminaires obtenues de seconde main ». Il refusa les honneurs offerts de son vivant, mais nous pouvons aujourd'hui les lui donner, sans hésitation aucune, et avec la plénitude qui lui est due.

HEAVISIDE ET LE CALCUL OPÉRATIONNEL

PAR

P. HUMBERT

*Professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier,
examineur des élèves à l'Ecole Polytechnique.*

Oliver Heaviside est l'inventeur du calcul opérationnel.

Dans les dernières années du dix-neuvième siècle, en effet, il remarqua que, pour intégrer certaines équations différentielles ou aux dérivées partielles qu'il avait rencontrées dans des problèmes électromagnétiques, on pouvait utiliser une méthode curieuse et vaguement mystérieuse, consistant à représenter le symbole de dérivation $\frac{d}{dt}$ par un opérateur p , considéré comme un multiplicateur, et remplacer dès lors, suivant certaines règles précises, les calculs de dérivation et d'intégration par des calculs algébriques sur p . Au fond, de même que, près de trois siècles auparavant, Néper avait, par le calcul logarithmique, remplacé la multiplication par une addition, et la division par une soustraction, Heaviside, par son calcul opérationnel, remplaçait la dérivation par rapport à une variable t par une simple multiplication par la variable symbolique p , et l'intégration par une division par p . Et de même que Néper indiquait les règles usuelles du calcul par logarithmes, Heaviside donnait les principes fondamentaux du calcul opérationnel, comme par exemple celui qu'il appelait principe de transposition. Mais si Néper n'avait point eu de mal à trouver et à exposer les fondements mathématiques du calcul logarithmique, Heaviside n'a pas voulu voir — et surtout n'a pas voulu exposer — ceux du calcul opérationnel. Peut-être même a-t-il pris un certain plaisir à rester volontairement obscur, à énoncer des propositions sans démonstrations, à remplacer les déductions rigoureuses par des tours de passe-passe, et à répondre par des boutades aux critiques qu'on lui adressait. « Avancions, de toutes les manières possibles, et laissons la logique pour plus tard », affirmait-il, ou encore : « Travaillons, plus selon l'instinct que selon des règles sérieuses ». Ces assertions mettaient en rage les mathématiciens de Cambridge, épris à cette époque, comme tout le monde, de la rigueur de l'école germanique : mais Heaviside haussait les épaules. « L'usage des opérateurs, disait-il, donne de grandes simplifications, et évite le calcul d'intégrales compliquées : qu'im-

porte si la rigueur manque ? Vais-je refuser de dîner parce que je ne comprends pas à fond le mécanisme de la digestion ? » Ses ennemis ripostaient en lui interdisant l'accès aux Proceedings de la Royal Society : et pourtant ! Aujourd'hui, comme l'a écrit, par un juste retour des choses, un des plus éminents mathématiciens de l'école de Cambridge, mon maître Sir Edmund Whittaker, en une phrase très souvent citée : « Nous considérons le calcul opérationnel, avec les fonctions automorphes de Poincaré et le calcul tensoriel de Ricci, comme les trois plus importantes découvertes mathématiques du dernier quart du dix-neuvième siècle. Ses applications, ses extensions et ses justifications constituent une part considérable de l'activité mathématique d'aujourd'hui ».

Cette affirmation pourra paraître surprenante à beaucoup, qui s'imaginent que les méthodes de Heaviside ne sont qu'un procédé commode pour intégrer les équations différentielles de la physique, particulièrement de l'électricité. Le calcul opérationnel est bien autre chose que cela. « La méthode opérationnelle, disait d'ailleurs Heaviside, prouve par elle-même qu'elle est une puissante machine mathématique ». Lorsqu'on parlait devant Charles Hermite du calcul graphique et de la nomographie, il grommelait : « Mathématiques pour les singes ! » Ne rabaissons pas le calcul de Heaviside à ce niveau. L'une des grandes applications du calcul opérationnel — nous disons plutôt à présent calcul symbolique — c'est l'étude des fonctions et la recherche de leurs propriétés mathématiques.

Le calcul symbolique a été en effet assis sur des bases fermes par Paul Lévy, puis par Carson : il n'y a plus rien de mystérieux dans les procédés hérités de Heaviside ; à une fonction $f(t)$, appelée l'*original*, on fait correspondre son *image* $\varphi(p)$ par la définition suivante :

$$\varphi(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt,$$

et c'est sur $\varphi(p)$ que s'effectueront les calculs, en général plus simples, qui permettent de substituer son étude à celle de $f(t)$. On remarquera tout de suite

que l'intégrale de définition n'est autre que celle de Laplace : en fait, la transformation de Heaviside coïncide avec celle que le grand astronome français avait appliquée à l'étude de certaines équations différentielles. Si beaucoup d'auteurs, à la suite de Carson, mettent devant cette intégrale un facteur p , c'est afin de conserver aux résultats ultérieurs une symétrie plus parfaite et une élégance plus grande. Heaviside n'a donc, en un sens, fait que reprendre la classique transformation de Laplace, sous une forme plus enveloppée : mais il l'a appliquée d'une façon beaucoup plus large, et ses successeurs, en utilisant avec bonheur le théorème dit du produit, qui se rattache aux travaux de Volterra, ont fait du calcul opérationnel un puissant outil mathématique, très usité à présent dans tous les pays. A qui en douterait, il suffirait de rappeler que c'est le calcul symbolique assis sur des bases fermes par Paul Lévy et par

Carson, qui a permis à Van der Pol d'écrire la dérivée d'une fonction de Bessel par rapport à son indice, à Louis Poli d'exprimer par une intégrale définie le carré de la fonction gamma, et qui a suscité les travaux de Maurice Parodi sur les équations intégrales, ou de Serge Colombo sur les fonctions ν et μ .

N'oublions pas non plus que Heaviside a utilisé le calcul opérationnel pour déterminer des développements asymptotiques, très utiles dans les théories électriques : il a même été, dans ce domaine encore très mal exploré à son époque, un véritable précurseur, et les savants qui s'occupent actuellement de ces importantes questions ne devraient point le négliger. De sorte que, à côté des physiciens et des électriciens, qui doivent à Heaviside des résultats et des méthodes dont d'autres ont fait et feront l'éloge, nous aussi, mathématiciens, nous le revendiquons comme l'un des nôtres, et l'un des meilleurs.

LES CONTINUATEURS DE HEAVISIDE

PAR

Serge COLOMBO
Attaché au C. N. R. S.

Pour la plupart d'entre-nous il est plutôt malaisé d'évaluer exactement l'importance de l'œuvre accomplie par Oliver Heaviside car non seulement ses travaux ont porté sur des questions bien diverses, mais encore il les a souvent présentées sous une forme difficilement accessible aux spécialistes eux-mêmes. Toutefois nous disposons, pour une telle évaluation, de deux critères sérieux : l'influence exercée sur des contemporains, les résultats obtenus par des disciples.

Parlant de nos conceptions modernes sur les phénomènes électromagnétiques, l'un des maîtres de la physique théorique : H. A. Lorentz, disait un jour : « Que nous ayons pu parvenir aussi loin, cela est d'abord dû à Maxwell, et immédiatement ensuite, à Heaviside et à Hertz ». On sait combien la lecture des œuvres de Maxwell inspire Heaviside, mais ce que l'on connaît moins, semble-t-il, c'est l'influence exercée par ce vernis sur Hertz et qui nous est révélée par la correspondance échangée entre ces deux savants. Hertz demandait conseil à Heaviside lorsque l'interprétation théorique des résultats de ses célèbres expériences sur les ondes désormais appelées hertziennes, s'avérait délicate ; le physicien de Karlsruhe appréciait fort les avis de son collègue britannique et le 21 mars 1889 il lui écrivait : « Je partage l'opinion suivant laquelle vous seriez allé plus loin que Maxwell, et si ce dernier eût vécu il aurait reconnu la supériorité de vos méthodes ». Cette correspondance s'est poursuivie longtemps, et toujours sur un ton très amical ainsi qu'en témoigne la missive de Hertz envoyant à Heaviside, pour l'année 1891, ses vœux de succès et disant : « Mais vous n'avez certes pas conscience jusqu'à quel point vos publications sont difficiles à assimiler » puis le priant de se mettre davantage à la portée de ses lecteurs, il ajoutait : « de façon que vos grands mérites soient mieux reconnus ».

Le troisième tome de l'*Electromagnetic Theory* porte la mention : « A la mémoire de George Francis Fitzgerald ». Heaviside et Fitzgerald, s'ils ne se rencontrèrent en tout et pour tout que deux fois, échangèrent une volumineuse correspondance et résolurent ainsi plusieurs questions d'électrodynamique. Car Heaviside correspondait beaucoup, répondant volontiers aux demandes de précisions venues d'un peu partout, surtout de la part de physiciens qui éprouvaient quelques difficultés à situer leurs travaux expérimentaux par rapport à l'immense édifice que Maxwell venait de construire.

A tel point qu'on surnommait la ville qu'il habitait à Torquay *The Inexhaustible Cavity*, allusion à un passage de la Bible relatif à la grotte d'Adullam où affluaient des gens en détresse ; on raconte qu'une lettre libellée « M. Oliver Heaviside, the Inexhaustible Cavity » parvint normalement à son destinataire.

Citons encore parmi les correspondants d'Heaviside : Sir Joseph Larmor et, en France, Joseph Béthenod.

Comme cela est exposé par ailleurs, Heaviside utilisait une méthode de calcul intuitive et originale, résolvant ainsi des problèmes fort difficiles de physique mathématique. Il n'était que trop tentant de la reprendre en la généralisant et en la justifiant rigoureusement, — bien que, soit dit en passant, un aperçu de justification rigoureuse existe effectivement dans son traité, mais de façon si incidente qu'elle semble être restée ignorée de ses lecteurs. Nous voudrions résumer ici les travaux des théoriciens qui, dans cet ordre d'idée, ont été les continuateurs d'Oliver Heaviside.

En 1901, la revue italienne *l'Elettricista* publiait une analyse du second tome de l'*Electromagnetic Theory* ; elle était signée de Giovanni Giorgi, jeune ingénieur qui devait bientôt être connu des électriciens de tous les pays, principalement comme créateur d'un système de grandeurs et d'unités électriques. M. G. Giorgi fut vraisemblablement le premier, sur le continent, à détecter l'originalité et la fécondité des idées développées par Heaviside, tant sur le plan physique que sur le plan mathématique. Dès 1904 il donne une théorie complète du calcul opérationnel ; en 1924 il fit un tel exposé synthétique dans un mémoire présenté au Congrès International de Mathématiques, à Toronto. Il nous semble que les travaux de M. Giorgi auraient dû retenir bien davantage l'attention des électriciens ; cette relative indifférence s'expliquerait peut-être par le fait qu'à cette époque les relevés oscillographiques, bien moins parfaits qu'aujourd'hui, permettaient difficilement la vérification expérimentale de calculs compliqués et où entraient une certaine part d'hypothèses simplificatrices. En somme, comme Heaviside, M. Giorgi était un précurseur. Et comment lui refuser ce titre si l'on songe que dans ses travaux il introduisait déjà de façon systématique sous le nom de « fonctions non-archimédéennes » ces fonctions impropres ou impulsives (telle celle de Dirac) dont une théorie générale vient d'être élaborée par M. Laurent Schwartz.

En 1916, et de façon indépendante, Bromwich en Grande-Bretagne, Wagner en Allemagne, publièrent une justification mathématique rigoureuse de l'une des principales formules du calcul opérationnel, *la formule du développement*. Ce fut alors le point de départ d'une certaine vogue pour les méthodes de Heaviside ; et dix ans plus tard, surtout dans les pays de langue anglaise, le calcul opérationnel pénétrait dans l'enseignement. En 1927 il paraissait un petit ouvrage portant en exergue cette phrase désabusée de Heaviside : « Même les mathématiciens de Cambridge méritent qu'on leur rende justice ». Ce livre était signé du professeur Harold Jeffreys de l'Université de Cambridge et figurait dans la collection des *Cambridge Tracts* ... A l'Institut de Technologie du Massachusetts le professeur Vanevar Bush, lequel a joué au cours de cette guerre un rôle de premier plan comme organisateur des recherches scientifiques, enseignait le calcul opérationnel en tant que moyen d'étude des phénomènes électriques transitoires. A l'École Supérieure des Télécommunications, J. B. Pomey l'introduisait dans son cours d'électricité théorique.

John R. Carson de l'*American Telephone and Telegraph Company* avait également donné en 1917 une justification des procédés opérationnels basée sur la transformation fonctionnelle de Laplace-Abel : c'est d'ailleurs la justification proposée, sous une forme obscure et succincte comme nous le disions tout à l'heure, par Heaviside lui-même. Cette transformation fonctionnelle était bien connue des mathématiciens, à telle enseigne qu'on pouvait arguer qu'au lieu de justifier le calcul opérationnel, Carson avait montré comment, en définitive, il était possible de s'en passer ; en réalité la chose n'est pas si simple, nous le verrons dans un instant. Disons tout de suite que dans un ouvrage publié il y a un quart de siècle et faisant toujours autorité, Carson a résolu les mêmes problèmes qu'Heaviside, mais sans laisser ses lecteurs sur l'impression d'un procédé hasardeux ou mystérieux.

Ce faisant, Carson avait ouvert une voie nouvelle : le lien existant entre les méthodes si étonnamment fécondes de Heaviside et une transformation intégrale classique laissait entrevoir que l'on n'avait peut-être pas jusqu'alors tiré le meilleur parti possible de cette dernière. Il appartenait à Monsieur Van der Pol de le montrer en créant, il y a vingt ans, un nouveau chapitre d'analyse mathématique appliquée : *le Calcul Symbolique* qui, comme le souligne M. Pierre Humbert, est un très puissant outil d'investigation mathématique. Il ne serait guère possible d'énumérer ici tous les analystes qui ont ainsi obtenu de brillants résultats signalons cependant qu'en France M. Humbert a créé une brillante école « symboliste », dont Louis Poli et Maurice Parodi sont parmi les principaux représentants, et qu'en collaboration avec M. N. W. McLachlan il est l'auteur d'un riche formulaire de calcul symbolique totalisant quelques 1 200 formules.

Heaviside, savant solitaire et autodidacte général, se défendait d'être mathématicien ; il se classait plus volontiers parmi les physiciens et ne prétendait pas suivre les activités des premiers. Rien d'éton-

nant donc si on retrouve quelques aspects du calcul opérationnel dans les travaux de certains analystes.

C'est ainsi que Boole, vers 1865, avait fait usage des mêmes méthodes ; c'est d'ailleurs de Boole directement que semble s'être inspiré Henri Vogt lorsqu'il publia en 1919 et 1920 dans la Revue Générale de l'Electricité deux mémoires sur ce sujet. Antérieurement, Cauchy avait aussi utilisé les méthodes opérationnelles pour la résolution d'équations différentielles et du reste dans une de ses lettres à Joseph Béthenod, Heaviside fait allusion à cette antériorité.

Avant Cauchy, Lagrange avait, à la fin du 18^e siècle, utilisé les mêmes méthodes dans l'étude des équations aux différences finies ; en fait, la fameuse règle opérationnelle employée par Heaviside sous le nom de *règle de transposition* était connue de Lagrange.

Enfin, bien avant Lagrange, au 17^e siècle, Leibniz utilisait aussi les méthodes opérationnelles. En sorte que l'on serait tenté d'évoquer le poète s'écriant :

« Rien n'appartient à rien, tout appartient à tous.
Il faut être ignorant comme un maître d'école
Pour se flatter d'écrire une seule parole
Qu'un autre ici-bas n'ait pu dire avant vous ... »

Il paraîtrait même que certain jour le pauvre Lagrange s'est évanoui de chagrin en constatant qu'une de ses formules opérationnelles à exposants fractionnaires avait déjà été découverte par Euler. Et celui qui nous rapporte l'anecdote d'ajouter naïvement : « Bien des jeunes gens de nos jours n'auraient pas le cœur aussi sensible ... » De nos jours ... Il n'est pas inutile de préciser que ceci fut écrit en 1869 ! ...

Mais notre but n'est point de nous livrer à ce jeu, au demeurant bien stérile, qui consisterait à essayer de minimiser les mérites de Heaviside en lui découvrant quelques précurseurs. Le célèbre électricien possédait une parfaite originalité dans la façon de conduire ses calculs et au surplus son souci majeur était la détermination de l'allure des phénomènes transitoires dans les câbles et sur les lignes ; sur ce dernier point il a non seulement connu la réussite, mais on peut encore dire qu'aucun de ceux qui l'ont suivi dans cette voie ne peut prétendre l'avoir dépassé.

Et puis la Science est une grande œuvre commune à laquelle chaque nation contribue suivant ses tendances et ses traditions. Tant mieux si quelques uns parmi les nôtres sont susceptibles d'avoir pu inspirer Heaviside, mais reconnaissons surtout en ce dernier un magnifique génie chez qui nous nous plairons toujours à admirer quelques traits si spécifiquement britanniques : le réalisme, la recherche des méthodes directes, un sympathique dilettantisme, un humour sans pareil.

Pour ne rien négliger il faudrait ajouter qu'entre ses précurseurs et ses disciples, Heaviside eut aussi parfois ses détracteurs, — ce qui ne saurait surprendre car l'ermite de Torquay était volontiers caustique et rendait coup sur coup. Mais de ces détracteurs nous ne saurions dire grand chose : ils ont déjà sombré dans l'oubli ...

HEAVISIDE ET LA TÉLÉPHONIE

PAR

P. M. PRACHE

*Président de la Section Télécommunications
de la Société Française des Electriciens*

Reportons-nous, si vous le voulez bien à la fin de l'année 1886. Dans le domaine des télécommunications, le télégraphe est roi. La France, comme les autres pays d'Europe, est couverte d'un réseau de lignes télégraphiques aériennes et nous avons même entrepris la pose d'un réseau de câbles souterrains à grande distance.

Sir William THOMSON (qui n'est pas encore Lord KELVIN) a donné une théorie de la transmission, qui, bien que ne concordant pas de façon parfaite avec l'expérience, est amplement suffisante pour l'étude de l'affaiblissement et de la déformation des signaux à cadence relativement lente utilisée à l'époque.

Cependant, on se préoccupe de la mise en exploitation entre villes du frère cadet, le téléphone. On utilise naturellement pour la transmission les lignes télégraphiques existantes en fil de fer. On s'est bien vite aperçu que les lignes devaient être à double fil. Mais, et sans qu'on puisse l'expliquer, les résultats sont médiocres. Des ingénieurs anglais ont l'idée de comparer les propriétés des lignes en fer et celles de quelques lignes en cuivre que l'on a construites à l'entrée des villes, non pas en raison de leur meilleure conductibilité, mais parce que les fumées acides des usines corrodent le fer trop rapidement.

Dans une conférence faite à l'Association britannique à ABERDEEN, Sir William PREECE commente les résultats de ses essais et il conclut : « La supériorité du cuivre provient du fait qu'il a une inertie électrique moins grande que le fer. L'aimantation du fer agit comme une espèce de frein des courants ».

De son côté, HUGHES expose à la Société des Ingénieurs des Télégraphes de Londres les résultats de ses expériences sur la self-induction. En utilisant des appareils rudimentaires, il a constaté que la résistance des fils de fer croît avec la fréquence, ce qu'il attribue à la force électromotrice de self-induction. Il n'a pas tort puisque l'effet de peau, qui est encore mal connu à l'époque, croît avec la perméabilité. Mais confondant l'effet et la cause, tous deux concluent en termes définitifs que la self-induction est toujours nuisible.

Dans une lettre ouverte, un ingénieur encore peu connu, Oliver HEAVISIDE, réfute point par point les conclusions de Sir William PREECE. Il se réfère

à une série d'articles sur la transmission qu'il vient de publier dans la revue « The Electrician ». Ces articles, il semble que personne ne les a lus. Ce n'est pas qu'ils soient d'un niveau mathématique trop élevé. Tous les techniciens ont déjà étudié le traité de MAXWELL paru 12 ans plus tôt et qui est beaucoup moins accessible. HEAVISIDE expose au contraire, avec une grande clarté et une grande simplicité, toute la théorie de la transmission téléphonique telle qu'elle est encore enseignée aujourd'hui. On y trouve une définition précise des constantes et de la vitesse de propagation, de l'impédance caractéristique et la théorie des réflexions.

Il explique que l'inductance joue un rôle favorable et il donne la fameuse condition $R/L = G/C$ relative à la ligne sans distorsion.

Si les techniciens n'ont pas lu ses articles, c'est plutôt parce que HEAVISIDE est considéré comme un révolutionnaire qui ose porter atteinte à une théorie qui paraît définitive puisqu'elle s'appuie sur trente années d'expérience télégraphique.

Je dois ouvrir ici une parenthèse pour rappeler que HEAVISIDE n'a pas été seul à réfuter les conclusions de HUGHES et de PREECE. Dans les Annales Télégraphiques d'août 1886, un jeune ingénieur français de 29 ans (il a 7 ans de moins que HEAVISIDE) Aimé VASCHY écrit : « En ce qui concerne les lignes télégraphiques, on admet généralement que leur self-induction est nuisible au point de vue des transmissions. Nous nous proposons de démontrer dans un prochain article que cette opinion est sans fondement et que, notamment pour les transmissions téléphoniques, l'effet de la self-induction de la ligne est essentiellement utile ».

La théorie de VASCHY n'est publiée que deux ans plus tard, dans le numéro de novembre 1888 des mêmes Annales. Il a soin de rappeler en préambule que la même question a été traitée l'année précédente par HEAVISIDE. D'ailleurs, le mode de calcul est différent. VASCHY aborde de front la résolution de ce qu'il appelle « la terrible équation des télégraphistes » tandis que HEAVISIDE, avec son profond sens physique, traite d'abord, comme nous le faisons maintenant, le cas du régime harmonique et étendra ensuite le résultat au régime transitoire par

le calcul opérationnel. Les conclusions des deux auteurs sont identiques. On doit améliorer la transmission en augmentant l'inductance des lignes.

Les douze années qui suivent marquent pour HEAVISIDE la lutte pour faire exécuter des essais par une administration qui n'a pas la foi. Ce n'est pas seulement en France que les inventeurs sont méconnus. De ce point de vue, on peut faire un parallèle intéressant entre les essais de mise en application des travaux de VASCHY et de HEAVISIDE.

En France, c'est BARBARAT, camarade d'école de VASCHY, qui parvient à faire construire quelques longueurs de conducteurs de cuivre cuirassés, c'est-à-dire recouverts d'un enroulement de fer doux et il mesure leur inductance, ouvrant ainsi la voie à l'ingénieur danois C. E. KRARUP qui réalisera le premier des liaisons téléphoniques par circuits à charge continue. Il essaye également en 1896 de charger par bobines un câble souterrain.

En Angleterre, la Compagnie Eastern Telegraph fait exécuter des essais d'insertion de bobines sur les circuits. En Angleterre, comme en France, ces derniers essais échouent parce que, sans prendre l'avis des inventeurs, on a inséré un nombre insuffisant de bobines de trop forte inductance.

Ce sont finalement les Américains qui doivent recueillir le fruit des travaux européens. Nous ne devons d'ailleurs pas sous-estimer leur contribution. Ils ont eu le grand mérite de comprendre l'intérêt de travaux qui étaient regardés avec indifférence dans le propre pays des inventeurs.

De plus, PUPIN et CAMPBELL ont apporté la dernière pierre à l'édifice en donnant, avec la théorie du filtre électrique, la règle pratique, « The rule of thumb » comme disent les Anglais, pour la détermination de l'inductance et de l'espacement des bobines. Tandis que VASCHY disparaît prématurément en 1899, HEAVISIDE peut, sur ses vieux jours, suivre,

non sans une certaine mélancolie, le développement prodigieux des applications de ses théories.

Malgré l'extension des procédés modernes de téléphonie par haute fréquence, nous continuerons longtemps encore à augmenter artificiellement l'inductance des circuits.

D'ailleurs, les nouveaux procédés de transmission s'appuient eux aussi à chaque pas sur l'œuvre de HEAVISIDE.

Sir Edward APPLETON vous a parlé de sa contribution aux transmissions radioélectriques.

Les circuits coaxiaux qui forment l'ossature des grands réseaux souterrains modernes ont été prévus par HEAVISIDE. Sur ces circuits, les courants de haute fréquence ne pénètrent que superficiellement la surface des conducteurs. L'étude de leur propagation fait donc constamment appel à la théorie de l'effet pelliculaire que HEAVISIDE a étudiée de façon approfondie dans une série d'articles publiés entre 1884 et 1890 dans « The Electrician » et le « Philosophical Magazine ».

La transmission sur les lignes de la télévision et de la téléphonie par impulsions est essentiellement liée à la cybernétique, c'est-à-dire à l'étude de la déformation des signaux et des phénomènes transitoires.

Toutes les méthodes utilisées pour cette étude dérivent du calcul opérationnel dont nous a parlé le professeur Pierre HUMBERT. Et même, la théorie récente de la propagation dans les guides diélectriques se trouve toute entière en puissance dans les articles de HEAVISIDE sur la propagation des ondes électromagnétiques.

Je peux donc conclure en disant que la technique des télécommunications est profondément imprégnée de l'esprit de HEAVISIDE et il semble qu'à chaque progrès nouveau dans ce domaine, on tourne simplement une page jusque-là méconnue de son œuvre.

HEAVISIDE ET LA RATIONALISATION DES UNITÉS ET DES FORMULES DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME

PAR

Léon BOUTHILLON

*Maître de Conférences honoraire
à l'École Polytechnique,
Ancien Président de la Société des Radioélectriciens.*

Au moment où Oliver HEAVISIDE commença la publication, dans la revue anglaise « The Electrician », de la série d'articles qui devaient constituer la plus grande partie des deux volumes des « Electrical papers », le premier congrès international des électriciens (Paris, 1881) venait de désigner comme fondamental le système C.G.S. électromagnétique dans lequel :

1° Le centimètre, le gramme et la seconde sont les unités respectives de longueur, de masse et de temps ;

2° Les grandeurs électriques et magnétiques sont définies par un ensemble de formules dont les principales sont les suivantes :

- (1) $F = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2}$ F , force ; m_1, m_2 , masses magnétiques ; r , distance ; μ , perméabilité magnétique,
- (2) $H = \frac{F}{m}$ H , intensité du champ magnétique ;
- (3) $B = \mu H$ B , induction magnétique ;
- (4) $F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$ q_1, q_2 , quantités d'électricité ;
- (5) $\Phi = B S$ Φ , flux d'induction magnétique
- (6) $E = \frac{F}{Q}$ E , intensité du champ électrique ;
- (7) $V = \int E dl$ V , potentiel ;
- (8) $D = \epsilon E$ D , induction électrique ;
- (9) $\epsilon \mu c^2 = 1$ c , vitesse de propagation des ondes électromagnétiques.
- (10) $I = \frac{dq}{dt}$ I , intensité de courant,
- (11) $W = RI_2 T$ R , résistance ; W , énergie ;

(12) $L, M = \frac{\Phi}{I}$ L, M , coefficients d'induction.

3° Les unités sont déterminées à partir des mêmes formules, la perméabilité μ étant considérée comme une grandeur sans dimensions, égale à l'unité dans le vide.

En même temps étaient définis comme unités pratiques

- de résistance : l'*ohm*, égal à 10^9 unités C.G.S. E.M. ;
- de potentiel : le *volt*, égal à 10^8 unités C.G.S. E.M. ;
- de capacité : le *farad*, égal à 10^{-9} unités C.G.S. E.M. ;
- de charge électrique : le *coulomb*, égal à 10^{-1} unités C.G.S. E.M. ;
- d'intensité de courant : l'*ampère*, égal à 10^{-1} unités C.G.S. E.M. ;

Ces décisions consacraient des recommandations de la British Association for the Advancement of Science qui, en 1867, avait adopté l'ohm et le volt et en 1873 le farad.

On remarquera que, reposant sur les deux formules (1) et (4) de Coulomb, l'ensemble des expressions (1) à (12) ne contient pas de facteurs parasites. Mais on en déduit immédiatement d'autres, et par exemple, en partant de la loi électrique de Coulomb la formule de Gauss pour l'électricité

$$\Psi = \int_s D ds = 4 \pi \rho \quad (13)$$

ou la formule différentielle équivalente

$$\text{div } D = 4 \pi \rho \quad (14)$$

(ρ étant la densité cubique de l'électricité) et, en partant de la formule de Biot et Laplace, les formules intégrale et différentielle d'Ampère :

$$\int_L H dl = 4 \pi I \quad (15)$$

$$\text{Curl } H = 4 \pi i \quad (16)$$

i étant la densité de courant.

De même la loi donnant la densité superficielle σ de courant à la surface d'un conducteur s'écrit

$$E = 4 \pi \sigma ; \quad (17)$$

celles des énergies électrique et magnétique s'écrivent

$$\frac{1}{8 \pi} \int E D dv \text{ et } \frac{1}{8 \pi} \int B H dv . \quad (18)$$

La critique.

Les formules 13 et 18 contiennent des facteurs 4π .

Dès 1882, dans le premier article des longues séries qu'il devait consacrer à la théorie de l'électricité, HEAVISIDE protestait.

« La présence du facteur 4π (dans la formule 16) est due à la définition du pôle magnétique unité. Si nous définissions le pôle magnétique unité par la quantité unité du flux émanée de lui, la force à

la distance r serait $\frac{1}{4 \pi r^2}$ puisque $4 \pi r^2$ est

l'aire de la surface sphérique sur laquelle la force est étendue à la distance r . Nous aurions ainsi courant = curl de force magnétique. Et si nous avions une définition semblable de l'unité d'électricité libre, la force électrique sur une surface serait numériquement égale à la densité superficielle au lieu de, comme à présent, 4π fois autant. Mais, suivant les définitions actuelles, la force à la distance

r est proportionnelle à $\frac{1}{r^2}$. Ceci semble plus

simple, mais conduit au résultat déplorable que les recherches mathématiques, aussi bien en électrostatique qu'en électromagnétisme sont pleines

de 4π et de $\frac{1}{4 \pi}$. Quelquefois nous multiplions,

d'autres fois nous divisons. Les 4π seraient le plus souvent supprimés si l'on définissait les forces électrique et magnétique par des flux, de la même manière que le courant électrique, par un courant C , qui se répand à partir d'un centre, produit une

densité de courant $\frac{c}{4 \pi r^2}$ et non $\frac{c}{r^2}$.

En même temps 4π apparaîtrait dans certains cas où il est maintenant absent, comme dans les problèmes sphériques, et sa présence y serait parfaitement naturelle, 4π étant l'aire de la sphère unité ».

Ce coup de boutoir donné dans la forteresse des idées admises, HEAVISIDE rongea son frein pendant plusieurs années sans se priver de rationaliser à l'occasion, non sans ruer parfois dans les brancards, jusqu'à ce qu'en 1891, écrivant l'« Electromagnetic Theory », il utilisât uniquement un système rationalisé et s'expliquât à fond avec une vigueur que

les titres de ses paragraphes suffisent à souligner : l'éruption des 4π ; l'origine et l'extension de l'éruption ; la cure de la maladie ; plaidoyer pour la suppression de l'éruption par une cure radicale. (Electromagnetic theory, vol. I, p. X à XII et 116 à 127 ; vol. II, p. 275 à 285).

Quelle est l'origine du système C.G.S. électromagnétique et du système pratique d'unités et par conséquent des 4π qui s'introduisent dans les dernières formules ci-dessus ? HEAVISIDE était trop avisé pour ne pas le discerner.

« L'origine de l'absurdité des 4π fut l'esprit logique de nos ancêtres, littéralement. La loi de l'inverse du carré étant admise, suivant laquelle deux charges q_1 et q_2 se repoussaient l'une l'autre avec une force variant comme l'inverse du carré des distances entre elles

$$F = a \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

où a est une constante, qu'y avait-il de plus naturel que de simplifier l'expression de la loi autant que possible en donnant à la constante la valeur 1 du moment qu'en fait, on croyait qu'il n'y avait rien de plus. Nos ancêtres ne pouvaient pas voir dans l'avenir — c'est-à-dire plus loin que leur nez — et s'apercevoir que ce système se révélerait absurde. Ils furent dans la logique de leur génération, et il n'y a rien à leur reprocher ».

Mais s'il absout les ancêtres, HEAVISIDE ne ménage pas les contemporains fussent-ils les plus illustres. Et il prêche d'exemple en écrivant les trois volumes de sa « théorie électromagnétique » en formules rationalisées. Voici, sous le titre « l'éruption des 4π ».

« On a peut-être remarqué que les équations que j'ai employées ci-dessus diffèrent de celles utilisées dans tous les traités mathématiques traitant de la question en ce que (parmi d'autres divergences), la constante 4π qui s'affiche ordinairement avec tant d'impudence, s'est fait remarquer par son absence. Auparavant, cette constante 4π était considérée comme un élément essentiel des théories électrique et magnétique... Jamais aucune indication ne donnait à penser que ce 4π était purement conventionnel... c'était délicieux, absolument délicieux... Comment le 4π s'arrangeait-il pour s'insinuer dans la théorie ? Ce sombre mystère était soigneusement couvert par les mathématiques. Il était aussi difficile à comprendre que, pour le roi, la présence de la pomme dans le pudding ; comment la cuisinière avait-elle pu l'y faire entrer ? Et la question n'avait pas été éclaircie par le grand traité de Maxwell. Il pensait que sa théorie du déplacement électrique expliquait la signification du 4π ».

HEAVISIDE cite le traité de Maxwell (p. 55, 2^e édition).

« La théorie rend compte complètement du théorème... suivant lequel l'induction totale à travers une surface fermée est égale à la quantité totale d'électricité multipliée par 4π ».

Ceci était écrit en 1891. Et HEAVISIDE enchaîne dans sa préface d'« Electromagnetic theory » (1893).

« Cette curieuse et encombrante constante 4π était considérée par certains comme une bénédic-

tion envoyée par Dieu, sans laquelle toute la théorie électrique tomberait en morceaux ».

Et il termine cette partie critique par la conclusion, admise universellement aujourd'hui, mais il a fallu plus de cinquante ans pour que cette unanimité s'établisse :

« Le 4π n'a aucun rapport essentiel ni avec sa théorie (celle de Maxwell) ni avec aucune autre... C'est uniquement une question de choix des unités, indépendante de toutes les théories de l'électricité.

En vertu de quels principes devront être choisies les unités ? Tout le monde, nous dit HEAVISIDE, est d'accord là-dessus : nos ancêtres et Maxwell lui-même, dont il cite un passage caractéristique :

« Ayant établi des relations entre les quantités physiques, nous devons, en en formant une représentation systématique, essayer d'éviter l'introduction de constantes arbitraires et non nécessaires ».

Toute la difficulté est dans l'application de ce précepte.

Mais, dit HEAVISIDE :

« Ce n'est que par la force de l'habitude qu'on peut ne pas voir qu'il y a quelque chose d'anormal en ce qui concerne les 4π dans les théorèmes de Coulomb et de Gauss... L'énergie électrique par unité de volume $KE^2/8\pi$ de Maxwell et son énergie magnétique $\mu E^2/8\pi$ ne proclamaient-elles pas qu'il y avait quelque chose de radicalement mauvais dans le système qui conduisait à de telles expressions ?...

« Quand on l'approfondit, la question est simplement celle-ci : quelle est la mesure naturelle de l'intensité d'une source ? Supposons par exemple que nous ayons une source de chaleur dans un milieu qui n'absorbe pas la chaleur, comment mesurerons-nous l'intensité de la source ? Evidemment par la quantité de chaleur émise par seconde passant à travers une surface quelconque contenant la source. Si le flux de chaleur est régulier isotropiquement, sa densité variera comme l'inverse du carré de la distance d'une source ponctuelle, ce qui donne

$$C = \frac{S}{4\pi r^2} \quad (5)$$

si C est le flux de chaleur (par unité d'aire) à une distance r de la source d'intensité S . Si nous enlevons le 4π , nous aurons évidemment une mesure non naturelle de l'intensité de la source.

« De même si nous envoyons de l'eau dans un tuyau et qu'elle coule de son extrémité, qui peut par conséquent être regardée comme une source, nous devons évidemment mesurer son intensité de la même manière, ou par le débit total.

« Maintenant, dans un champ électrique, ou un champ magnétique, ou le champ d'une grandeur vectorielle quelconque, nous avons des cas mathématiques analogues. Nous trouvons, par exemple, que la force électrostatique est distribuée comme la vitesse dans un liquide incompressible, sauf en certains endroits où elle est, par analogie, engendrée, où elle a sa source. Si donc nous observons que le flux de force à travers une surface fermée n'est pas nul, il doit y avoir des sources dans le volume limité

par cette surface, et la mesure naturelle de l'intensité totale des sources est le flux total de la force lui-même...

« Utilisant pour un moment le langage des lignes de force ou des tubes de force... nous pouvons dire qu'un pôle unité émet une ligne de force, ou un tube, quand il est mesuré rationnellement.

« Ensuite on doit considérer la mesure appropriée du flux de circuit, courant électrique par exemple. La propriété essentielle ici est que la circulation de la force magnétique est proportionnelle au courant à travers le circuit et la mesure naturelle de l'intensité du courant est la circulation elle-même sans, comme on le fait d'habitude, diviser par 4π ».

Et voici maintenant des raisons pratiques :

« La suppression contre nature du 4π dans les formules de la force centrale, où il doit être, les introduit dans le sang où il se multiplie et détruit tout le corps de la théorie électromagnétique. Les quelques formules où 4π est à sa place sont surtout scolaires et peu utilisées ; les nombreuses formules d'où il est enlevé sont au contraire des formules usuelles de la technique et de la pratique de la théorie. Un praticien de la théorie les extirperait, rien que pour éviter les ennuis qui en résultent, même s'il faisait abstraction du désir de voir les choses à leur place. De plus, on doit remarquer que l'irrationalité des formules est un grand obstacle à l'intelligence claire de la théorie électromagnétique ».

Et enfin :

« Le pauvre technicien se plaint de ne pouvoir passer de la force magnétomotrice aux ampères-tours sans qu'un stupide coefficient 4π encombre le chemin ».

Le système de Heaviside

Mais quelle rationalisation adopter ? Car il y a bien des manières de supprimer les 4π dans les quelques formules où ils sont gênants. Heaviside n'a pas manqué d'en proposer une, qui consiste en une modification du système d'unités.

Distinguons les entités par l'indice i dans le système non rationalisé, par l'indice r dans le système rationalisé.

En conséquence de ses considérations sur la mesure de l'intensité des sources, Heaviside introduit le facteur 4π en dénominateur des lois électrique et magnétique de Coulomb rationalisées. Donc

$$F = \frac{1}{4\pi \epsilon_r} \frac{q^2 r}{r^2} = \frac{q^2 i}{\epsilon_i r^2}, \quad F = \frac{1}{4\pi \mu_r} \frac{m^2 r}{r^2} = \frac{m^2 i}{\mu r^2}.$$

Il pose :

$$\epsilon_r = \epsilon_i = \epsilon, \quad \mu_r = \mu_i = \mu$$

et déduit des expressions précédentes

$$q_r = \sqrt{4\pi} q_i, \quad m_r = \sqrt{4\pi} m_i$$

D'autre part les 4π doivent disparaître des équations (13) et (16).

Donc

$D_r = \sigma_r$, $D_i = 4\pi \sigma_i$, $\text{curl } H_r = i_r$, $\text{curl } H_i = 4\pi i_i$, d'où l'on déduit en divisant membre à membre et

tenant compte de ce que σ et i sont modifiés comme q par la rationalisation :

$$\frac{D_r}{D_i} = \frac{1}{4\pi} \frac{\sigma_r}{\sigma_i} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}}, \quad \frac{H_r}{H_i} = \frac{1}{4\pi} \frac{i_r}{i_i} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}}$$

Toutes les autres transformations s'ensuivent et l'on peut satisfaire au système d'équations ainsi obtenues en modifiant le système d'unités C.G.S. électromagnétiques suivant la règle que les rapports d'unités sont en raison inverse des rapports de grandeurs. De sorte que [] signifiant « unité de », on a

$$\sqrt{4\pi} = \frac{[E_r]}{[E_i]} = \frac{[D_r]}{[D_i]} = \frac{[V_r]}{[V_i]} = \frac{[H_r]}{[H_i]} = \frac{[B_r]}{[B_i]} = \frac{[L_i]}{[L_r]} = \frac{[Q_i]}{[Q_r]}$$

$$4\pi = \frac{[R_r]}{[R_i]} = \frac{[L_r]}{[L_i]} = \frac{[C_i]}{[C_r]}$$

En ce qui concerne les unités pratiques, HEAVISIDE préconise, dans une lettre du 18 juillet 1892 à Lodge (Electromagnetic theory, vol. II, p. 278) un système dans lequel les nouvelles unités pratiques ne différaient des unités rationalisées ci-dessus que par le facteur 10^8 .

Résistance $10^8 [R_r] = \frac{4\pi}{10}$ ohm

Inductance $10^8 [L_r] = \frac{4\pi}{10}$ henry

Capacité $10^{-8} [C_r] = \frac{10}{4\pi}$ farad

Intensité de courant $[I_r] = \frac{10}{\sqrt{4\pi}}$ ampère

Quantité d'électricité $[Q_r] = \frac{10}{\sqrt{4\pi}}$ coulomb

Potentiel $10^8 [V_r] = \sqrt{4\pi}$ volt

Energie 10^8 erg = 10 joule

Puissance 10^8 erg par sec = 10 watt

tandis que le système pratique d'unités actuel utilise les puissances de 10 suivantes : 10^{-1} , 10^7 , 10^8 , 10^9 , 10^{-9} .

Et HEAVISIDE conclut : « Deux choses, sur lesquelles j'insiste : d'abord, rationaliser les unités, ensuite, employer un multiplicateur unique, par exemple 10^8 ».

Après Heaviside

Après plus de cinquante ans, toute la partie critique de l'œuvre de HEAVISIDE est encore vivante, et ses arguments sont sans cesse repris par ceux, de plus en plus nombreux, qui préconisent la rationalisation.

Mais, dès l'époque de HEAVISIDE, la grosse objection était l'impossibilité de renoncer aux unités pratiques (Voir lettre de LODGE. Nature, 28 juillet 1892, p. 292).

La solution de conciliation a été trouvée par ASCOLI et GIORGI. Dans un rapport au Congrès international des Electriciens (Saint-Louis, 1901),

ASCOLI a démontré que, si l'on renonce à égaler à l'unité la perméabilité magnétique du vide, il existe une série théoriquement infinie de systèmes d'unités satisfaisant aux équations de définition ordinaires (non rationalisées) de l'électricité, dans lesquels les unités électriques et magnétiques pratiques étant conservées l'unité de longueur égale 10^l fois et l'unité de masse 10^m fois l'unité C.G.S. électromagnétique correspondante, l et m étant liés par la relation

$$2l + m = 7$$

Les combinaisons suivantes ont été proposées : (μ'_0 et ϵ'_0 étant la perméabilité magnétique et la constante diélectrique du vide dans le nouveau système)

	l	Unité de longueur	m	Unité de masse	μ'_0	ϵ'_0
MAXWELL (1881) ...	9	10^{-9} cm.	-11	10^{-11} gr.	1	$\frac{1}{9 \cdot 10^9}$
GIORGI (1904) ...	2	m	3	kg	10^{-7}	$\frac{1}{9 \cdot 10^9}$
BLONDEL (1916) ...	0	cm.	7	10^7 gr.	10^{-9}	$\frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$

La combinaison adoptée par GIORGI utilise comme étalon de longueur et de masse les étalons internationaux conservés au Bureau international des Poids et Mesures, unités d'un ordre de grandeur commode. La seule objection sérieuse qui puisse lui être faite est que la masse spécifique de l'eau égale à l'unité dans le système C.G.S. et de dimensions ML^{-3} est, dans le système Giorgi

$$10^{-3} 10^{3 \times 2} = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

La commission électrotechnique internationale (1935) passa sur cet inconvénient et adopta le système GIORGI.

Reste la question de la rationalisation. Sur ce point, la commission électrotechnique internationale n'a pas pris de décision et a laissé les electriciens libres d'adopter l'une ou l'autre méthode.

Le système de rationalisation actuellement le plus usité comporte l'utilisation des unités du système MKS GIORGI (mètre, kilogramme, seconde, unités électriques et magnétiques pratiques définies par les organismes internationaux compétents), fait disparaître le facteur 4π des équations MAXWELL, de l'expression de l'énergie électrique en fonction de l'intensité de champ et de l'induction électrique, ainsi que de l'énergie magnétique en fonction de l'intensité de champ et de l'induction magnétique ; enfin conserve la relation

$$\epsilon \mu c^2 = 1$$

Il faut, pour satisfaire à ces conditions, substituer à l'induction électrique et à l'intensité de champ

magnétique des formules non rationalisées, l'induction électrique et l'intensité de champ magnétique rationalisées, suivant les formules

$$D_i = 4 \pi D_r, \quad H_i = 4 \pi H_r \quad (19)$$

tandis que E , B , ρ , i restent inchangés.

$$E_i = E_r, \quad B_i = B_r, \quad \rho_i = \rho_r, \quad i_i = i_r \quad (20)$$

Ceci admis, plusieurs variantes sont encore possibles. la plus généralement utilisée (et qui a du reste été proposée par GIORGI dès 1901) part des relations

$$D_r = \epsilon_r E_r, \quad B_r = \mu_r H_r \quad (21)$$

expressions qui, jointes aux relations (19) et à

$$D_i = \epsilon_i E_i, \quad B_i = \mu_i H_i$$

donnent

$$\epsilon_i = 4 \pi \epsilon_r, \quad \mu_i = \frac{\mu_r}{4 \pi}$$

Si l'on maintient l'expression de la force magnétique

$$F = H_i m_i = H_r m_r$$

m_r étant la masse magnétique, il vient

$$m_i = \frac{m_r}{4 \pi}$$

et, ceci admis, toutes les équations électriques et magnétiques s'écrivent sans difficulté (1).

Ainsi, ce n'est pas suivant la variante indiquée par HEAVISIDE que tend à se faire la rationalisation qu'il a réclamée avec tant d'ardeur et d'opiniâtreté.

Mais sa critique de la forme classique des équations de l'électromagnétisme a conservé toute sa valeur. Il a vu clair dès le début et donné aux partisans de la rationalisation des armes qui ne sont pas émoussées. La rationalisation connaît un éclatant succès en Amérique et en Allemagne. Elle vient d'être officiellement adoptée en Suisse. La Société Française des Electriciens a, en 1948, émis le vœu qu'elle soit prescrite par les organismes internationaux compétents. Ainsi s'affirme le succès des idées de HEAVISIDE.

Maintenant que le système MKS GIORGI ayant été recommandé par la commission électrotechnique internationale, la réforme peut se faire sans se heurter à cette quasi-impossibilité qu'était le changement des unités pratiques, l'hommage qui serait le plus agréable au précurseur ne serait-il pas de la faire aboutir dans le plus bref délai et, ainsi, de simplifier le travail des ingénieurs et chercheurs, de supprimer l'intolérable confusion présente et de mettre fin à une discussion qui, depuis plus de cinquante ans, est pour les théoriciens de l'électricité une véritable obsession ?

(1) — Voir par exemple — L. BOUTHILLON — Sur la rationalisation des unités et des formules de l'électricité et du magnétisme. — Le pour et le contre — Bulletin de la Société Française des Electriciens, Juillet 1949, 6^e série, t. IX, p. 351.

LES ONDES CENTIMÉTRIQUES ET LA STRUCTURE MOLÉCULAIRE

PAR

M. René FREYMANN

Faculté des Sciences de Rennes

La présence dans l'atmosphère de molécules d'eau, d'oxygène..., est une cause d'absorption, parfois fort gênante, des ondes centimétriques. Par ailleurs, l'absorption vers 1,25 cm de la molécule d'ammoniac est utilisée comme étalon de fréquence. L'auteur se propose d'indiquer l'interprétation que donne la Physique Moléculaire des diverses bandes d'absorption ultrahertziennes : Bandes de Debye, bandes de rotation, bandes d'inversion de Dennison, bandes dipolaires magnétiques de Van Vleck. Ces phénomènes d'absorption fournissent au Physicochimiste un précieux moyen d'analyse des molécules qui utilise les techniques d'étude des ondes centimétriques.

Le développement de la technique des ondes centimétriques a cette curieuse conséquence d'intéresser les radioélectriciens à des problèmes de Physique Moléculaire, voire même de Chimie, et, inversement, à des physicochimistes, d'utiliser des montages ultrahertziens.

En effet, l'existence de l'absorption des ondes centimétriques par l'eau et l'oxygène atmosphériques n'a pu être interprétée que par des données de Physique Moléculaire. C'est également cette dernière qui a permis de prévoir et d'interpréter les bandes d'inversion de l'ammoniac utilisées aujourd'hui comme étalon de fréquence.

Et, actuellement, une nouvelle application des techniques centimétriques se développe rapidement : L'analyse chimique par spectrométrie ultrahertziennne, procédé d'une extraordinaire précision qui permet notamment l'identification des composés chimiques et l'étude des isotopes. C'est cette application que nous voudrions souligner plus particulièrement afin de montrer aux radioélectriciens français l'intérêt que présente la construction d'appareils d'analyse chimique par l'ultrahertzien.

Ce but nous conduira donc à ne décrire qu'assez sommairement les techniques utilisées et insister davantage sur les données concernant la structure moléculaire et l'analyse chimique ultrahertziennne ; ceci permettra, nous l'espérons, de donner aux spécialistes des ondes centimétriques un aperçu d'ensemble sur ces problèmes. Une étude plus détaillée des techniques spectrométriques a d'ailleurs été développée par Le Bot (5) et l'on sait que les publications du M. I. T. fournissent de nombreux détails sur les techniques centimétriques. Pour les problèmes moléculaires nous renvoyons à un remarquable mémoire de Gordy (2), aux livres de Herzberg (4) et à l'article de M. et R. Freymann (1). Nous laisse-

rons de côté la question du paramagnétisme nucléaire traitée par ailleurs par Soutif (6). Rappelons enfin que Goudet et Voge (3) ont fait un exposé d'ensemble sur la propagation dans l'atmosphère.

I. APERÇU SUR LES TECHNIQUES UTILISÉES.

On sait qu'un diélectrique (que nous supposons n'être ni para ni ferromagnétique) est caractérisé par sa constante diélectrique complexe $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$. ϵ' correspond à la constante diélectrique réelle et ϵ'' à l'absorption. Rappelons que l'absorption peut d'ailleurs être définie indifféremment par : l'absorption ϵ'' ; l'angle de perte $\tan \delta$, l'indice d'absorption κ , le coefficient d'extinction $n \kappa$, le coefficient d'atténuation α (voir par ex. Jackson (*Trans. Faraday Soc.* 1916, 42, 91)).

Les recherches de structure moléculaire par l'ultrahertzien consisteront donc à mesurer ϵ' et ϵ'' en fonction de la fréquence.

Le problème se pose d'ailleurs de façon différente suivant que la substance examinée est à l'état solide ou liquide d'une part, à l'état de vapeur sous faible pression d'autre part : Dans le premier cas il faut mesurer ϵ' et ϵ'' ; dans le second, puisque ϵ' est voisin de 1, il suffit de mesurer l'absorption ϵ'' . Les montages seront totalement différents dans ces deux cas.

1°) Un procédé de mesure de ϵ' et ϵ'' pour les solides et liquides : La méthode des ondes stationnaires.

La méthode des ondes stationnaires a été mise au point par Benoit et par Roberts -Von Hippel ; Elle peut utiliser, comme l'ont fait tout d'abord

ces auteurs, une ligne coaxiale ; mais nous décrirons seulement le procédé employant le guide d'onde (c'est celui que nous utilisons à Rennes, pour 10 et 3 cm.).

Un klystron émet une onde incidente (dont la longueur d'onde est mesurée à l'ondemètre). Celle-ci est réfléchie sur le court circuit placé en bout de ligne, après traversée de la substance étudiée. L'onde

fermé par des fenêtres de mica. Après la cuve, on place le détecteur D_1 , relié à un galvanomètre et un oscilloscope. L'autre trajet comporte essentiellement un atténuateur calibré et un détecteur D_2 , relié, en opposition avec D_1 , à un galvanomètre (et à l'oscilloscope). A l'aide de l'atténuateur calibré, on mesure, pour chaque fréquence de l'oscillateur, l'intensité avec cuve vide, puis avec cuve remplie du gaz étudié.

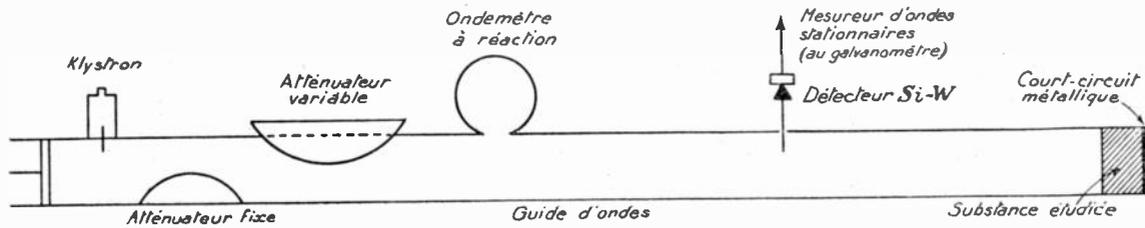


FIG. 1. — Mesure de ϵ' et ϵ'' pour les solides et liquides par la méthode des ondes stationnaires

incidente et les ondes réfléchies créent un système d'ondes stationnaires. A l'aide du mesureur d'ondes stationnaires, on détermine : 1°) Le déplacement Δ des minima provenant de l'introduction de la substance. 2°) Le rapport E_{\min}/E_{\max} , des potentiels aux minima et maxima. Le calcul permet de déduire ϵ' et ϵ'' de Δ et E_{\min}/E_{\max} .

On obtient donc, point par point, la courbe $\epsilon'' = f(\nu)$, pour tout le domaine de variation de fréquence du klystron.

Lorsque l'on veut étudier seulement une faible étendue du spectre (examen de la structure hyperfine), on observe directement la courbe $\epsilon'' = f(\nu)$ sur l'oscilloscope, en modulant en fréquence le klystron

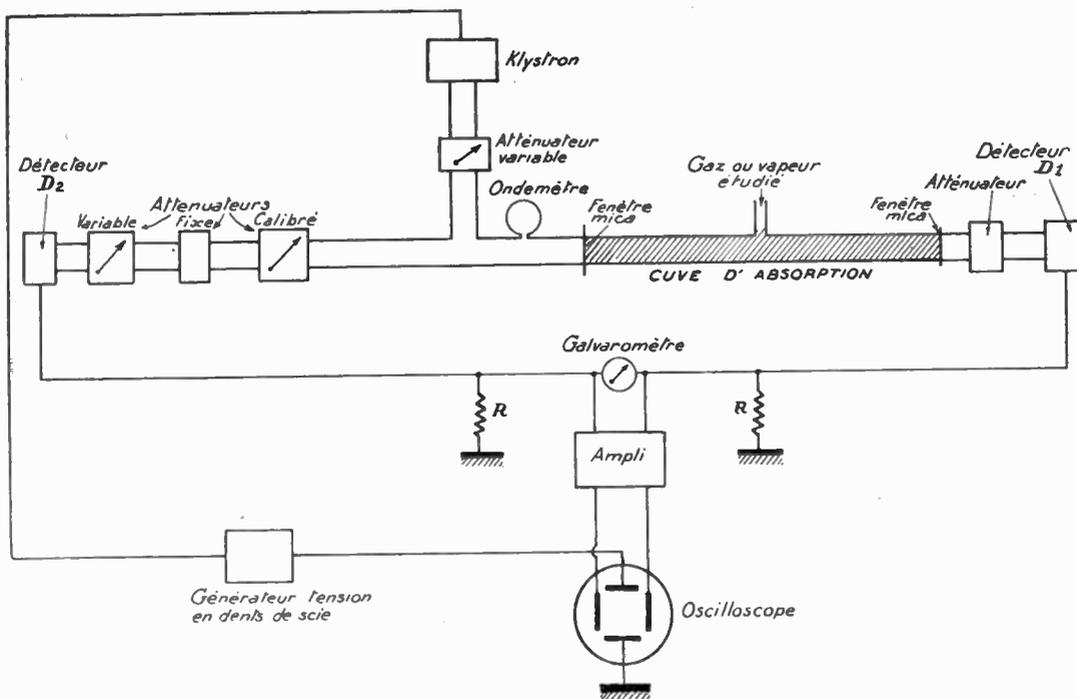


FIG. 2. — Mesure de l'absorption des gaz et vapeurs sous faible pression.

2°) Un procédé de mesure de l'absorption par les vapeurs sous faible pression

Parmi les nombreux dispositifs utilisés, nous décrivons celui de Good particulièrement typique et simple ; nous ne parlerons pas de l'ingénieux dispositif de modulation par effet Stark, bien que son emploi soit très fréquent aujourd'hui.

On fait suivre aux ondes provenant d'un même klystron (de fréquence réglable), deux trajets distincts : l'un renferme la cuve d'absorption constituée par un guide d'ondes de 1 ou 2 mètres de long,

l'autre est un guide d'ondes simple (on applique pour cela une tension en dents de scie à son réflecteur.)

II. QUELQUES NOTIONS SUR LA QUANTIFICATION DES SPECTRES MOLÉCULAIRES ET SUR LES MOMENTS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES MOLÉCULAIRES

1° Les nombres quantiques moléculaires

L'étude de l'atome a rendu nécessaire (et classique) la notion de quantification pour les spectres ato-

miques (nombre quantique principal n , nombre quantique secondaire l , nombre quantique magnétique m , nombre quantique de spin de l'électron s).

De même, de nombreux phénomènes liés à la molécule sont quantifiés (rappelons cependant que ce n'est pas le cas des mouvements de translation de la molécule). Indiquons succinctement ce que sont ces phénomènes quantifiés et quels sont les nombres quantiques moléculaires correspondants.

A) Toute molécule linéaire (celle de chlorure d'iode $I-Cl$ par exemple que nous étudierons plus loin), effectue une *rotation* sur elle-même, autour d'un axe perpendiculaire à la direction des atomes I et Cl . Les fréquences de rotation ne peuvent être quelconques ; elles sont quantifiées, et, comme nous le verrons, multiples de $J + 1$; J , nombre entier, est appelé *nombre quantique de rotation*.

Pour les molécules plus complexes, CH_3Cl ou H_2O par exemple, qui présentent plusieurs axes de rotation possibles, on introduit les deux nombres quantiques de rotation J et K .

B) Outre cette rotation, il s'effectue dans toute molécule, $I-Cl$ par exemple, une *vibration* mutuelle des atomes, les uns par rapport aux autres (ex. : $I \leftrightarrow Cl$). Ici encore, les fréquences de vibration ne peuvent être quelconques, mais multiples d'un nombre entier v , *nombre quantique de vibration*. Ces fréquences de vibration, (qui se trouvent dans le spectre infrarouge) interviennent, comme effet du second ordre, pour perturber le spectre de rotation, ultrahertzien ; nous n'en parlerons pas dans la suite de cet article.

C) Les divers électrons de la molécule sont caractérisés par leur nombre quantique de spin qui correspond à la quantification de la *rotation de l'électron sur lui-même*. La structure électronique de la molécule sera donc caractérisée par le *nombre quantique total de spin des électrons* S .

D) Chacun des noyaux des atomes constituant la molécule est caractérisé par la *rotation du noyau sur lui-même* ; il lui correspond le *nombre quantique de spin du noyau* I . (on utilise également le nombre quantique $F = J + I$).

E) Quand une molécule est soumise à un champ extérieur, électrique ou magnétique (effet Stark ou effet Zeeman), elle ne peut prendre, par rapport à ce champ, que certaines orientations privilégiées, quantifiées. Cette orientation dans un *champ extérieur* est caractérisée par le *nombre quantique magnétique* M .

On retrouve ces nombres quantiques (J, K, v, S, I, M , dans toutes les études de molécules par l'ultrahertzien : (J, K) pour les bandes de rotation, v , pour l'influence de la vibration sur la rotation, S pour les bandes dipolaires magnétiques de l'oxygène, I pour la structure hyperfine des bandes de rotation, M pour l'effet Stark et l'effet Zeeman des bandes de rotation.

2°) Moments électriques et magnétiques

L'intensité des bandes d'absorption ultrahertzienne est directement liée aux *moments électrique ou magnétique des molécules*. Nous rappellerons donc les définitions suivantes :

Moment électrique dipolaire. Toute molécule non symétrique, $I-Cl$ par exemple est assimilable à deux charges électriques $+e$ et $-e$, distantes de l . La quantité $\mu = el$ est le moment électrique dipolaire de la molécule. Pour une molécule symétrique, la molécule d'oxygène $O = O$ par exemple, le moment dipolaire est nul.

Moment électrique quadripolaire. Le noyau d'un atome n'a pas de moment dipolaire, mais on lui attribue un moment électrique quadripolaire Q (environ 10^{-6} fois plus petit que μ) : il correspond au moment d'un ensemble de 4 charges $+e, -e, +e, -e$, convenablement disposées.

Moment magnétique dipolaire. Nous venons de voir que la molécule symétrique d'oxygène $O = O$, a un moment électrique dipolaire nul. Mais ce corps est paramagnétique et on lie à ses propriétés magnétiques le moment *magnétique* dipolaire ; c'est ce moment qui intervient dans la théorie de l'absorption de l'oxygène vers 0,5 cm.

III. COMMENT LA PHYSIQUE MOLÉCULAIRE INTERPRÈTE-T-ELLE LES DIVERSES BANDES D'ABSORPTION ULTRA-HERTZIENNES ?

1°) Les diverses bandes d'absorption.

Les diverses bandes d'absorption observées dans l'ultrahertzien (et éventuellement vers les fréquences plus basses) peuvent avoir des *origines entièrement différentes*. Le Tableau résume les caractères des diverses bandes que nous étudierons plus loin.

2°) Bandes d'orientation dipolaire de Debye

Les liquides et solides sont caractérisés par des bandes occupant un très large intervalle spectral ; selon la nature du corps examiné et selon la tempéra-

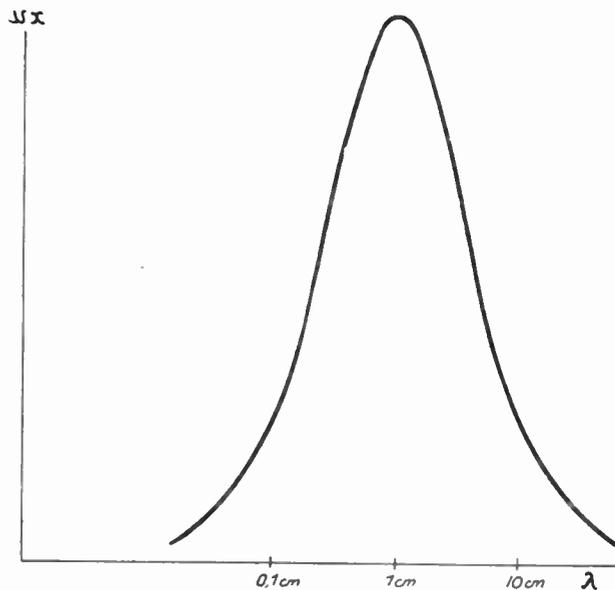


Fig. 3. — Eau, liquide. Bande de Debye.

ture, les bandes de Debye peuvent se trouver aussi bien vers quelques kilomètres que vers quelques centimètres de longueur d'onde. Les figures 3 et 4 mon-

trent la bande de Debye, d'une part pour l'eau liquide vers $\lambda = 1$ cm., d'autre part pour une huile de transformateur, vers quelques mètres.

Des phénomènes semblables existent pour les

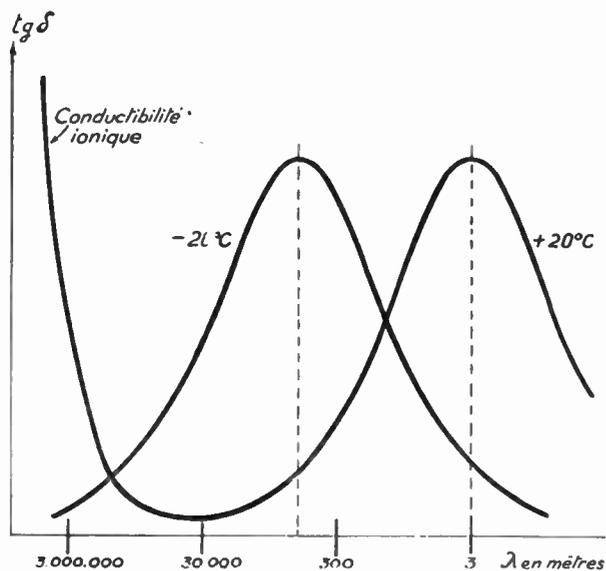


FIG. 4. — Bande de Debye. Absorption d'une huile de transformateur en fonction de la fréquence et de la température

solides, la glace par exemple, pour laquelle la bande de Debye s'observe vers quelques kilomètres de longueur d'onde.

Ces bandes sont connues depuis longtemps, et

Debye en a donné l'interprétation théorique : dans un champ de très basse fréquence, les molécules dipolaires peuvent s'orienter sans difficulté et suivent sans retard les variations du champ. Par contre, lorsque la fréquence est extrêmement élevée, les molécules ne peuvent s'orienter et se comportent donc comme des molécules non polaires. Pour une fréquence intermédiaire entre les très basses fréquences et les fréquences très élevées, les molécules s'orientent, mais sont freinées par la viscosité du milieu (action des molécules voisines). A ce freinage correspond une absorption d'énergie électrique que traduit la bande de Debye. Ajoutons que des théories sensiblement différentes ont été proposées par Onsager et par Bauer.

Si ces bandes de Debye n'offrent qu'un intérêt limité pour le chimiste, il convient de souligner leur importance dans l'étude des pertes des diélectriques utilisés en électrotechnique et en radio (Figure 4). La bande de Debye de l'eau intervient également dans l'absorption des ondes centimétriques par l'eau atmosphérique à l'état liquide.

3) Bandes de rotation

Les bandes de rotation jouent un rôle particulièrement important dans les études chimiques par l'ultra-hertzien. Pour en expliquer l'origine, nous prendrons tout d'abord l'exemple particulièrement simple de la molécule linéaire $I-Cl$ (chlorure d'iode). Puis nous considérerons des molécules plus compliquées : $CH_3 Cl$, du type toupie symétrique et $H_2 O$ du type toupie asymétrique.

TABLEAU I

BANDES DIPOLAIRES ÉLECTRIQUES

BANDE DIPOLAIRE MAGNÉTIQUE

	Bandes d'orientation dipolaire (DEBYE)	Bandes de rotation	Bandes d'inversion (DENNISSON)	Bande dipolaire magnétique (Van VLECK)
Etat de la substance	Solide ou liquide	Gaz et vapeurs	Gaz (NH_3)	Gaz (O_2)
Région spectrale	Quelques km. à 1 cm. suivant la substance et la température	De 10 cm à quelques mm.	Vers 1 cm. (NH_3)	Vers 0,5 cm (O_2)
Largeur des bandes	Très large intervalle spectral	Faible largeur spectrale (structure)	Faible largeur spectrale (structure)	Faible largeur spectrale (structure)
Structure	Bande très large sans structure	Structure fine liée à la rotation (J. et K.) Structure isotopique Structure hyperfine liée au noyau (I) Décomposition par effets Stark et Zeeman (M)		(S)
Applications	Etude des pertes des diélectriques utilisées en électro et radio-technique (huiles de transformateurs, matières plastiques,...)	Absorption des ondes centimétriques par la vapeur d'eau atmosphérique. Applications chimiques : Distances entre atomes dans la molécule ; angles de valence ; détermination du spin du noyau. Identification et dosage des composés chimiques. Détection des isotopes naturels et radioactifs		Absorption des ondes millimétriques par l'oxygène atmosphérique.

A) LA MOLÉCULE LINÉAIRE I-Cl.

a) Origine de la bande de rotation.

La physique moléculaire considère que la molécule I-Cl peut tourner sur elle-même, autour d'un axe perpendiculaire à la direction I-Cl, passant par le centre de gravité G. On désigne par r_1 et r_2 les distances des masses m_1 et m_2 au centre de gravité G (la distance I-Cl = $r = r_1 + r_2$).

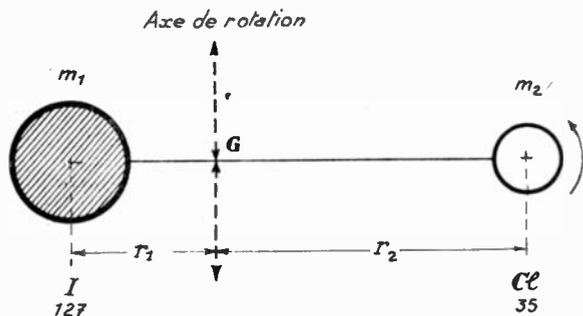


FIG. 5. -- Le rotateur linéaire I-Cl.

La mécanique ondulatoire montre que l'énergie de ce « rotateur linéaire » est donnée par :

$$E = \frac{h^2}{8 \pi^2 I_B} J (J + 1)$$

h = constante de Planck ; J nombre quantique rotationnel ; I_B = moment d'inertie par rapport à l'axe.

Par suite, la fréquence ν de rotation correspond au saut quantique de l'énergie de la molécule, de la valeur E'' correspondant au nombre quantique J'' , à la valeur E' correspondant au nombre quantique J' :

$$\nu = \frac{E' - E''}{h} = \frac{h}{8 \pi^2 I_B} [J' (J' + 1) - J'' (J'' + 1)]$$

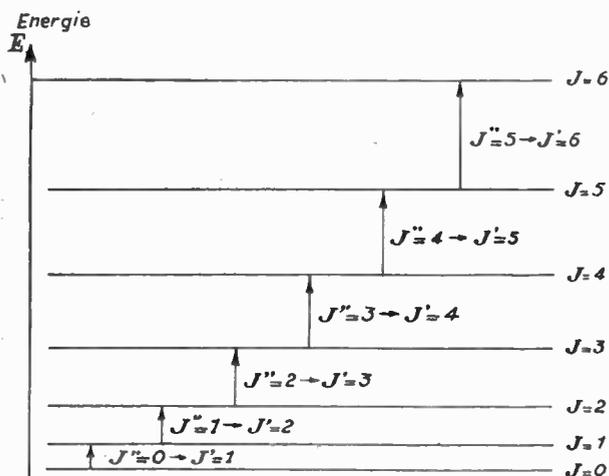


FIG. 6. -- Niveaux rotationnels de la molécule linéaire I-Cl.

A cette fréquence mécanique de rotation correspond la fréquence ultrahertzienne d'absorption (en cycles/sec.).

La mécanique ondulatoire montre en outre la relation suivante entre J' et J'' (règle de sélection) :

$$J' = J'' + 1$$

Par suite, les fréquences d'absorption ultrahertziennes sont données par :

$$\nu = \frac{h}{8 \pi^2 I_B} [2 (J'' + 1)]$$

En posant $J'' = J$ et $B = h / 8 \pi^2 c I_B$ (c = vitesse de la lumière), on a finalement $\nu = 2 Bc (J + 1)$.

En portant en ordonnées les valeurs de l'énergie E , on obtient (figure 6) les divers sauts possibles correspondant aux fréquences d'absorption de la molécule : $J'' = 0 \rightarrow J' = 1$; $J'' = 1 \rightarrow J' = 2$; $J'' = 2 \rightarrow J' = 3$; $J'' = 3 \rightarrow J' = 4$, etc...

Or l'on sait que le moment d'inertie $I_B = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 = \mu r^2$ ($1/\mu = 1/r_1 + 1/r_2$, $r = r_1 + r_2$). On pourra donc calculer les fréquences de rotation si l'on connaît la distance des atomes I et Cl.

Pour $I^{127} Cl^{35}$ par exemple, en supposant que $r = 2,30$ Angstroms (données optiques) on obtient :

$$\nu = 2 \frac{6,626 \cdot 10^{-27} \times 6,024 \cdot 10^{23}}{8 \pi^2 \left[\frac{1}{\frac{1}{35} + \frac{1}{127}} \right] 2,30 \cdot 2,30 \cdot 10^{-16}} [J + 1]$$

($N = 6,024 \times 10^{23}$ nombre d'Avogadro).

On trouve $\nu = 6.965$ Mc. pour le saut $0 \rightarrow 1$, 13930 pour $1 \rightarrow 2$, 20895 pour $2 \rightarrow 3$, 27860 pour $3 \rightarrow 4$, etc...

En 1948, WEIDNER a montré l'existence de la bande $0 \rightarrow 1$ pour le chlorure d'iode, vers 4,3 cm. : 6980 Mc. pour Cl = 35. TOWNES, MERRITT et WRIGHT ont décelé, vers 27.300 Mc le saut $3 \rightarrow 4$.

Inversement, — et c'est ce que l'on fera pratiquement —, on déduira de la valeur trouvée expérimentalement pour ν la vraie valeur de la distance des atomes I et Cl (que nous avons supposé dans notre calcul être de 2,30 Angstroms).

b) Etude des isotopes.

On sait que le chlore présente naturellement deux isotopes de masses respectives 35 et 37. Si l'on reprend le calcul précédent (avec $r = 2,30$ Angstroms), on trouve $\nu = 6965$ et $\nu = 6670$. WEIDNER a trouvé expérimentalement 6980 et 6681 Mc. On voit que la grande précision des mesures (on atteint assez aisément 1 mégacycle) permet avec une facilité incomparable, de distinguer les bandes correspondant à chacun des isotopes ; ceci fait comprendre l'intérêt considérable de l'ultrahertzien pour la détection des isotopes (naturels ou radioactifs).

c) Etude du noyau de l'atome (spin du noyau et moment quadripolaire du noyau).

Un examen assez grossier des spectres permet donc de déceler, pour $I Cl^{35}$, les bandes $0 \rightarrow 1$ vers 6980 Mc. et $3 \rightarrow 4$ vers 27300 Mc. Mais, pour ce saut $3 \rightarrow 4$, TOWNES, MERRITT et WRIGHT ont été plus loin : Ils ont examiné la structure hyperfine de cette bande et l'ont résolue en une vingtaine de composantes (figure 7) ; pour $I Cl^{37}$ cette étude n'a pas encore été faite.

Les auteurs américains ont montré que cette structure hyperfine est liée au moment quadripolaire et au spin des noyaux I et Cl. On conçoit que la struc-

ture hyperfine permette d'obtenir de précieuses données sur le noyau des atomes.

d) Effets Stark et Zeeman.

Un champ électrique ou un champ magnétique doit décomposer les raies ultrahertziennes de $I Cl$: effets Stark et Zeeman (nombre quantique magné-

(On pose $B = h/8 \pi^2 c I_B$ et $A = h/8 \pi^2 c I_A$; J et K nombres quantiques). Les niveaux d'énergie correspondants sont représentés sur la partie gauche de la figure 9.

Les bandes d'absorption correspondent à des sauts entre ces divers niveaux. On comprend que l'introduction du second moment d'inertie (et par suite de

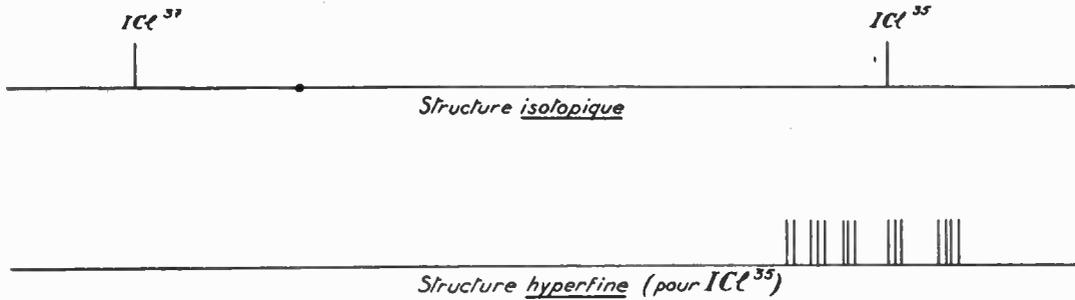


Fig. 7. — Structure isotopique et structure hyperfine pour le chlorure d'iode (Saut $J'' = 3 \rightarrow J' = 4$)

tique M). A notre connaissance, ces effets n'ont pas encore été étudiés pour $I Cl$; mais ils ont été observés pour de nombreuses autres molécules (OCS, NH_3, \dots).

B) LA MOLÉCULE TOUPIE SYMÉTRIQUE $CH_3 Cl$.

La molécule de chlorure de méthyle, $CH_3 Cl$, peut également effectuer des mouvements de rotation ;

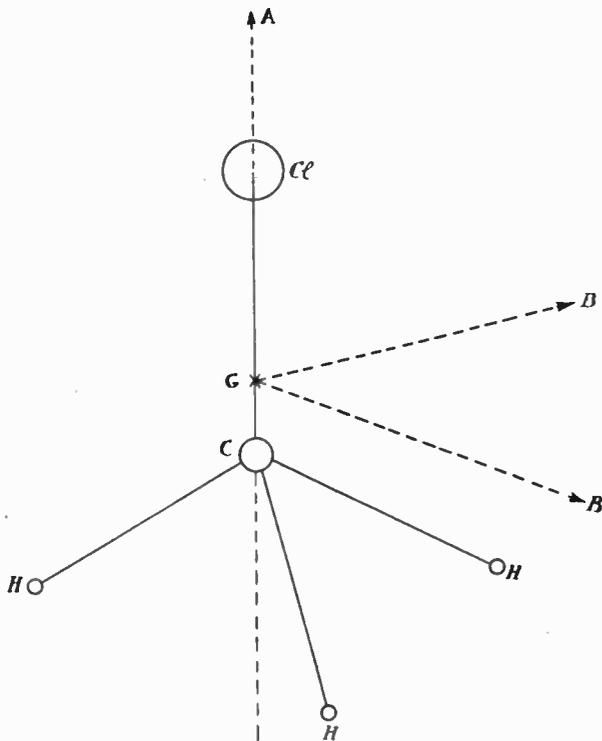


Fig. 8. — La molécule $CH_3 Cl$ du type toupie symétrique.

K) rende le spectre de $CH_3 Cl$ plus complexe que celui de $I Cl$. Mais, comme pour $I Cl$, on observe les causes supplémentaires de complexité : La structure isotopique, la structure hyperfine, les effets Stark et Zeeman.

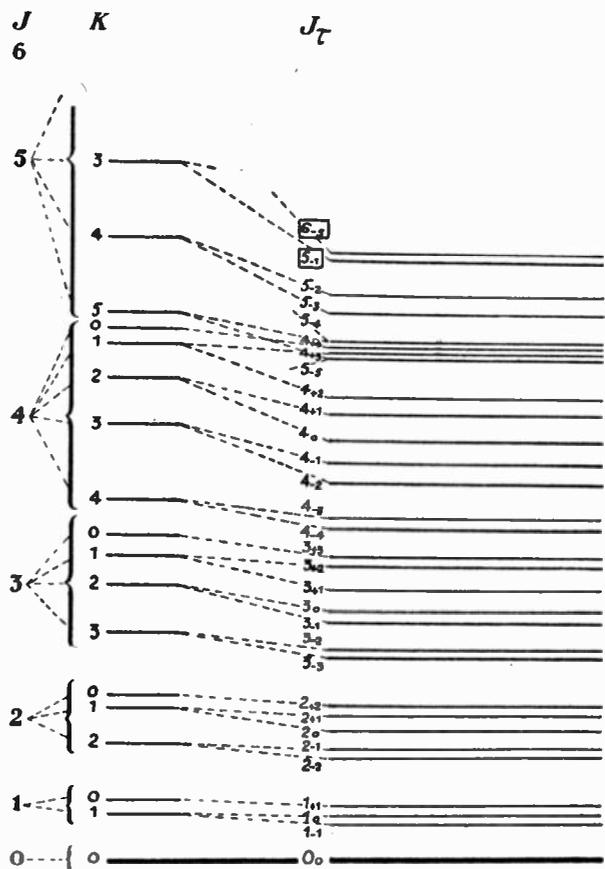


Fig. 9. — Les niveaux d'énergie rotationnels des molécules $CH_3 Cl$ (toupie symétrique) et $H_2 O$ (toupie asymétrique).

pour les étudier, on assimile cette molécule à une toupie ayant pour axe de symétrie la direction $C-Cl$; cette toupie a deux moments d'inertie I_A (direction CCl) et I_B (direction perpendiculaire à $C-Cl$).

On montre que l'énergie du rotateur toupie symétrique $CH_3 Cl$ est :

$$E(J, K) = hc [B J (J + 1) + (A - B) K^2]$$

C) LA MOLÉCULE TOUPIE ASYMÉTRIQUE $H_2 O$.

L'exemple de la toupie symétrique $CH_3 Cl$ va nous permettre de comprendre l'origine de l'absorption

par la vapeur d'eau atmosphérique (bandes qui interviennent dans l'emploi du Radar).

Pour la molécule H_2O (partie droite de la figure 9), on prendra comme modèle mécanique la *toupie asymétrique* ayant trois moments d'inertie I_A, I_B, I_C (et non plus deux comme pour CH_3Cl).

L'expression de l'énergie de ce rotateur asymétrique est :

$$E = hc \left[\frac{B + C}{2} J(J + 1) + \left(A - \frac{B + C}{2} \right) W_{\tau} \right]$$

$A = h/8 \pi^2 c I_A$. $B = h/8 \pi^2 c I_B$. $C = h/8 \pi^2 c I_C$. W_{τ} donné par plusieurs équations de degré inférieur ou égal à $J - 1$.

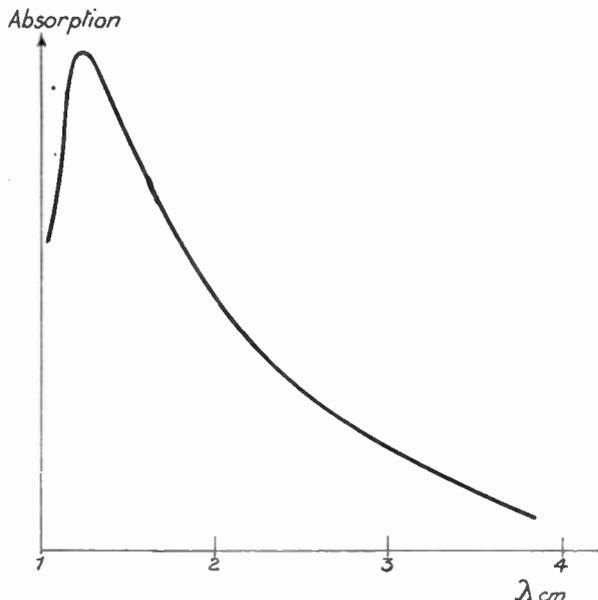


FIG. 10. — Bande d'inversion de NH_3 (sous la pression atmosphérique) d'après Cleeton et Williams.

On montre que chacun des niveaux $K = 1, K = 2, \dots$ se décompose en deux niveaux distincts, comme l'indique la figure 11 qui précise le passage des niveaux d'énergie de la molécule toupie symétrique

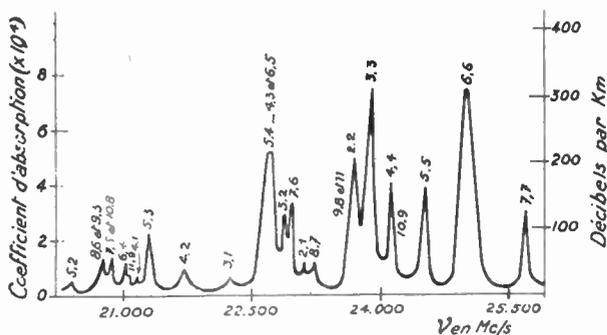


FIG. 11. — Bandes d'inversion ; rotation de la molécule NH_3 sous faible pression.

$CH_3 Cl$ à la molécule toupie asymétrique H_2O . On notera qu'une nomenclature spéciale est utilisée pour les molécules du type toupie asymétrique : au lieu de J et K on utilise J_{τ} . Le schéma des niveaux d'énergie de la molécule H_2O montre que de nombreuses bandes peuvent apparaître par saut entre deux niveaux : Soit dans l'infrarouge, soit dans la région

comprise entre l'infrarouge et l'ultrahertzien, soit dans l'ultrahertzien. C'est ainsi que le saut $5_{-1} \rightarrow 6_{-2}$ correspond à 22237 Mc/s ($\lambda = 1,35$ cm.) environ. C'est la bande d'absorption que l'on décèle pour la vapeur d'eau atmosphérique et qui constitue une cause de perte d'énergie dans la détection Radar dans la bande 1,25 cm. Bien qu'elles se trouvent dans la même région spectrale, on se gardera de confondre cette bande de rotation liée à l'absorption de la vapeur d'eau avec la bande de Debye liée à l'absorption de l'eau liquide (Fig. 3).

4°) BANDE D'INVERSION DE DENNISON (NH_3).

Un phénomène essentiellement différent de la rotation a été découvert en 1934 par CLEETON et WILLIAMS, qui confirmaient ainsi les prévisions théoriques de DENNISON. Utilisant une méthode optique (magnétron de fréquence réglable, cuve de caoutchouc remplie d'ammoniac, spectromètre à réseau, détecteur à cristal), CLEETON et WILLIAMS mesurèrent l'absorption de l'ammoniac NH_3 gazeux, sous la pression atmosphérique, de $\lambda = 1$ à $\lambda = 4$ cm. environ. Ils obtinrent la courbe d'absorption représentée sur la figure 10. On note une large bande d'absorption dont le maximum se place vers 1,25 cm.

En 1946, BLEANEY-PENROSE, GOOD, TOWNES reprirent cette étude par des moyens plus modernes (figure 2). Pour l'ammoniac sous faible pression, ils décomposèrent la large bande de CLEETON WILLIAMS en un grand nombre de composantes (figure 11).

La théorie de ce phénomène a été donnée par DENNISON : La molécule NH_3 a une structure pyramidale (Figure 12) ; l'atome d'azote, très voisin du plan des atomes d'hydrogène, peut passer de part et d'autre de ce plan : c'est le phénomène d'inversion. A ce passage de

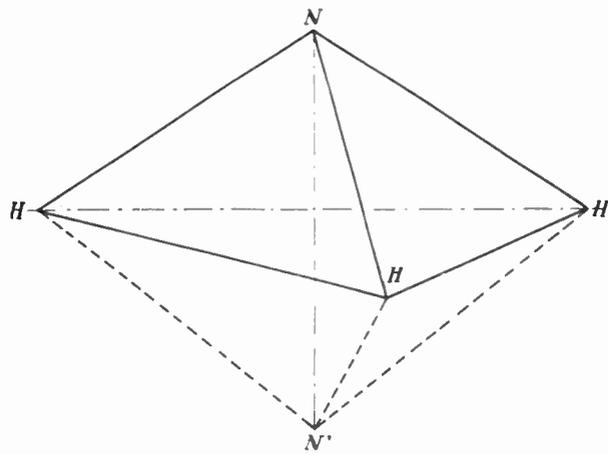


FIG. 12.

l'atome d'azote de la position N à la position N' correspond une bande d'absorption : C'est la bande d'inversion découverte par CLEETON et WILLIAMS. Quant à la résolution de cette bande en de nombreuses composantes pour les faibles pressions (fig. 11), elle s'explique aisément : la molécule NH_3 , comme la molécule $CH_3 Cl$ que nous avons étudiée plus haut, est du type toupie symétrique ; elle est animée d'un mouvement de rotation. La structure représentée

sur la figure 11 résulte de la superposition du phénomène de rotation au phénomène d'inversion. Les nombreuses composantes sont liées aux nombres quantiques J et K , comme pour CH_3Cl ; sur la figure 11, les indications telles que 3,3 ou 6,6 correspondent respectivement aux valeurs de J et K .

Par l'étude systématique de l'absorption de NH_3 en fonction de la pression, BLEANEY et PENROSE (*Proc. Phys. Soc.* 1947, 59, 418; 1948, 60, 83 et 540) ont montré que l'on passait de l'aspect de la figure 11 à celui de la figure 12 quand la pression croissait.

Ajoutons que, comme pour ICl et CH_3Cl , on a observé pour NH_3 les effets suivants: Structure isotopique (N^{14} et N^{15}); structure hyperfine (spin et moment quadrupolaire du noyau); effets Stark et Zeeman).

On sait que le spectre d'inversion de NH_3 a été utilisé comme étalon de fréquence; ceci tient au fait que les composantes indiquées sur la figure 11 sont connues avec une très grande précision et que leur fréquence reste invariable dans le temps. On connaît l'application de ce phénomène à l'horloge dite atomique — qui, ainsi que le montre ce qui précède, devrait plutôt s'appeler horloge moléculaire.

5° BANDES DIPOLAIRES MAGNÉTIQUES DE VAN VLECK (OXYGÈNE).

Une bande d'absorption d'origine entièrement différente des précédentes a été étudiée théoriquement par Van Vleck. C'est l'absorption de la molé-

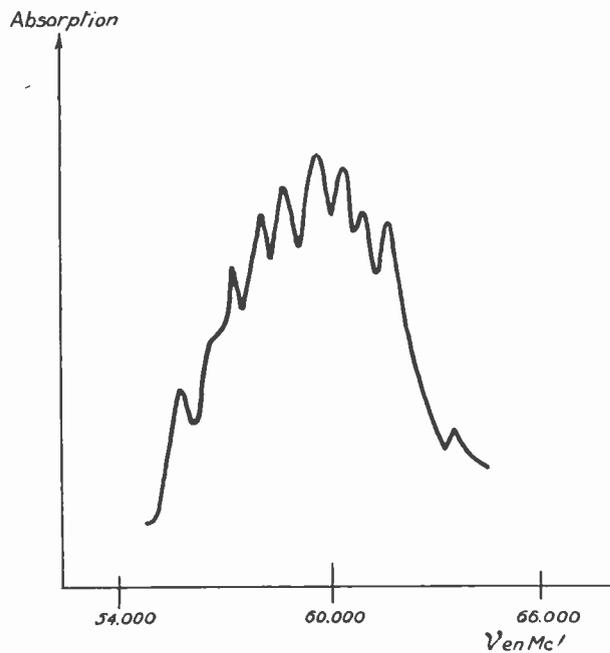


FIG. 13. — Absorption de l'oxygène pur vers $\lambda = 0,5$ cm (pression 80 cm Hg) d'après Strendberg, Meng, Ingersoll. (*Phys. Rev.* 1949, 75, 1524)

cule O_2 , liée aux propriétés magnétiques de ce corps, comme nous l'avons indiqué page 3. Elle se manifeste vers 0,5 cm, (figure 13) et c'est la cause de l'absorption dans ce domaine par l'oxygène atmosphérique.

IV. LES APPLICATIONS DE L'ABSORPTION ULTRAHERTZIENNE A LA CHIMIE

En ayant parlé plus haut, nous laisserons ici de côté le rôle des bandes ultrahertziennes dans l'absorption des ondes centimétriques et millimétriques par l'eau (liquide ou vapeur) et l'oxygène atmosphériques (détection Radar); nous ne parlerons pas non plus de l'application à l'horloge « atomique ». Mais nous insisterons, par contre, sur l'intérêt considérable de cette technique pour l'analyse chimique.

En effet, les paragraphes précédents ont montré que les composés polaires, étudiés à l'état de vapeur, présentent des bandes d'absorption caractéristiques; celles-ci permettent l'identification et le dosage précis de ces composés. C'est ce que montre la figure 14 (d'après Dailey) pour quelques uns des composés qui ont été déjà étudiés.

La grande précision avec laquelle on peut pointer la position des bandes (1 Mc/s environ) permet d'attribuer sans ambiguïté la bande à tel composé déterminé. Quand un nombre suffisant de composés aura été étudié (cette méthode d'analyse n'en est encore qu'à ses débuts), on pourra faire l'analyse rapide d'un composé chimique, déceler des impuretés dans ce composé, déterminer sa structure. Donnons quelques exemples récents de cette application:

La teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère ou d'un mélange gazeux quelconque, la présence d'ammoniac, de gaz sulfureux, etc... peuvent être étudiés par ce procédé. On peut donc prévoir des applications industrielles de ces recherches.

Dans le domaine de l'analyse chimique, un exemple frappant d'étude par l'ultrahertzien a été donné par SMITH, TIDWELL, WILLIAMS (*Phys. Rev.* 1950, 77, 420): Les chimistes connaissaient les composés BrF_3 et BrF_5 , mais se demandaient si BrF existe. L'étude de l'absorption vers 20.000 Mc/s d'un mélange de brome et de fluor à pressions égales a permis de confirmer l'existence de BrF , cette molécule ayant un spectre tout à fait typique.

Dans un ordre d'idée voisin, rappelons que l'ultrahertzien permet de déterminer avec précision les distances entre atomes dans la molécule, (à 0,01 Angstrom près environ).

Dans le domaine de l'étude des isotopes, si important aujourd'hui, l'ultrahertzien rend également de précieux services: On peut aisément distinguer l'hydrogène ordinaire de son isotope le deutérium, ou le carbone 12 de son isotope, le carbone 13 ou encore, comme nous l'avons vu, le chlore 35 du chlore 37. C'est ainsi que MATLACK, GLOCKLER, BIANCO, ROBERTS (*J. Chem. Phys.* 1950, 18, 332) ont pu distinguer les molécules suivantes:

$\text{C}^{12}\text{H}_3\text{Cl}^{35}$; $\text{C}^{12}\text{H}_3\text{Cl}^{37}$; $\text{C}^{13}\text{H}_3\text{Cl}^{35}$; $\text{C}^{13}\text{H}_3\text{Cl}^{37}$;
 $\text{C}^{12}\text{H}_2\text{DCl}^{35}$; $\text{C}^{12}\text{H}_2\text{DCl}^{37}$; $\text{C}^{12}\text{HD}_2\text{Cl}^{35}$;
 $\text{C}^{12}\text{HD}_2\text{Cl}^{37}$.

C'est également par ce procédé que DAILEY, MAYS, TOWNES (*Phys. Rev.* 1949, 76, 136) ont pu identifier les isotopes 70, 74, 76 du germanium, et STRANDBERG, WENTINK, HILL (*Phys. Rev.* 1949, 75, 827) les isotopes 74, 76, 77, 78, 80, 82 du sélénium, etc....

En ce qui concerne les isotopes radioactifs, nous citerons le travail de LIVINGSTON, GILLIAM, GORDY

(*Phys. Rev.* 1949, 76, 149) qui, par l'étude de l'iodure de méthyle, avec l'iode 127 (ordinaire) ou l'iode 129 (radioactif) ont pu distinguer ces deux isotopes et même déterminer le spin du noyau de l'iode 129.

Ajoutons que si la technique ultrahertzienne ne peut s'appliquer qu'aux molécules polaires (et uniquement aux substances gazeuses ou volatiles),

dans ce domaine, ont été presque exclusivement faits aux U. S. A. et en Grande Bretagne. En France, son développement a été retardé par la guerre ; il serait souhaitable que des appareils soient construits industriellement et non plus improvisés dans quelques rares laboratoires de Facultés. Le but de cette conférence serait atteint s'il incitait des radioélectriciens

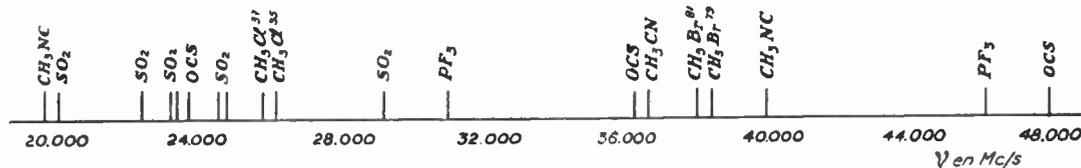


FIG. 14. — Spectre d'absorption ultrahertzien de diverses molécules.

elle présente l'immense avantage de n'utiliser que de faibles quantités de produit et, grâce au grand pouvoir de résolution, ne laisse aucune ambiguïté dans la discrimination des produits examinés. C'est dire que l'analyse chimique par l'ultrahertzien, — qui n'en est qu'à ses débuts —, est appelée à un brillant avenir. Nous pensons ne pas nous tromper en prédisant que dans quelques années elle pourra concurrencer les méthodes déjà éprouvées : Spectrographie de masse, diffraction des électrons, rayons X, spectrographie ultraviolette, infrarouge ou Raman. Mais il n'est peut être pas inutile de rappeler aux constructeurs français que, jusqu'ici, les travaux

français à s'intéresser à cette application trop peu connue encore des ondes centimétriques.

EXPOSÉS GÉNÉRAUX

- 1) M. et R. FREYMAN, *Journal Physique* 1948, 9, 29 D et 45 D.
 - 2) W. GORDY, *Review of Modern Physics* 1948, 20, 668.
 - 3) G. GOUDET et J. VOGÉ *Annales Télécommunications* 1948, 3, n° 3, 4, 5, 6, 7.
 - 4) G. HERZBERG, *Molekelspektren und Molekulstruktur* 1 vol. Prentice Hall New-York II *Infrared and Raman spectra of polyatomic molecules* 1 vol. Van Nostrand New-York.
 - 5) J. LE BOT, *Journal Physique* 1948, 9, 1 D.
 - 6) M. SOUTIF, *Journal Physique* 1949, 10, 61 D.
- On trouvera dans ces publications une bibliographie détaillée.

MÉTHODES ET APPAREILLAGES D'ESSAIS POUR LE DÉVELOPPEMENT DES KLYSTRONS BASSE TENSION 3 cm. ⁽¹⁾

PAR

R. MUSSON-GENON

Docteur ès-sciences

J. CHANTEREAU et R. METIVIER

Ingénieurs au Département R. H. de la C. F. T. H.

Introduction

La réalisation des klystrons réflex basse tension 3 cm (figures 1 et 2) RHK 6331 et RHK 6332 couvrant la bande 8500 à 9600 Mc/s a nécessité la mise au point et la création d'un certain nombre de méthodes de mesures hyperfréquence, permettant en particulier de définir le circuit oscillant équivalent à la cavité résonnante du klystron, ainsi que le

puis de la cavité couplée, par l'intermédiaire de la ligne coaxiale de sortie, à l'impédance de charge, qui sera caractérisée par le coefficient de surtension en charge Q_{ch} , avec une valeur de la charge Q'_{ch} correspondant au maximum de la puissance fournie par l'oscillateur.

Nous étudierons ensuite le transformateur cons-



FIG. 1

dispositif de couplage faisant partie du tube qui est intercalé entre la cavité et la ligne de transmission guide d'ondes. Ce dispositif est constitué par une ligne coaxiale de petites dimensions, passant à travers l'enceinte métallique du tube par l'intermédiaire d'une perle en verre. Cette ligne est terminée dans la cavité par une boucle de couplage et du côté guide d'ondes par une antenne.

Nous décrirons d'abord les méthodes de mesures des grandeurs caractéristiques de la cavité seule, qui seront :

- le coefficient de surtension Q_0 de la cavité ;
- l'impédance shunt R_0 vue du faisceau électronique, qui devra être aussi grande que possible ;

(1) Conférence faite au Congrès d'électronique et de Radioélectricité de la Société des Radioélectriciens - 16 au 22 Janvier 1950.

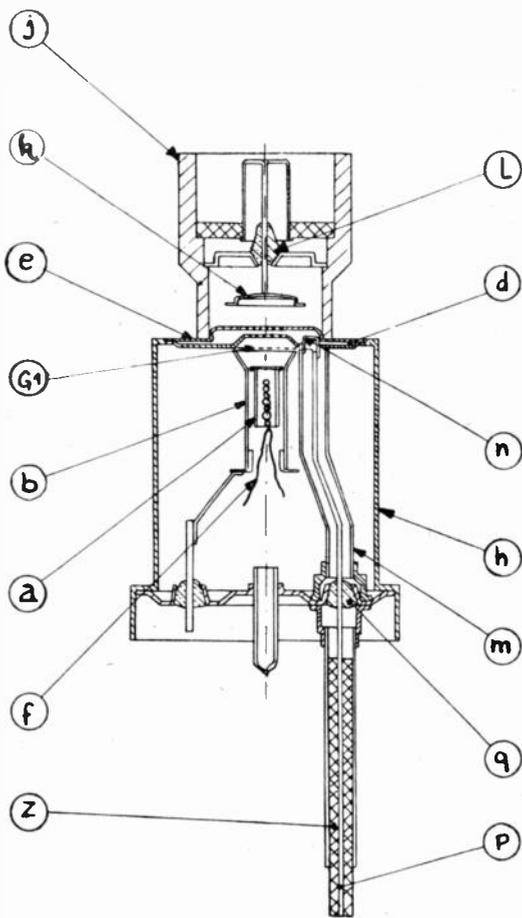


FIG. 2

titué par la ligne coaxiale de sortie et nous décrivons un banc d'essais des klystrons réflex.

Naturellement Q_0 , Q'_{ch} et R_0 sont fonction de la longueur d'onde. Pour faciliter les conditions d'emploi des klystrons réalisés, le dispositif de couplage constitué par la ligne coaxiale et la liaison coaxiale guide d'ondes, doit être du type pré-réglé

à large bande. Il doit produire, sans aucune modification des paramètres d'adaptation, la charge optimum dans toute la bande d'utilisation du tube (plus de 1.000 Mc/s), lorsque le guide d'ondes est fermé sur son impédance caractéristique et sans introduire de pertes d'énergie importantes.

Mesure du coefficient de surtension propre de la cavité Q_0 .

Nous avons utilisé, en l'améliorant, une méthode due à Slater et décrite page 409 dans le livre « klystron and microwave triodes » édité par Mac Graw Hill.

On montre facilement en utilisant les schémas à constantes localisées équivalents à la cavité et au dispositif de prélèvement d'énergie dans la cavité, que l'impédance de l'ensemble vue de la boucle de couplage a pour valeur :

$$Z = j\omega l + \frac{\left(\frac{M}{L}\right)^2}{\frac{1}{Q_0} + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

ou :

M désigne le coefficient d'induction mutuelle ;

L la self de la cavité ;

l la self de la boucle de couplage ;

ω_0 la pulsation correspondant à la fréquence de résonance de la cavité.

Pratiquement la mesure de l'impédance s'effectuera dans une ligne de transmission homogène, reliée à la boucle, dans laquelle on mesurera le taux d'onde stationnaire et la phase.

Vu les très petites dimensions de la ligne coaxiale, il serait très difficile de réaliser un mesureur d'onde stationnaire coaxial, alors que l'on pourra effectuer commodément les mesures dans une ligne guide d'ondes prolongeant la ligne coaxiale. Dans ces conditions plusieurs transformateurs d'impédances se trouvent intercalés entre la boucle et la ligne de mesures. Nous allons voir qu'il est possible de déterminer le coefficient de surtension Q_0 à partir de mesures effectuées dans la ligne guide d'ondes, même si l'on ne connaît pas les caractéristiques des transformateurs d'impédances.

On effectue pour cela deux séries de mesures. Dans la première série, on désaccorde la cavité, et l'on repère pour différentes valeurs de fréquences très voisines de la fréquence de résonance de la cavité, la position du minimum d'amplitude de l'onde stationnaire. Soit P_0 ce plan et l_0 la distance de ce plan à la boucle pour la longueur d'onde λ . Dans une deuxième série de mesures, la cavité étant accordée de telle sorte que le taux d'onde stationnaire (V_{\max}/V_{\min}) dans la ligne de mesures soit minimum pour la fréquence choisie, on détermine pour chacune des longueurs d'ondes choisies précédemment, l'impédance de l'ensemble ramenée dans le plan mobile P_0 .

Pour simplifier l'exposé, nous supposons d'abord que les mesures sont faites dans la ligne coaxiale aboutissant à la boucle de couplage. Si les pertes

en ligne sont négligeables, on trouve que l'impédance Z_{P_0} dans le plan P_0 lorsque la cavité est désaccordée s'exprime par :

$$Z_{P_0} = 0 = j\omega l + jtg \frac{2\pi l_0}{\lambda}$$

L'application de la relation des lignes à l'impédance Z calculée dans le plan de la boucle donne alors, compte tenu de la relation précédente, la valeur de l'impédance dans le plan P_0 lorsque la cavité est proche de la résonance.

$$Z_{P_0} = \frac{K}{1 + \omega^2 l^2} \frac{1/Q_0 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} - \frac{K\omega l}{1 + \omega^2 l^2}\right)}{1 + \omega^2 l^2}$$

en posant $K = \left(\frac{M}{L}\right)^2$

Ou en introduisant une résonance correspondant à la pulsation ω_1 telle que :

$$\omega_1 - \omega_0 = \frac{K\omega_0 l}{1 + \omega_0^2 l^2} \frac{\omega_0}{2}$$

et dans la mesure où ce terme correctif est petit :

$$Z_{P_0} = \frac{A}{\frac{1}{Q_0} + j\left(\frac{\omega}{\omega_1} - \frac{\omega_1}{\omega}\right)}$$

Si nous passons en admittance Y nous avons :

$$AY = A(C + jG) = \frac{1}{Q_0} + 2j \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$$

ou Y c'est-à-dire C et G , sont déterminées expérimentalement pour chaque valeur de $\Delta\omega$. On peut donc tirer de la relation précédente A et Q_0 en égalant les parties réelles et les parties imaginaires. Comme on ne connaît pas exactement la fréquence de résonance, on trace la droite représentative de $G = f\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)$ dont le coefficient angulaire détermine A ; puis on déduit Q_0 par $Q_0 = \frac{1}{AC}$.

On peut d'ailleurs remarquer, à partir de l'expression de Y , que la courbe représentative dans le diagramme de Smith, des variations de cette admittance en fonction de la fréquence, doit être un cercle de partie réelle constante, ce qui est bien vérifié expérimentalement (fig. 3).

On montre facilement, que les conclusions précédentes restent valables dans le cas où un ou plusieurs transformateurs d'impédances sont intercalés entre la boucle de couplage et la ligne de mesures. Si ces transformateurs présentent des pertes faibles mais non négligeables, on en tient compte en retranchant de Z la partie réelle de l'impédance mesurée dans le plan P_0 lorsque la cavité est désaccordée.

Cette méthode est très précise car elle donne Q_0 à mieux de 5 % tout en étant assez rapide. Elle a l'avantage de caractériser la cavité indépendamment du dispositif de couplage.

Ces mesures sont effectuées dans un guide d'ondes

couplé à la cavité à étudier d'une façon quelconque. Le montage expérimental est représenté schématiquement sur la figure 4.

toutes choses égales par ailleurs, passera par un minimum lorsque l'ondemètre sera accordé sur la fréquence de l'oscillateur. La valeur de ce courant

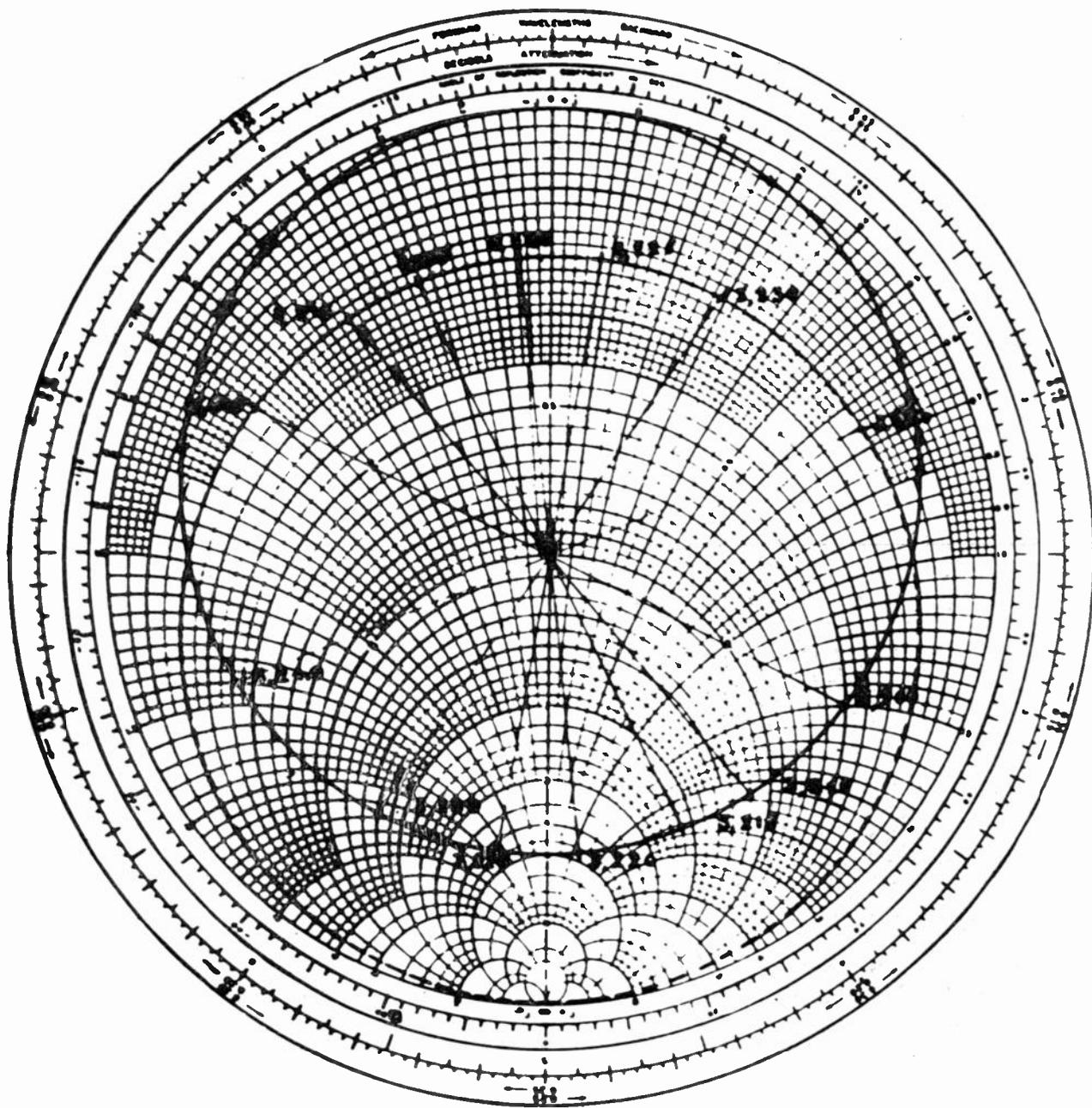


FIG. 3. — En trait plein : Courbe de l'impédance Z de la cavité. En pointillé : Admittance C .

Ce montage comprend :

Un générateur hyperfréquence constitué par un klystron réflex basse tension RHK 6332 donnant une puissance de 30 mW environ et accordable mécaniquement en fréquence de 8 500 à 9 600 Mc/s

Un couplage directif ayant une atténuation dans le sens direct de 20 db et une directivité supérieure à 30 db, qui prélève une partie de l'onde électromagnétique incidente pour exciter un ondemètre à cavité. Un cristal adapté au guide termine cette dérivation. Si l'ondemètre n'est pas accordé la mesure du courant détecté est un contrôle de la puissance de sortie du klystron. Le courant détecté,

minimum fonction de la puissance de sortie de l'oscillateur et de sa fréquence, sert à contrôler la stabilité de l'oscillateur.

Un atténuateur fixe d'au moins 7 db ayant un coefficient de réflexion très faible, permet de charger convenablement l'oscillateur, quelle que soit l'impédance à mesurer, et d'en tirer le maximum de puissance.

Un atténuateur variable permet de faire les mesures de taux d'onde stationnaire à niveaux détecté constant ce qui rend la mesure indépendante des caractéristiques du cristal détecteur utilisé dans le mesureur d'onde stationnaire.

Un mesureur d'onde stationnaire, constitué essentiellement par une sonde mobile reliée à un cristal détecteur, pour la mesure de la phase et du taux d'onde stationnaire existant dans la ligne de transmission guide d'ondes.

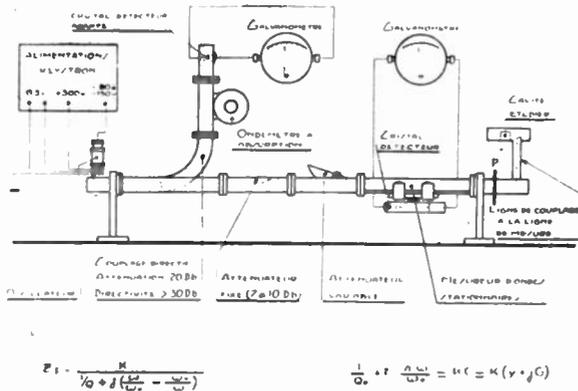


FIG. 4

Un tronçon de guide court-circuité, couplé à une petite ligne coaxiale par une antenne, permet d'exciter la cavité à étudier par l'intermédiaire d'une petite boucle de couplage.

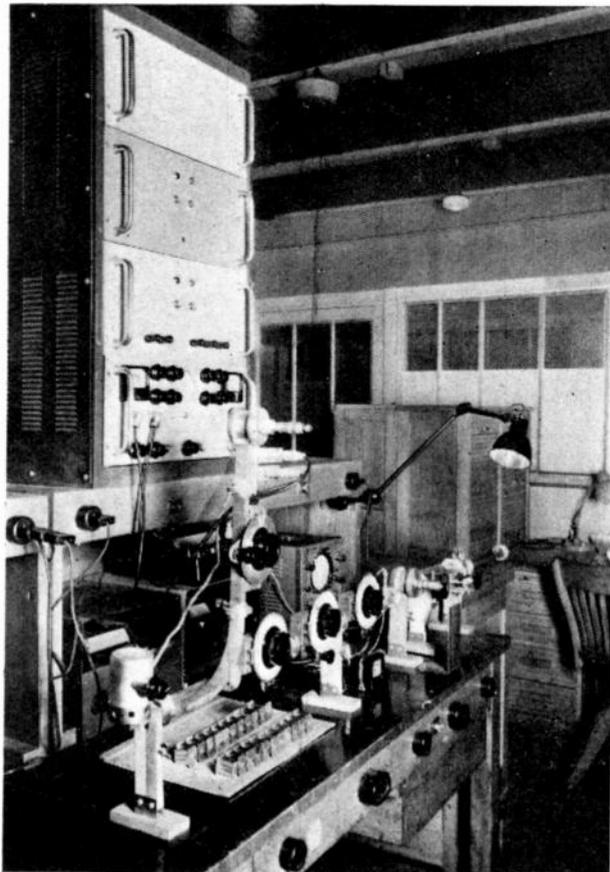


FIG. 5

La figure suivante (fig. 5) correspond à un banc de mesures réglé automatiquement en fréquence par un système de contre-réaction et qui permet des mesures de très grande précision ; la stabilité de fréquence étant de l'ordre de quelques kc/s.

Mesure du coefficient de surtension en charge.

On utilise la même méthode que précédemment, mais cette fois, la cavité est chargée par une deuxième ligne, qui est la ligne de sortie du klystron couplée à un guide terminé par son impédance caractéristique (fig. 6).

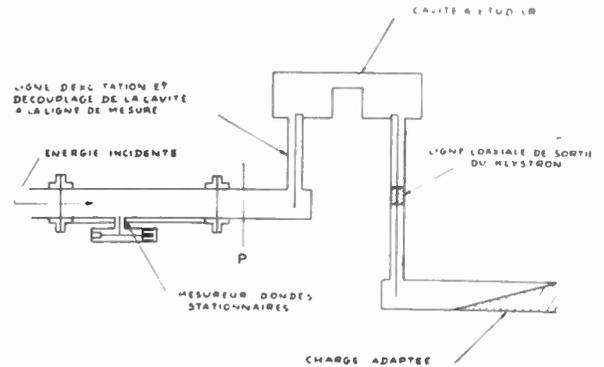


FIG. 6

Si le couplage est assez faible, l'énergie dissipée dans la charge adaptée peut être considérée comme une augmentation des pertes de la cavité. Nous avons alors :

$$Z_{P_0} = \frac{A}{\frac{1}{Q_{ch}} + j \left(\frac{\omega}{\omega_1} - \frac{\omega_1}{\omega} \right)}$$

Nous déterminerons Q_{ch} comme nous avons déterminé Q_0 et avec la même précision.

Mesure de l'impédance shunt R_0

Cette méthode a été mise au point par M. Coumes, élève de l'Ecole Normale supérieure de St-Cloud, lors de la préparation de son diplôme d'Études supérieures au Département RII de la C. F. T. H.

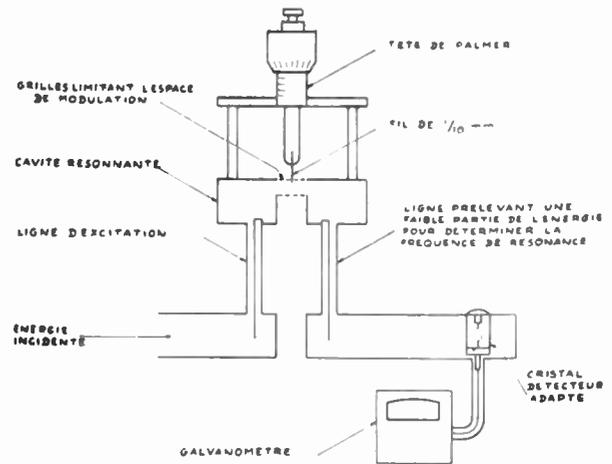


FIG. 7

Elle consiste (fig. 7) à modifier de ΔC la capacité de la cavité sans en modifier la self, et à mesurer la variation Δf de la fréquence de résonance f_0 . On montre que l'impédance shunt de la cavité est reliée à ces variations par :

$$R = Q \frac{1}{\pi f_0} \frac{\Delta f}{\Delta C}$$

La modification de la capacité s'effectue en introduisant, d'une quantité connue, à travers une maille de la grille limitant l'espace de modulation, un fil de tungstène de 2/10 de mm. Les variations de fréquences étant petites (Δf de l'ordre de 10^{-4}) nous avons utilisé une méthode de modulation de fréquence décrite dans l'*Onde Electrique* de décembre 1947 (1).

La quantité ΔC a été mesurée en utilisant la méthode analogique de la cuve électrolytique et en réalisant un modèle à l'échelle 100 des grilles limitant l'espace de modulation. Cet emploi est parfaitement justifié puisque les dimensions de la zone intéressante sont très faibles devant la longueur d'onde.

L'erreur sur la détermination du rapport R/Q est de l'ordre de 15 % au maximum.

Étude de la ligne coaxiale de sortie.

Comme nous l'avons dit au début de cet exposé, il existe une valeur optimum du coefficient de surtension en charge fonction de la longueur d'onde de l'oscillateur alors que généralement l'impédance de charge varie peu avec la longueur d'onde.

L'étude des schémas à constantes localisées représentant la cavité résonnante et la boucle de couplage montre que les variations du Q utile optimum, avec la fréquence, défini par :

$$\frac{1}{Q'_{ch}} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q'_u}$$

sont déterminées, en utilisant les notations précédemment indiquées et en désignant par $R_1 + j X_1$ l'impédance de charge dans le plan de la boucle (réactance de celle-ci comprise) par

$$Q_u = \frac{\omega_0 L}{(\omega_0 M)^2} \frac{R_1^2 + X_1^2}{R_1}$$

ωM variant peu avec la fréquence, l'allure de la courbe dépendra surtout des variations de R_1 et de X_1 en fonction de la fréquence. Naturellement la valeur de Q_u peut être obtenue avec des valeurs très diverses de $M R_1 X_1$. Des considérations plus détaillées concernant en particulier les phénomènes d'accord électronique, d'hystérésis de ligne et des variations de puissance de l'oscillateur en fonction des variations de l'impédance de charge, montrent que l'on a avantage à avoir un couplage faible et à placer le transformateur d'impédance le plus près possible de la boucle de couplage. Il en résulte que l'on aura avantage à réaliser un couplage adapté à large bande entre la ligne coaxiale et la ligne guide d'ondes ; le transformateur d'impédances étant constitué par le passage étanche à travers l'enceinte métallique du tube, et l'élément de ligne coaxiale intérieur au tube.

A partir de considérations théoriques et expérimentales, nous avons établi que le couplage adapté coaxial-guide, à largeur de bande optimum, était obtenu lorsque la ligne coaxiale excitait les vibrations du guide, au moyen d'une antenne à la ré-

sonance, placée à $\lambda/4$ électrique d'un court-circuit du guide ; l'excitation s'effectuant à une distance bien déterminée du petit côté du guide, distance

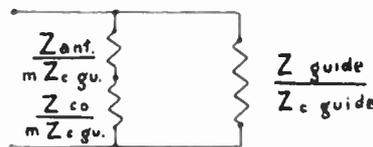
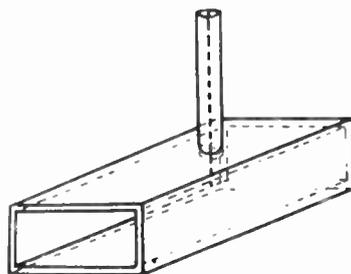


FIG. 8. — Couplage ligne coaxiale - guide d'ondes.

qui dépend du rapport des impédances caractéristiques de la ligne coaxiale et de la ligne guide d'ondes. Le circuit équivalent à la transformation est représenté fig. 8.

Pour réaliser et contrôler l'adaptation du couplage coaxial-guide, nous avons effectué le montage suivant (Fig. 9).

On trace les variations d'impédance de l'ensemble, ramenées au plan de l'antenne A_1 par exemple, lorsque l'on déplace le piston P_2 , le piston P_1 étant maintenu fixe. Ceci pour différentes valeurs de L . On montre que les courbes représentatives des variations d'impédance tracées dans le diagramme de Smith sont des cercles. Si la longueur λ_2 est bien

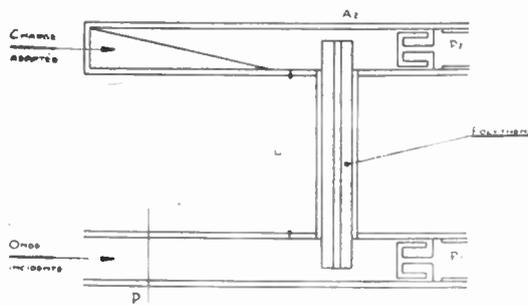


FIG. 9

choisie, ces cercles doivent se couper en un même point qui détermine la position du piston P_2 correspondant à l'adaptation. Si les cercles ne se coupent pas en un même point, on recommence les mesures précédentes, après avoir modifié la longueur de l'antenne A_2 . On peut aussi se donner la longueur de l'antenne et faire varier sa position dans le guide. Si l'adaptation est réalisée en A_1 et en A_2 les cercles obtenus ont de plus des diamètres égaux.

Sur la figure 10, les cercles ne se coupent pas en un point géométrique mais dans une certaine zone liée à l'imperfection de la réalisation mécanique du montage alors que les diamètres des cercles sont très sensiblement égaux.

(1) Nouvelle méthode de mesure des fréquences et des coefficients de surtension en hyperfréquences. R. Musson-Genon. L'onde électrique, décembre 1947.

On peut d'ailleurs remarquer que l'utilisation de cette liaison adaptée coaxial-guide d'ondes, permet d'effectuer dans la ligne guide d'ondes des mesures d'impédance se trouvant dans la ligne coaxiale. En particulier, en remplaçant la boucle de la ligne de sortie du klystron par une antenne et

d'ondes sur son impédance caractéristique. On note pour quelques longueurs d'ondes de la bande les paramètres du réacteur rendant maximum la puissance de sortie. On détermine ensuite, en utilisant le montage à deux lignes, les valeurs de Q_0 et de Q_{ch} pour les longueurs d'ondes choisies ; la

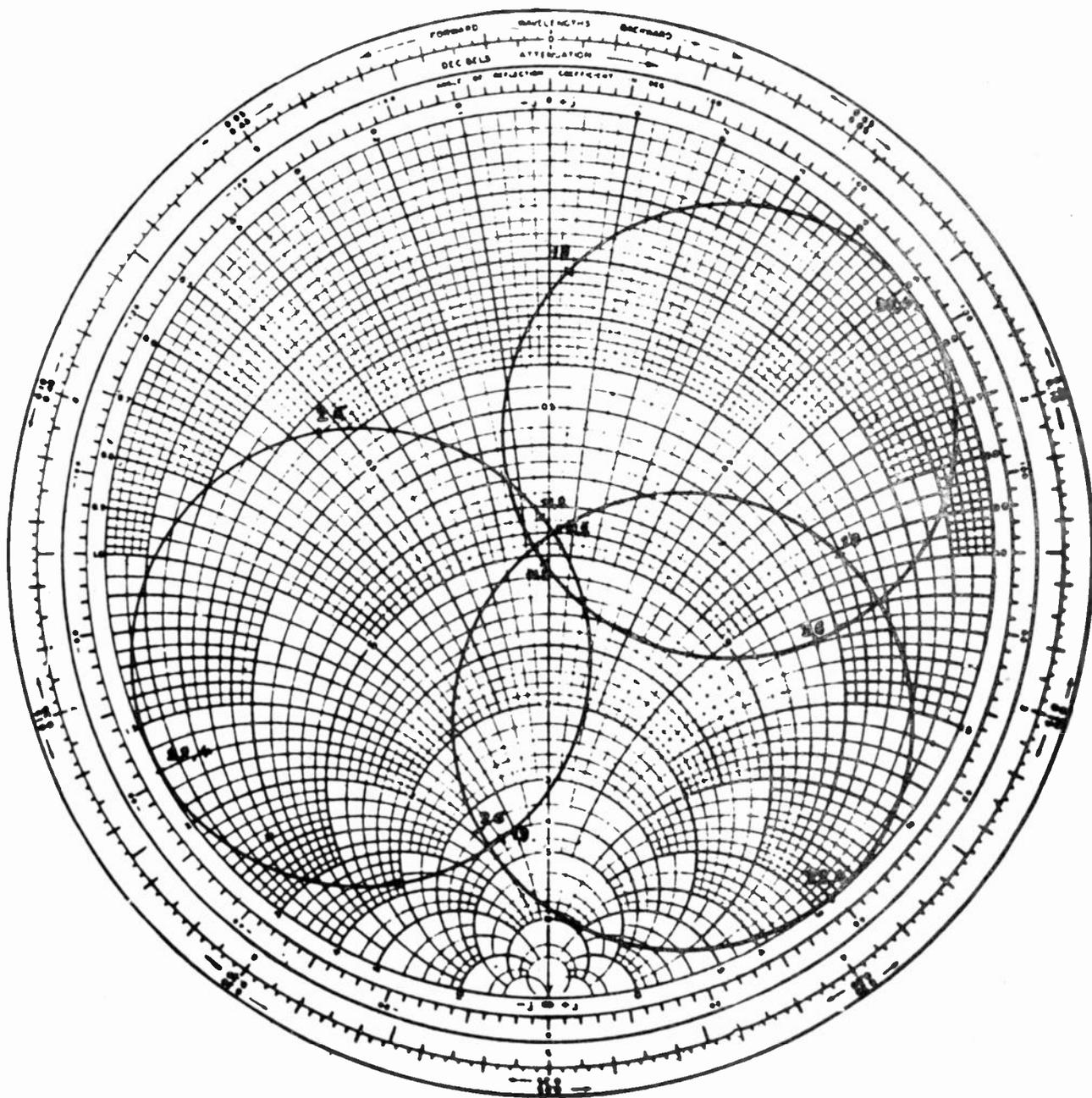


FIG. 10. — Etude de la ligne du klystron R. H. K. 6332

en réalisant un couplage adapté coaxial-guide, on pourra mesurer les grandeurs X_1 et R_1 figurant dans l'expression du Q utile.

Pour dimensionner le transformateur d'impédance, on commence par déterminer la loi de variation de Q'_{ch} ou Q'_u en fonction de la fréquence, rendant la puissance de sortie maximum dans toute la bande d'utilisation. Pour cela, on construit plusieurs tubes et on intercale, lors des essais de ces tubes, un réacteur entre le couplage adapté et le wattmètre fermant la ligne de transmission guide

cavité étant chargée exactement comme lors de l'essai du tube, en plaçant le réacteur devant la charge adaptée terminant la ligne de transmission guide d'ondes. Ceci donne la courbe des variations du Q en charge optimum en fonction de la fréquence. Reste ensuite à dimensionner convenablement la ligne coaxiale de telle sorte que l'on obtienne la même courbe mais cette fois sans réacteur. On dégrossit en utilisant le montage symétrique à deux antennes et en mesurant les impédances ramenées à la boucle de couplage par l'intermédiaire d'une

liaison coaxiale-guide adaptée. On s'efforce dans cet essai d'obtenir des valeurs de l'impédance aussi voisines que possible de l'impédance caractéristique, pour les raisons indiquées précédemment. Lorsque cette courbe à l'allure cherchée, on mesure le Q en charge en fonction de la fréquence, et l'on ajuste alors le couplage de façon à obtenir les valeurs voulues.

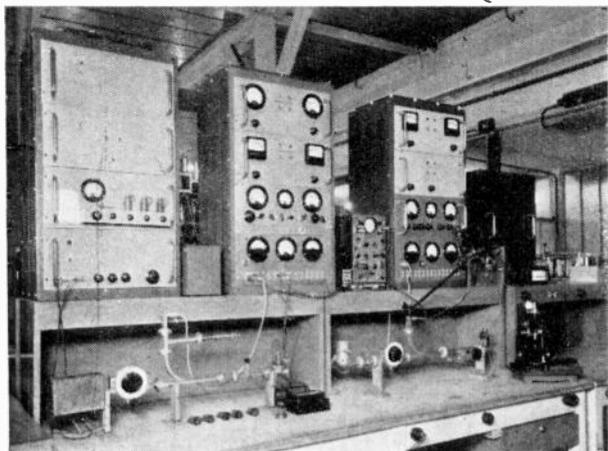


FIG. 11

Sous cette forme, le problème peut paraître très compliqué, mais en réalité, il ne faut pas oublier qu'au voisinage du Q en charge optimum les conditions d'adaptation sont peu critiques. Il suffit de se reporter au diagramme de Rieke donnant dans le diagramme de Smith, les variations de puissance et de fréquence en fonction de l'impédance de charge

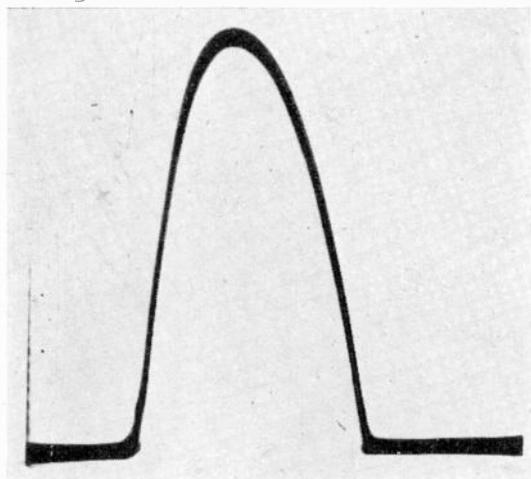


FIG. 12

pour s'en apercevoir. Des variations de 50 % de la charge n'entraînent que des variations de puissance de l'ordre de 20 %. Nous sommes ainsi arrivés au Laboratoire à réaliser un transformateur pré-réglé donnant le maximum de la puissance de sortie à mieux de 10 % dans toute la bande, sans avoir à retoucher les conditions d'adaptation. Sur une fabrication de série, les écarts peuvent être plus importants, car l'adaptation pré-réglée suppose des tubes identiques tant du point de vue électronique. Néanmoins, pour tous ces tubes, la puissance de

sortie dans le couplage coaxial-guide adapté à large bande est supérieur à 15 mW, ce qui est largement suffisant pour l'utilisation en oscillateur local dans les radars.

Reste à déterminer les pertes dans la ligne coaxiale. Pour cela, nous utiliserons le montage à deux lignes de la fig. 6 déjà décrit à propos de la mesure du Q en charge, mais nous constituerons celle-ci par un cristal adapté précédé d'un atténuateur variable étalonné, l'ensemble servant de wattmètre. Si l'on mesure la puissance W_1 fournie par l'oscillateur, ainsi que le coefficient de réflexion de l'ensemble, nous pourrions en déduire la puissance W_t

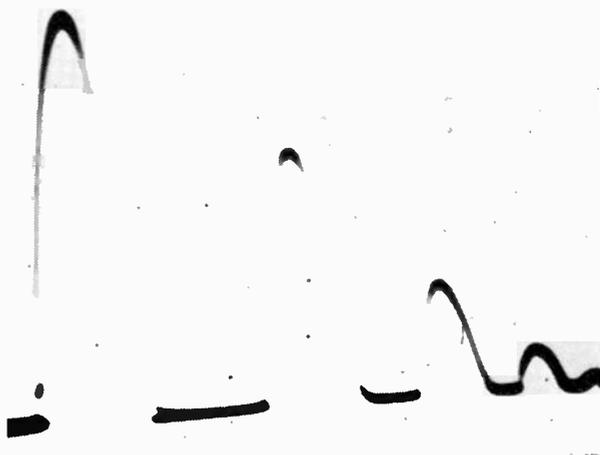


FIG. 13

effectivement dissipée dans l'ensemble cavité, ligne de sortie, charge d'utilisation.

Nous pourrions aussi mesurer la puissance W_u dissipée effectivement dans la charge d'où nous déduirions la somme de la puissance perdue dans la cavité W_0 et dans la ligne de sortie W_t . Au contraire la mesure des coefficients de surtension Q_0 et Q_{ch}



FIG. 14

donne l'énergie perdue dans la cavité et la somme de l'énergie perdue dans la ligne de sortie et dans la charge d'utilisation. On en tire :

$$\frac{W_t}{W_u} = \frac{Q_0}{Q_{ch}} - \left(1 + \frac{W_u}{W_t}\right)$$

Banc d'essais des klystrons.

Nous avons réalisé le banc d'essais type suivant fig. 11.

La partie hyperfréquence comprend :

1°) la ligne principale de transmission constituée par : la liaison coaxial guide adaptée à large bande ; un réacteur étalonné pour la mesure du sink-margin (le plus faible taux d'onde stationnaire V_{max}/V_{min} correspondant au décrochage de l'oscillateur).

50 périodes de la tension réflecteur permettant une représentation oscillographique soit de la courbe de puissance en fonction de la tension réflecteur (fig. 12 et 13), soit de la courbe du courant cathodique en fonction de la tension réflecteur (fig. 14). L'écran de l'oscillographe est directement calibré

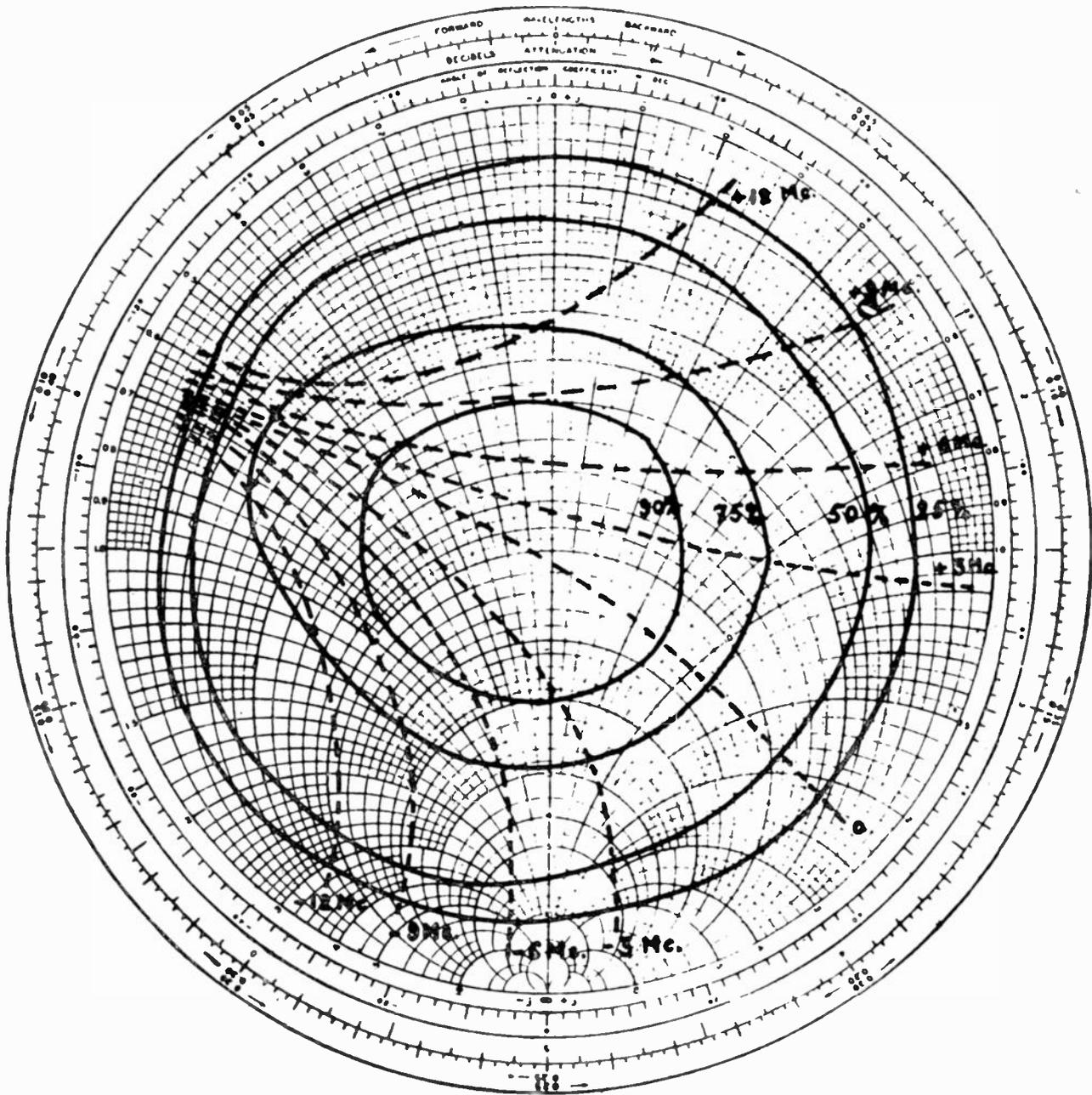


FIG. 15. — Diagramme de Rieke du klystron RH. K. 6.332. Courbes équifréquence et équipuissance.

Un couplage directif :

Un wattmètre à thermistor adapté dans une très large bande travaillant à un niveau constant de 1 mW. Hyperfréquence précédé d'un atténuateur variable étalonné.

2°) Une ligne en dérivation partant du couplage directif qui excite plusieurs ondemètres pré-réglés, montés en absorption. Cette ligne est terminée par un cristal adapté à large bande.

La partie radio, en dehors des sources de tensions continues comprend un dispositif de modulation à

en puissance pour les 5 longueurs d'ondes choisies pour le contrôle du tube, ce qui permet simultanément la mesure de la puissance et l'observation de l'importance des phénomènes d'hystérésis.

On peut aussi sur un tel banc effectuer le tracé du diagramme de Rieke caractérisant le comportement du klystron lors des variations de l'impédance de charge (fig. 15).

La mesure du bruit s'effectue à 36 Mc/s en comparant le bruit du klystron au bruit d'une diode étalonnée dont on peut faire varier le courant.

LES ÉCHOS RADIOÉLECTRIQUES AUTOUR DE LA TERRE

PAR

A. H. de VOOGT

Chef du Service Radio des P. T. T. des Pays-Bas.

Sommaire. — L'auteur traite des différents aspects du phénomène des échos radio-électriques autour de la terre et de leurs durées de parcours. D'abord des approximations sont faites en employant la géométrie du plan de trajet du signal, puis avec des courbes hypothétiques pour l'ionisation un calcul exact est fait pour le temps de parcours et la trajectoire de l'onde.

Des résultats des essais effectués à Kootwijk-Radio (Pays-Bas) sont signalés.

L'article donne une méthode de recherche pour continuer l'étude du phénomène et montre qu'il faut pousser la précision de mesure de parcours jusqu'à 0,0001 seconde.

Introduction

Après la guerre plusieurs publications ont paru s'occupant des échos radio-électriques autour de la terre. (Voir la bibliographie ci-jointe).

Le résultat d'un grand nombre d'observations serait le fait curieux que l'intervalle de temps nécessaire pour faire le tour du monde d'un signal radio-électrique est indépendant de la fréquence et de la saison et a une valeur déterminée de 0,137788 seconde.

Une théorie (cf. 3) tient compte de la possibilité que les rayons radio-électriques suivent d'une façon « glissante » une certaine couche de l'ionosphère possédant une ionisation déterminée, plus ou moins invariable et cette théorie suppose que de cette couche descend continuellement une quantité d'énergie vers la terre.

Cependant, d'autres auteurs appliquent la théorie des bonds (« hops ») répétés, c'est-à-dire acceptent l'idée que les rayons montent et descendent en se réfléchissant successivement sur une couche de l'ionosphère et sur la surface de la terre tout en faisant ainsi le tour du monde.

Ensuite il faut remarquer le fait que les échos se produisent le plus souvent dans les zones du crépuscule de sorte que l'onde rencontre une ionisation modérée et égale ; en effet on pourrait dire que l'ionisation moyenne rencontrée en tournant autour de la terre à une hauteur fixe, sera sensiblement indépendante de l'heure du jour et de la saison et n'est déterminée que par la distance minimum du point subsolaire du grand cercle suivi par le signal-écho. Si cette distance, mesurée en degrés est 90°, le parcours est en coïncidence avec le grand cercle qui sépare les zones de nuit et de jour sur la terre. Mais les expériences ont montré que cet angle peut diminuer jusqu'à 30 degrés, d'où il suit que ce n'est pas nécessaire que le trajet se trouve exactement dans la zone du crépuscule.

Des observations faites régulièrement aux stations ionosphériques on peut déduire que les valeurs

de N (nombre d'électrons par cm^3 en unités de 10^6 électrons/ cm^3) rencontrées en suivant le trajet d'un écho ne sont jamais supérieures à 5 à 6.

C'est ce chiffre que nous avons employé ci-dessous en faisant une approximation pour la solution du problème et en supposant que dans les zones d'échos cette densité électronique se trouve entre 200 km et 300 km de hauteur.

§ 1. Essais préliminaires

Des essais préliminaires furent faits par le Service de Radio des P. T. T. des Pays-Bas.

Au centre d'émission de Kootwijk-Radio, on réalisa un appareillage fournissant des impulsions rectangulaires d'une durée déterminée (variable entre 100 et 1000 μs) à chaque émetteur choisi pour les expériences. La réception fut effectuée à Kootwijk ou à Horstermeer (centre de réception) avec des moyens électroniques.

La précision avec laquelle on déterminait le temps de parcours des échos était d'une milliseconde ; elle fut augmentée plus tard jusqu'à un dixième de milliseconde. Les valeurs mesurées pendant l'hiver 1949-1950 restaient entre 139 et 137 millisecondes.

Les fréquences employées variaient de 22 à 10 Mc/s ; les directions étaient celles des antennes dirigées de Kootwijk c'est-à-dire directions de New-York, Curaçao, Djakarta et de l'Amérique du Sud, Chine et Nouvelle Guinée (1)

Dans plusieurs cas la direction de l'antenne émettrice ou bien de l'antenne réceptrice était réversible ce qui est favorable pour ces essais d'échos.

§ 2. Relations fondamentales

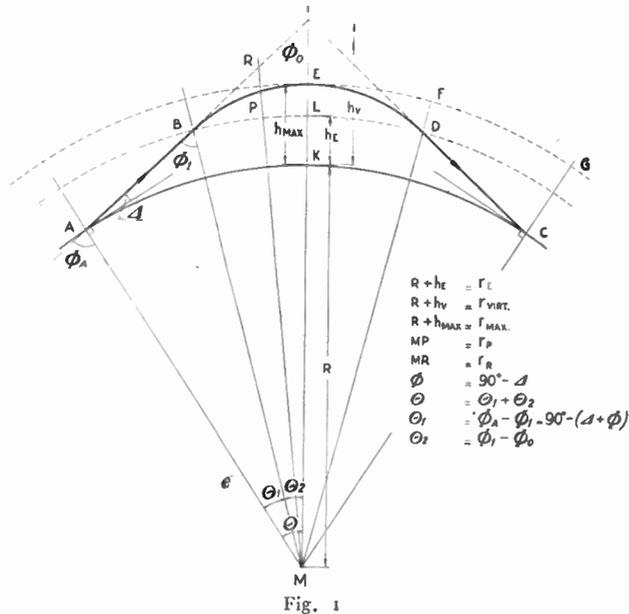
Envisageons maintenant la position du problème d'un point de vue géométrique en présentant la figure 1. Un rayon radio-électrique part de la terre

(1) La direction de Curaçao est la même que celle de Djakarta, de même l'Amérique du Sud a la même direction que Shanghai et la Nouvelle-Guinée.

avec un angle d'élévation Δ , touche l'ionosphère sous un angle d'incidence Φ , se courbe d'une façon plus ou moins rapide selon que la densité électronique est plus ou moins forte ; puis prend la direction horizontale en E , descend et arrive à la surface de la terre en C d'une manière telle que le triangle ATC est isocèle.

A partir de C la même figure se répète et évidemment le nombre des bonds (« hops ») se trouve, en divisant 360° par 2θ .

Comme cela fut indiqué par le R. P. Lejay (« Onde



Electrique » avril 1948) la loi de Breit et Tuve n'est plus exacte pour le cas de la terre courbe.

A l'aide de la fig. 2 on peut trouver que la vitesse avec laquelle se déplace le point R (fig. 1) où la droite AT est coupée par le rayon vecteur MP de l'onde est donnée par :

$$(1) \quad v_R = \frac{M R^2}{M P^2} c$$

(c vitesse de la lumière dans le vide). Cette relation est prouvée comme suit.

La figure 2 donne un agrandissement d'une partie très petite de la figure 1 dans le voisinage du point P . PQ est une partie ds de la trajectoire de l'onde dans l'ionosphère. $RS = ds'$ la partie correspondante sur la droite AT (fig. 1). On voit facilement (fig. 2) que :

$$(2) \quad ds' = \frac{RW}{\sin \Theta_S} = \frac{RW r_S}{r_E \sin \Theta_1} \text{ (fig. 1)} = \frac{r_R P V r_S}{r_E \sin \Theta_1} = \frac{r_R r_S dr \operatorname{tg} \Theta_Q}{r_P r_E \sin \Theta_1}$$

Le temps dt nécessaire pour parcourir le trajet ds (et aussi ds') est donné par :

$$(3) \quad dt = \frac{dr}{\cos \Theta_Q c n_Q}$$

où n_Q est l'indice de réfraction à la hauteur de Q (2)

(2) L'action du champ magnétique est négligée.

En vertu de la relation connue :

$$(4) \quad n_Q r_Q \sin \Theta = r_E \sin \Theta_1$$

Il découle de (2), (3) et (4).

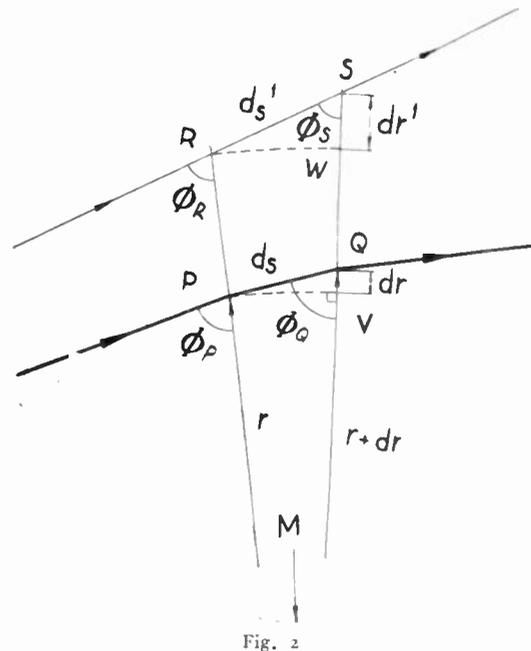
$$(5) \quad \frac{ds'}{dt} = c \frac{r_R r_S}{r_P r_Q} = c \frac{M R^2}{M P^2}$$

Pour obtenir une première approximation du problème nous avons besoin encore d'une autre formule (6).

La densité électronique N est reliée à l'indice de réfraction par la relation connue :

$$(6) \quad n^2 = 1 - kN$$

ou $k = \frac{8.1}{f^2}$ pour la fréquence f mesurée en mégacycles.



Pour la gamme de fréquences employée pour les essais à Kootwijk de 22 à 10 Mc/s, k varie entre 0,018 et 0,08.

Si on suppose que la plus grande valeur de N qui entre en jeu sur le trajet des échos peut atteindre 5 ou 6×10^5 électrons/cm³, la condition (6) montre qu'on n'aura affaire qu'à des indices de réfraction entre 0,999 et 0,944.

Pour une large gamme de fréquences pour ces valeurs des indices l'influence du champ magnétique et des collisions électroniques (atténuation) sur la vitesse de groupe nc , est très faible et on peut la négliger (cf. 5).

La vitesse de groupe ne s'abaisse donc jamais au-dessous de 94 % de la vitesse de la lumière, même au sommet de la trajectoire.

On peut calculer dans la fig. 1 pour une série de valeurs de Δ par exemple de $\Delta = 3^\circ$ à $\Delta = 20^\circ$ et $\theta = 15^\circ$ à 9° (12 à 20 « hops ») des valeurs de $A B$, $B T$ et $Z_o = L T$ et en considérant que la plus petite valeur de r_{max} est r_E , on trouve en appliquant (1), que, la faute commise en supposant que le

point virtuel R se déplace avec la vitesse de la lumière sur la droite AT , ne peut pas dépasser 5 % et souvent ne dépasse pas même 1%.

Le bureau mathématique des P. T. T. a fait ces calculs en employant la géométrie de la fig. 1 et l'approximation (1) pour v_R . Le résultat est que si on accepte un minimum pour T (temps total de parcours) de 134 millisecondes (l'onde suit la surface de la terre avec la vitesse c) et un maximum de 139 millisecondes (résultat sûr des essais) pour 12 « hops » des angles d'émission hors du domaine entre 3° et 9° sont exclus et pour 25 « hops » ceux hors de la partie entre 8° et 14° .

Ce résultat est en accord avec la pratique.

N (6) sera une fonction de r , et l'indice de réfraction n à son tour est une fonction de N donc :

$$(7) \quad n = F(r)$$

De la fig. 2 et les relations (2), (3), (4), et (5) on peut déduire des formules pour la valeur de θ_2 (fig. 1) et du temps t_2 employé par l'onde pour effectuer le trajet de B à E (fig. 1). Elles sont (voir aussi M. S. Estrabaud « Onde Electrique », avril 1948) loc. cit :

$$(8) \quad \theta_2 = \int_{r=r_E}^{r=r_{max}} \frac{r_E \sin \varnothing_1 dr}{c \sqrt{r^2 F^2(r) - r_E^2 \sin^2 \varnothing_1}} - 1$$

$$(9) \quad t_2 = \int_{r=r_E}^{r=r_{max}} \frac{r dr}{c r_E \sin \varnothing_1 \sqrt{r^2 F^2(r) - r_E^2 \sin^2 \varnothing_1}} - 1$$

Les valeurs de t_1 et θ_1 sont déduites de la géométrie de la fig. 1.

En déterminant une fonction F on peut trouver aussi les valeurs de t_2 et θ_2 pour une série de Δ et nombre de « hops » ; c'est ce qui sera fait dans le paragraphe suivant.

Dans le paragraphe suivant nous introduirons une fonction F et ferons les calculs pour θ , t_2 et T est le temps total nécessaire pour le parcours. Ce calcul peut être fait sans aucune approximation et donnera une représentation exacte du parcours de l'onde d'une fréquence donnée dans l'ionosphère et de l'intervalle de temps qu'il nécessite.

§ 3. Calcul exact dans le cas de l'ionosphère moyenne

Dans les calculs ci-dessous on se base sur la supposition suivante.

L'ionisation moyenne dans la zone du crépuscule commence à 70 km ou à 90 km de hauteur et augmente en suivant les courbes A, B ou C de la figure 3 pour atteindre à 250 km de valeurs 5,2 ; 5,8 ou 7,4 (unité 10^6 électrons/cm³).

La fonction :

$$(10) \quad n^2 = 1 - kN = 1 - \left(a + \frac{b}{r} + \frac{g}{r^2} \right)$$

donne :

$$(11) \quad kN = a + \frac{b}{r} + \frac{g}{r^2}$$

Pour $r = \tilde{r}_E$, N sera = 0

donc :

$$(12) \quad ar^2_E + br_E + g = 0$$

et pour $r = r_{max}$, n sera (voir l'équation (4))

$$(14a) \quad n_0 = \frac{r_E \sin \varnothing_1}{r_{max}}$$

il vient donc :

$$(13) \quad (1 - a) r_{max}^2 - b r_{max} - (g + r_E^2 \sin^2 \varnothing_1) = 0$$

Le commencement de l'ionisation à la hauteur r_E a un gradient très faible de sorte qu'il faudra

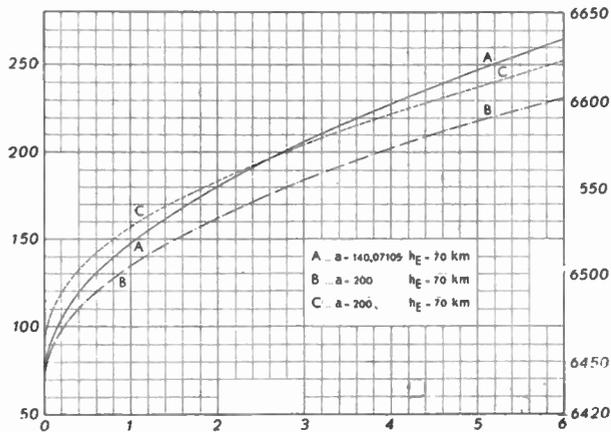


Fig. 3

supposer que la tangente aux courbes de la fig. 3 doit être « verticale ». Cette condition donne avec

$$(14) \quad g = ar^2_E \text{ et } r_E = \frac{-b}{2a}$$

Les courbes A, B et C sont construites avec les constantes suivantes :

r_E	a	b	g
A 70 km	140,07105	- 1,804 . 10 ⁶	5,80925 . 10 ⁹
B 70 »	200.	- 2,576 . 10 ⁶	8,29472 . 10 ⁹
C 90 »	200.	- 2,584 . 10 ⁶	8,34632 . 10 ⁹

Les valeurs de N à 100 km et à 250 km sont :

	N 110 km	N 250 km
A	0,25	5,2
B	0,4	7,4
C	0,1	5,9

Les courbes sont du troisième degré mais on n'utilise qu'une partie appropriée de la fonction avec la limite supérieure de r_{max} et inférieure de \tilde{r}_E .

Les intégrales (8) et (9) deviennent :

$$(15) \quad \theta_2 = \int_{r_E}^{r_{max}} \frac{r_E \sin \varnothing_1 dr}{c \sqrt{(1 - a) r^2 - br - (g + r_E^2 \sin^2 \varnothing_1)}} = \frac{1}{c} \frac{r_E \sin \varnothing_1}{\sqrt{g + r_E^2 \sin^2 \varnothing_1}} \left[\text{arc sin} \frac{br + 2(g + r_E^2 \sin^2 \varnothing_1)}{\sqrt{b^2 - 4(a-1)(g + r_E^2 \sin^2 \varnothing_1)}} \right]_{r_E}^{r_{max}}$$

$$(16) \quad t_2 = \frac{1}{c} \int_{r_E}^{r_{max}} \frac{r dr}{\sqrt{(1 - a) r^2 - br - (g + r_E^2 \sin^2 \varnothing_1)}}$$

$$= \frac{1}{c} \left\{ \frac{1}{1-a} \sqrt{(1-a)r^2 - br - (g + r^2_E \sin^2 \theta_1)} \right\}_{r_{max}}^{r_E} + \frac{-b}{2(1-a)\sqrt{a-1}} \times \left[\text{arc sin} \frac{2(1-a)r - b}{b^2 - 4(a-1)(g + r^2_E \sin^2 \theta_1)} \right]_{r_E}^{r_{max}}$$

En introduisant les valeurs de r_{max} données par l'équation (13) on trouvera :

§ 4. Discussion des résultats

Dans le tableau de la fig. 4 on voit les valeurs exactes de r_{max} , θ_1 , θ_2 , t_1 , etc. et dans la dernière colonne le temps de parcours T d'un écho autour de la terre. Examinons de près le tableau.

On voit que les nombres de « hops » ne sont pas des nombres entiers et il faudrait interpoler pour trouver les nombres entiers successifs. Mais c'est inutile parce que en réalité les « hops » successifs n'auront pas la même configuration se trouvant dans des zones dont l'ionisation ne sera pas rigoureusement la même.

$f = 20 \text{ Mc/s}$

Courbe	Δ°	ϕ_1°	r_{max} km	n_o	θ_1°	θ_2°	θ°	t_1 m.sec	t_2 m.sec	t m.sec	"Hops"	T m.sec
$f = 20 \text{ Mc/s}$												
A	14°48'	73°	282,6	0,926	2,1978	8,4372	10,6350	0,85213	3,44515	4,29728	16,92	145,5
"	9°55'	77°	247,6	0,948	3,0894	8,9899	12,0793	1,17533	3,57821	4,75354	14,90	141,7
"	6°15'	79,5	226	0,960	4,2519	9,4444	13,6963	1,60228	3,70928	5,31156	13,14	139,6
B	12°2'	75,3	247,8	0,941	2,6387	7,1397	9,7794	1,01123	2,84928	3,86051	18,41	142,1
"	9°55'	77°	236,0	0,950	3,0894	7,3258	10,4152	1,17533	2,89565	4,07093	17,28	140,7
"	3°	81,03	208,6	0,967	5,9715	7,9310	13,9025	2,23798	3,07427	5,31225	12,95	137,6
C	14°7'	73°	260,2	0,932	2,8869	6,9116	9,7985	1,11910	2,80846	3,92756	18,37	144,3
"	8°50'	77°	230,5	0,954	4,1657	7,3258	11,4915	1,58418	2,90465	4,48873	15,66	140,6
"	4°20'	79,5	212,0	0,965	6,1710	7,6654	13,8364	2,32310	3,00090	5,32400	13,01	138,5
$f = 10 \text{ Mc/s}$												
A	14°48'	73°	162,0	0,943	2,1978	3,9368	6,1346	0,85213	1,57139	2,42352	29,34	142,2
"	9°55'	77°	143,8	0,963	3,0894	4,1184	7,2078	1,17533	1,60717	2,78250	24,97	138,97
"	6°15'	79,5	132,4	0,974	4,2519	4,2592	8,5111	1,60228	1,64393	3,24621	21,15	137,3
B	12°2'	75,3	159,0	0,954	2,6387	3,3309	5,9696	1,01123	1,30775	2,31898	30,15	139,8
"	9°55'	77°	153,0	0,962	3,0894	3,3906	6,4800	1,17533	1,32005	2,49538	27,78	138,6
"	3°	81,03	138,7	0,977	5,9715	3,5765	9,5480	2,23798	1,36934	3,60932	18,85	136,0
C	14°7'	73°	165,4	0,945	2,8869	3,2543	6,1412	1,11910	1,29882	2,41792	29,31	141,7
"	8°50'	77°	150,1	0,965	4,1657	3,3906	7,5563	1,58418	1,32415	2,90833	23,82	138,6
"	4°20'	79,5	140,5	0,976	6,1710	3,4957	9,6667	2,32310	1,35030	3,67340	18,62	136,8

Fig. 4

(17)
$$\theta_2 = \frac{\sin \theta_1}{\sqrt{a + \sin^2 \theta_1}} \left\{ \frac{\pi}{2} + \text{arc sin} \frac{\sin^2 \theta_1}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 + a \cos^2 \theta_1}} \right\}$$

(18)
$$t_2 = \frac{r_E}{c(a-1)} \left\{ \cos \theta_1 + \frac{a}{\sqrt{a-1}} \left[\frac{\pi}{2} + \text{arc sin} \frac{1}{\sin^2 \theta_1 + a \cos^2 \theta_1} \right] \right\}$$

D'autre part les courbes A, B et C ne sont que des courbes hypothétiques et présentent une approximation moyenne.

Néanmoins le tableau conduit à exclure un nombre de cas pour lesquels le temps de parcours est inacceptable selon les expériences. Avec les limitations données dans le § 2 la limitation pour les valeurs de Φ_1 (donc de l'angle d'émission) devient sévère. Il ne reste que les angles d'émission très faibles pour satisfaire aux conditions.

On voit en outre que l'influence de la fréquence est relativement faible et que d'ailleurs on peut choisir un angle d'émission tel que la différence en T diminue ou disparaît. Pourtant si les observations sont suffisamment exactes l'influence de la fréquence doit apparaître.

Il est clair que le tableau et la méthode par laquelle il a été établi peuvent être appliqués aussi à une liaison radio-électrique quelconque et vérifiés avec les méthodes modernes bien connues.

Seulement la différence avec ces méthodes est évidemment que la courbe hypothétique pour l'ionisation *commence* à la base de l'ionosphère (avec un « maximum » de la courbe.) et montre un gradient augmentant en montant tandis que la méthode anglo-américaine met le maximum en coïncidence avec le maximum d'ionisation et possède un gradient diminuant en montant de la base de l'ionosphère vers le point de réflexion. Mais dans l'opinion de l'auteur avec la première méthode les résultats seront plus adaptés à la réalité parce que, même les fréquences de 20 et 22 Mc/s en incidence oblique, (dans la pratique sous des angles de plus de 73°.) n'occupent que la partie *inférieure* de l'ionosphère. C'est donc seulement cette partie et la répartition ionique qui y existe, qui a de l'importance pour la propagation des ondes.

Le tableau donne aussi une impression sur la validité de l'hypothèse de la propagation « glissante ». Si l'onde arrivée à la hauteur h_{max} continue de se propager autour de la terre, restant à cette hauteur, avec la vitesse : nc on peut calculer facilement les différents intervalles de temps nécessaires pour le parcours et on trouvera des valeurs bien variables, beaucoup plus variables que celles pour la propagation en « hops ».

Il faut conclure que cette hypothèse n'est pas vraisemblable.

Conclusion

Ils restent plusieurs traits spéciaux du phénomène des échos autour de la terre à examiner et seulement des recherches prolongées pour différentes fréquences et trajets et différentes saisons peuvent donner des résultats plus précis pour la vérification de la théorie.

Le premier écho qu'on reçoit est précédé par une

quantité de « scattering » consistant en une série de signaux successifs qui interfèrent entre eux ; au contraire le premier, second et, de temps à autre, aussi le troisième écho *ont une forme nette et très peu perturbée.*

Est-ce que l'effet du champ magnétique terrestre est éliminé en tournant de 360° autour de l'« aimant terrestre » ?

Voilà une question à laquelle il faudra répondre dans l'avenir.

Pourquoi un écho apparaît-il dans une direction et pas dans l'*autre direction*, si la direction des antennes émettrice et réceptrice est inversée ?

Les essais à la station de Kootwijk-Radio sont en cours et les résultats seront communiqués dès qu'ils seront disponibles.

Pour conclure : est-ce que le chiffre de 0,1378 seconde est juste ?

On peut répondre qu'une dépendance de la fréquence est *inévitabile* ; pourtant il faut admettre qu'on peut trouver une courbe d'ionisation moyenne qui donne exactement 0,1378 s. par exemple pour une seule fréquence de 18 Mc/s. Et si cet intervalle de temps ne change pas pendant la saison on peut en conclure qu'il existe une ionisation moyenne invariable en tournant autour de la terre ; peut être est-elle seulement influencée par la période undécennable de la radiation solaire.

L'auteur remercie en terminant M. Steiner, Chef du Bureau Mathématique des P. T. T. à la Haye pour l'aide qu'il lui a apportée en ce qui concerne les calculs qui figurent dans cet article.

BIBLIOGRAPHIE

1. — *L'Onde Electrique*, avril 1948 R. P. LEJAY. Détermination des fréquences maxima utilisables pour les liaisons radioélectriques.
- S. ESTRABAUD. — Sur la réfraction ionosphérique.
2. — *Proc. of the I. R. E.* August 1948, Vol. 36, Nr. 8 H.A. HESS. Investigations of High-Frequency Echoes. Part I. *Proc. of the I. R. E.* September 1949, Vol. 37, Nr. 9. Idem. Part II.
3. — *Zeitschrift für Techn. Physik*. — Nr. 11, 1936. O. V. SCHMIDT. Neue Erklärung des Kurzwellenumlaufes um die Erde.
4. — *Zeitschrift für Naturforschung*. — Nr. 9, L. HAMBERGER und K. RAUER. Zur Fernausbreitung der Kurzwellen.
5. — *Tijdschrift van het Radio-Genootschap*. — Nov. 1948. Mei 1949. A. H. de VOOGT. The analysis of ionospheric reflections (in English). (fig. 2, 3, 4, and 5).

THÉORIE DES SERVO-MÉCANISMES A RELAIS

PAR

J. R. DUTILH

*Ingénieur en Chef contractuel,
Centre National d'Etudes des Télécommunications*

Les servo-mécanismes dits continus ne sont généralement qu'approximativement linéaires, ce qui peut, dans certains cas, compromettre leur stabilité.

Etude des servo-mécanismes « Tout ou Rien », sans seuil et avec seuil.

Discussion de la stabilité des servo-mécanismes continus réels.

En conclusion, les servo-mécanismes à relais convenablement corrigés peuvent avoir des performances tout à fait comparables à celles des servo-mécanismes linéaires.

Introduction

Comparés aux servo-mécanismes linéaires les servo-mécanismes à relais sont beaucoup plus simples et moins coûteux : l'amplificateur de puissance est remplacé par un simple relais, par contre le principe même de leur construction impose la nécessité de tolérer la possibilité d'une erreur petite mais finie.

La théorie qui va être exposée a pour but de montrer comment, par l'emploi de techniques qui sont utilisées d'une manière courante pour les servo-mécanismes linéaires, on peut réduire au minimum le sacrifice sur la précision qu'entraîne une simplification aussi radicale dans la construction du servo-mécanisme.

Accessoirement cette théorie permet de discuter de la stabilité des servo-mécanismes linéaires lorsque l'on tient compte de la saturation des amplificateurs.

Servo-mécanismes en général

CHAPITRE 1

D'une manière générale, un servo-mécanisme est un appareil amplificateur de puissance destiné à fournir une grandeur de sortie θ fonction donnée d'une grandeur d'entrée α .

Il est aujourd'hui classique d'assimiler un tel servo-mécanisme à un amplificateur à contre-réaction, la tension appliquée au moteur agissant sur θ étant fonction non pas de α mais de l'erreur $\varepsilon = \alpha - \beta(\theta)$, β désignant une fonction donnée de θ .

Lorsque l'état d'équilibre est atteint, on a : $\alpha - \beta(\theta) = 0$ relation qui est de la forme cherchée. La théorie des servo-mécanismes linéaires a précisément pour but de déterminer les conditions à remplir pour que cet équilibre soit stable et atteint en un temps fini.

Dans tout ce qui suit, on supposera que α et θ sont des angles et que β est égal à 1. L'exposé en sera très simplifié et la généralisation à des servo-mécanismes plus compliqués est immédiate.

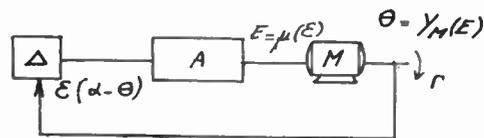


Fig. 1

Le servo-mécanisme étudié comprendra donc un arbre d'entrée α et un arbre de sortie θ que l'on supposera calé directement sur l'arbre de sortie du moteur M_0 . Cet arbre entraînera une charge représentée par un couple Γ exercé sur l'arbre θ .

Ce moteur sera alimenté par un amplificateur A dont la tension d'entrée $\varepsilon = \varepsilon(\alpha - \theta)$ sera fournie par un différentiel électromécanique Δ attaqué simultanément par l'arbre α et l'arbre θ .

On a ainsi le schéma (actuellement classique) de la figure 1.

Un tel dispositif ne résoud pas exactement le problème posé : l'erreur $\varepsilon = \alpha - \theta$ ne sera nulle que si α et θ sont des constantes (inertie du moteur) et si le couple perturbateur Γ est nul.

En fait, le problème tel qu'il est posé par l'utilisateur revient à dire que l'erreur ε doit rester inférieure en valeur absolue à une certaine valeur ε_0 lorsque :

(1) Communication présentée le 18 Novembre 1948 à la 1^{re} section de la Société des Radioélectriciens et à la 8^e section de la Société Française des Electriciens.

a) l'arbre θ supporte, outre les efforts d'inertie, un couple perturbateur dont la limite supérieure est Γ_0 .

b) lorsque les mouvements de l'arbre θ correspondent à des ordres que le servo-mécanisme doit exécuter normalement.

Il est intuitif que ces deux problèmes ne sont pas indépendants : on améliorera dans l'un et l'autre cas la précision du servo-mécanisme en augmentant le coefficient d'amplification μ .

On sait, par ailleurs, que si μ dépasse une certaine valeur critique (dépendant des éléments constituant le servo-mécanisme) le servo-mécanisme devient instable (phénomène du pompage). Cette valeur critique est en général inférieure à celle qu'il conviendrait d'atteindre pour satisfaire aux conditions imposées.

Lorsqu'il s'agit de servo-mécanismes linéaires, la théorie et la technique fournissent à l'Ingénieur des procédés permettant de reporter cette limite assez loin pour que le pompage ne soit plus à craindre lorsque l'on donne au gain la valeur nécessaire.

La théorie qui va être exposée a pour but de résoudre, en ce qui concerne les servo-mécanismes à relais, un problème analogue :

Étant donné un servo-mécanisme, déterminer des procédés permettant d'améliorer la précision de ce servo-mécanisme de manière à satisfaire à des conditions imposées à l'avance par l'utilisateur.

1. 1. — Servo-mécanismes linéaires

Analytiquement si le servo-mécanisme est linéaire, on aura en appelant E , la tension de sortie de l'amplificateur, μ et γ_M les fonctions de transfert de l'amplificateur et du moteur :

$$\theta = \gamma_M(E) = \mu \gamma_M \varepsilon = \mu \gamma_M (\alpha - \theta)$$

$$\theta = \alpha \frac{Y}{1 + \gamma} \quad \text{avec} \quad Y = \mu \gamma_M$$

μ , γ_M , γ sont des fonctions de p symbole $\frac{d}{dt}$

Cette fonction de transfert $Y(p)$ caractérise le comportement du servo-mécanisme. On sait que $Y(p)$ est une fraction rationnelle en p (à coefficients réels). D'après le théorème de CAUCHY $Y(p)$ considérée comme une fonction de la variable p , est parfaitement définie si on connaît $Y(j\omega)$ (d'où en particulier, le critérium de NYQUIST).

Physiquement, $Y(j\omega)$ est la valeur de θ que l'on obtient en régime permanent si l'on coupe la chaîne de réaction (1) et si l'on imprime à l'arbre α un mouvement $\alpha = e^{j\omega t}$.

La courbe $Y(j\omega) = x + jy$ a dans les cas usuels l'aspect de la courbe figure 2.

On sait que si l'on trace les courbes $\log|\gamma(j\omega)|$ et $\arg \gamma(j\omega)$ en fonction du logarithme de la fréquence on obtient dans les cas pratiques un diagramme ayant l'aspect de la figure 3.

À l'intérieur du domaine de linéarité, et en l'absence de couple perturbateur, la connaissance de

$Y(j\omega)$ détermine complètement le comportement du servo-mécanisme.

Ce domaine de linéarité est, en général assez petit. Sans entrer dans le détail des calculs, on se rend

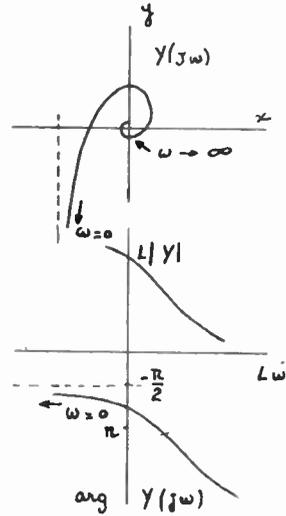


Fig. 2

Fig. 3

compte en effet que le moteur d'un servo-mécanisme précis au degré près devra fournir un couple appré-

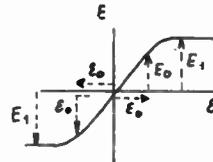


Fig. 4

ciable pour — par exemple — un degré d'erreur ; il est clair que, à moins d'employer des moteurs extraordinairement puissants, il sera nécessaire de

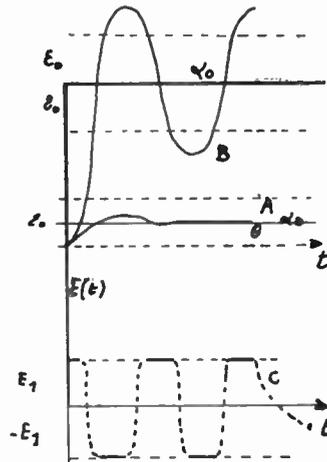


Fig. 5

limiter la tension effectivement appliquée au moteur à une valeur correspondant à quelques degrés d'erreur.

La courbe donnant, en régime permanent la tension E appliquée au moteur en fonction de l'angle d'erreur ε aura donc l'allure de la figure 4.

La valeur de E_1 est imposée par le moteur. Celles de ε_0 et E_0 par l'utilisateur.

Dans l'intervalle $-\varepsilon_0 + \varepsilon_0$ le servo-mécanisme est linéaire.

La théorie nous fournit des moyens d'obtenir un servo-mécanisme stable lorsque le gain est égal à

$$\mu_0 = \frac{E_0}{\varepsilon_0}$$

mais ne nous donne aucune indication sur le comportement du servo-mécanisme lorsque l'on sort de ce domaine. C'est-à-dire lorsque les variations de α ne sont ni très petites, ni très lentes.

Le premier problème qui se posera est le suivant : le servo-mécanisme étant au repos $\alpha = \theta = 0$, au temps $t = 0$ on déplace brusquement l'arbre d'entrée α de la position 0 à la position $\alpha = \alpha_0$.

Si α_0 est inférieur à ε_0 le calcul symbolique nous permet de calculer $\theta = \theta(t)$ (courbe A fig. 5).

Si, par contre, α_0 est grand, nous pouvons prévoir une courbe telle que la courbe (B).

Il en résulte que la tension $E = E(t)$ aura sensiblement l'allure de la courbe (c).

Il est certain que le fonctionnement de ce servo-mécanisme s'écarte considérablement de celui du servo-mécanisme linéaire idéal et se rapproche beaucoup de celui d'un servo-mécanisme à relais. En particulier, il n'est nullement évident que les oscillations s'amortissent.

Ce point sera étudié au chapitre 4.

1.2 — Servo-mécanismes non linéaires.

Pratiquement un tel servo-mécanisme comprendra (fig. 6) le différentiel Δ dont la tension de sortie $\varepsilon = \alpha - \theta$ est appliquée à un premier amplificateur A_1 .

La tension de sortie de A_1 , $E(t) = Y_1 \varepsilon$ est appli-

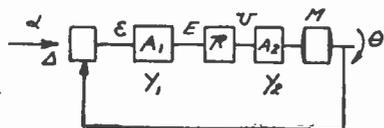


Fig. 6

quée à l'organe non linéaire R ; la tension de sortie U de cet organe est appliquée à un amplificateur de puissance A_2 dont la tension de sortie est appliquée au moteur M .

R sera en général un relais. De plus Δ , A_1 , A_2 et M peuvent être considérés comme linéaires.

(En général l'amplificateur A_2 n'existera pas et le relais commandera directement le moteur M).

La relation entre E et U peut être assez compliquée. $U = U(E)$ doit en tous cas être une fonction impaire et monotone. De plus $[U] = U_0$ pour E grand fig. 7 A.

Dans le cas d'un relais supposé parfait et sans retard la courbe $U = U(E)$ aura soit l'aspect de la figure B (μ_0 infini) soit celui de la figure C ($\mu_0 = 0$). Nous appellerons E_0 le seuil de fonctionnement du

relais et ε_0 la valeur correspondante de l'erreur.

Manifestement si E_0 est nul le servo-mécanisme oscillera de part et d'autre de sa position d'équilibre.

Soit θ_0 et $\frac{2\pi}{\omega_0}$ l'amplitude et la fréquence de ces oscillations.

Si maintenant l'on fait croître E_0 :

Il est intuitif que tant que E_0 reste petit le servo-mécanisme oscillera sensiblement dans les mêmes conditions mais que si E_0 devient suffisamment grand le servo-mécanisme finira quelles que soient

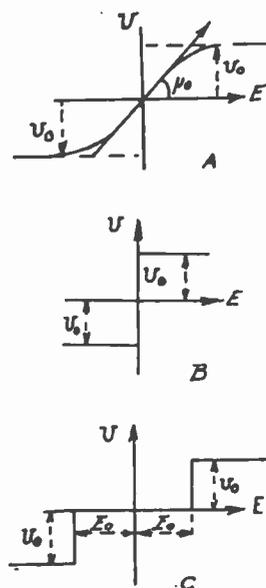


Fig. 7

les conditions initiales par s'immobiliser dans une position telle que E soit inférieure à E_0 en valeur absolue c'est-à-dire que l'on aura :

$$|\varepsilon| < \varepsilon_0$$

Comme nous le verrons par la suite, il suffit (théoriquement) que l'on ait :

$$\varepsilon_0 > \frac{\theta_0}{2}$$

Conclusion

Nous voyons, en résumé, que dans un servo-mécanisme à relais, nous ne pouvons pas fixer la valeur $\varepsilon(t)$ de l'erreur, mais nous pouvons affirmer que cette erreur reste inférieure à une certaine valeur ε_0 .

Nous verrons quels sont les facteurs qui déterminent cette valeur et comment il est possible au moyen de dispositifs simples de réduire cette valeur.

Le fait que nous ne cherchons pas à déterminer l'erreur mais sa limite supérieure, limite qui n'a pas en général besoin d'être calculée avec beaucoup de précision, nous permettra d'employer des méthodes de calcul expéditives mais approchées.

CHAPITRE 2

Stabilité et régime oscillants des Servo-mécanismes à relais.

2.11. — Relais sans seuil

S'il n'y a pas de seuil le servo-mécanisme oscillera de part et d'autre de sa position d'équilibre. Après disparition des phénomènes transitoires le régime des oscillations devient périodique (1).

Si nous admettons l'existence de ce régime périodique, il est assez facile de déterminer la période des oscillations. En effet dans ces conditions la tension $U = U(t)$ est une onde carrée dont nous connaissons l'amplitude U_0 mais non la pulsation ω_0 .

En prenant ω comme paramètre il nous est facile de calculer le mouvement $\theta = \theta(t)$ de l'arbre θ et par suite la tension de sortie de l'amplificateur $E = E(t)$ qui résulte de ce mouvement.

Cette partie du servo-mécanisme étant supposée linéaire la tension E est la somme des tensions dûes aux différents termes du développement de U en série de Fourier :

$$U(t) = \frac{4}{\pi} U_0 \left[\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \dots \right]$$

On vérifie (voir annexe) que l'action des harmoniques est pratiquement négligeable. La tension $E(t)$ est sensiblement sinusoïdale, c'est-à-dire de la forme :

$$E = E_0 \cos(\omega t - \varphi)$$

le déphasage φ variant avec ω .

Manifestement la valeur ω_0 cherchée est celle pour laquelle $E(t)$ et $U(t)$ sont de même signe et s'annulent simultanément.

Si nous négligeons l'effet des harmoniques nous aboutissons à l'énoncé suivant :

La fréquence des oscillations est celle pour laquelle le déphasage le long de la chaîne constituée par le moteur et les amplificateurs est égal à π .

Connaissant cette fréquence $\frac{\omega_0}{2\pi}$ on en déduit facilement l'amplitude θ_0 des oscillations, elle est donnée (voir annexe) par une expression de la forme :

$$\theta_0 = \frac{4}{\pi} U_0 \frac{1}{K \omega_0 \sqrt{1 + \omega_0^2 T^2}}$$

K et T sont des paramètres dépendant du moteur.

2.12. — Servo-mécanisme « tout ou rien » avec seuil.

Le régime de fonctionnement imposé au moteur dans les servomécanismes tout ou rien que nous venons d'étudier est très dur : le moteur est en permanence en position de démarrage ce qui peut dans certains cas nécessiter des précautions spéciales.

Ainsi qu'il a été exposé plus haut, il est intuitif que, si l'on prévoit un seuil de fonctionnement suffisant pour le déclenchement du relais, il sera possible d'obtenir l'arrêt du moteur dans une position telle que l'erreur sans s'annuler complètement reste dans des limites tolérables.

Il sera en général nécessaire de prévoir un frein pour immobiliser l'arbre du moteur dans cette position : en effet le moteur n'exerçant par hypothèse aucun couple sur l'arbre de sortie, ce dernier pourrait être entraîné par des couples perturbateurs exercés par la charge, ce qui risquerait d'introduire des mouvements plus ou moins désordonnés.

Conditions d'entretien des oscillations.

Si nous admettons que la tension $E(t)$ est approximativement sinusoïdale c'est-à-dire que l'on a $E(t) \approx E_1 \cos \omega t$, nous voyons que la tension $U(t)$ sera représentée par la courbe tracée en traits gras sur la figure 8.

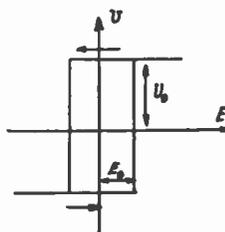


Fig. 8

Le raisonnement précédent nous conduit à admettre que :

1°) la fréquence des oscillations n'est pas modifiée par la présence du seuil.

2°) $U(t)$ peut être remplacée par le premier terme de son développement en série de Fourier. C'est-à-dire :

$$U(t) = U_1 e^{j\omega_0 t}$$

avec

$$U_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^\alpha U_0 \cos \omega t d(\omega t)$$

avec

$$\cos \alpha = \frac{E_0}{E_1}$$

Nous aurons donc

$$U_1 = \frac{4}{\pi} U_0 \sin \alpha.$$

d'où :

$$E_1 = U_1 |Y(j\omega_0)| = \frac{4}{\pi} U_0 |Y(j\omega_0)| \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E_1^2}}$$

équation bicarrée en E_1 qui n'admet de racine que si :

$$E_0 < \frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi} U_0 |Y(j\omega_0)| \right)$$

On en déduit que si E_0 est supérieur à cette valeur, l'entretien des oscillations est impossible.

(1) La démonstration mathématique de cette proposition semble assez délicate.

Si l'on remarque que $E_1 = \frac{4}{\pi} U_0 |Y(j\omega_0)|$ est la valeur correspondant à l'auto-oscillation du même servo-mécanisme supposé sans seuil, on voit que :

Si l'on veut supprimer les auto oscillations d'un servo-mécanisme tout ou rien, il suffit de prévoir un seuil correspondant à la moitié de l'amplitude de ses auto-oscillations.

Bien entendu, dans la pratique, cette valeur devrait être majorée.

2.2. — Imperfection des relais

2.21. — Hystérésis.

Plaçons nous pour simplifier, dans le cas d'un servo-mécanisme tout ou rien, sans seuil. Le relais R n'a donc par hypothèse que 2 positions, l'une correspondant à la tension de sortie $+U_0$, l'autre à la tension de sortie $-U_0$.

Ainsi que nous l'avons vu ce servo-mécanisme tend vers un régime périodique d'oscillations.

Il est clair physiquement que, le relais ne basculera que si la tension qui lui est appliquée change de signe et atteint une certaine valeur E_0 petite mais non nulle.

De ce fait, la relation $U = U(E)$ sera représentable par un diagramme analogue à un diagramme d'hystérésis (fig. 9).

La condition d'entretien des oscillations est manifestement que pour $\omega t = -\frac{\pi}{2}$, $E(t)$ soit égal à $+E_0$.

On a :

$$E(t) = \frac{4}{\pi} U_0 Y(j\omega_0)$$

c'est-à-dire en explicitant :

$$E(t) = \frac{4}{\pi} U_0 A(\omega_0) \cos(\omega_0 t + \varphi(\omega_0))$$

avec

$$Y(j\omega) = A(\omega) e^{j\tau(\omega)}$$

la condition s'écrit donc :

$$\frac{4}{\pi} U_0 A(\omega) \sin \varphi(\omega) = E_0$$

On voit que l'on a

$$\varphi(\omega_0) < \pi$$

et que l'hystérésis abaisse la fréquence d'auto-oscillation.

Nota : Sous réserve de quelques modifications cette théorie permet de tenir compte du jeu mécanique dans les engrenages.

2.22. — Retard introduit par relais.

Nous serons donc amenés à réduire au minimum le seuil de fonctionnement du relais.

Pour cela, le relais étant souvent imposé, nous serons conduits à augmenter le gain de l'étage actionnant le relais ; le relais devant être protégé contre les surintensités, le courant d'excitation maximum doit être limité à une certaine valeur i_0 .

Si le gain de l'amplificateur est élevé, nous voyons que l'étage actionnant le relais mécanique peut être lui-même considéré comme un relais à fonctionnement pratiquement instantané.

De ce fait le relais mécanique travaillera toujours dans les mêmes conditions : à un instant donné sa tension d'alimentation E passant de $+E_0$ à $-E_0$ ou vice versa et l'ensemble amplificateur relais se comportera comme un relais unique, pratiquement sans hysteresis mais introduisant un retard constant τ .

Même si le gain de l'amplificateur n'est pas infini cette hypothèse est encore suffisamment exacte.

Dans ces conditions, il suffit, pour trouver la fréquence $\omega_0/2\pi$ des oscillations, d'écrire que pour :

$$\omega(t - \tau) = \frac{\pi}{2} \quad \text{on a } E(t) = 0$$

c'est-à-dire :

$$\varphi(\omega_0) + \omega_0 \tau = \pi$$

$\varphi(\omega_0)$ étant l'angle de déphasage.

Ici encore nous avons $\varphi(\omega_0) < \pi$ et nous voyons que le retard abaisse la fréquence des oscillations.

CHAPITRE 3

Amélioration des servo-mécanismes à relais

Le fait de remplacer l'amplificateur de puissance par des relais entraîne un sacrifice sur la précision du servo-mécanisme. Ce sacrifice est de l'ordre de grandeur de θ_0 amplitude des oscillations spontanées de ce servo-mécanisme lorsque le seuil de fonctionnement du relais est supposé nul.

Nous avons vu que cette valeur de θ_0 est une fonction décroissante de la fréquence $\frac{\omega_0}{2\pi}$ de ces oscillations, ω_0 étant donné par l'équation :

$$\varphi(\omega_0) + \omega_0 \tau = \pi$$

Augmenter la précision du servo-mécanisme revient donc à augmenter ω_0 .

τ étant un paramètre imposé (constante de temps du relais) nous voyons que la seule manière d'augmenter ω est de diminuer le déphasage introduit par la chaîne constituée par le moteur et l'amplificateur.

Il se trouve que précisément la stabilisation des servo-mécanismes linéaires se fait le plus souvent par des procédés analogues ; la technique des servo-mécanismes linéaires nous fournit donc un grand nombre de procédés pour agir dans le sens voulu

sur $\varphi(\omega)$: Ces procédés seront en général applicables tels quels aux servo-mécanismes à relais.

A titre indicatif il est courant d'avoir

$$\varphi(\omega) = \frac{3\pi}{4}$$

au moment où

$$|Y(j\omega)| = 1$$

ce qui vous conduirait à

$$\omega_0 \tau = \frac{\pi}{4}$$

c'est-à-dire

$$f_0 = \frac{1}{8\tau}$$

CHAPITRE 4

Stabilité des servo-mécanismes linéaires dans le cas où l'on fait intervenir la saturation

On peut se demander si un servo-mécanisme stable tant qu'on le maintient dans la partie linéaire de sa caractéristique le reste si on l'écarte beaucoup de sa position d'équilibre, de façon à sortir de la région linéaire.

Dans un tel servo-mécanisme, la courbe $U(E)$ de l'étage R aura l'allure de la figure 9 reproduite ici. On a avec les approximations usuelles :

- pour $|E| < E_0$ $U = 0$
- pour $E_0 < |E| < E_1$ $U = KE$
- pour $|E| > E_1$ $U = \pm U_1 = \pm KE_1$

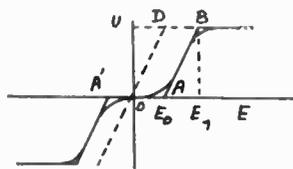


Fig. 9

Pratiquement E_0 est négligeable. Par un choix convenable des unités k peut être rendu égal à 1, le problème est le suivant :

Le servo-mécanisme étant stable si $|E| < E_1$ peut-il devenir instable et osciller lorsque l'amplitude des oscillations est supérieure à E_1 ?

Soit

$$E(t) = E \cos \omega t$$

en négligeant les harmoniques, on a :

$$U(t) = U \cos \omega t$$

avec

$$U = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U(t) \cos \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} E_1 \sin \theta$$

$$+ \int_0^{\pi} E(t) \cos \omega t d(\omega t) \quad \text{avec} \quad \cos \theta = \frac{E_1}{E}$$

on a manifestement

$$U < \frac{1}{\pi} E_1 = 1,28 E_1$$

Si $|E| < E_1$ on a $U = E$;

Si $|E| > E_1$ on a $U = \lambda E_1$

λ étant une fonction de E variant de 1 à 1,28. La condition d'entretien des oscillations spontanées se-

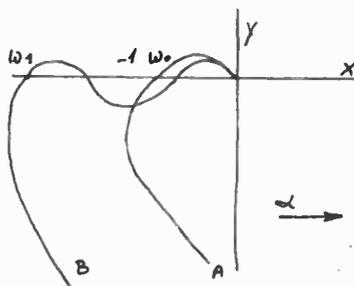


Fig. 10

rait que pour la valeur de ω telle que l'argument de $Y(j\omega)$ soit égal à π on ait :

$$|E| \leq \lambda E_1 |y(j\omega_0)| > E_1$$

c'est-à-dire

$$|y(j\omega_0)| > \frac{1}{\lambda} \neq 1 ;$$

or, pratiquement le théorème de Nyquist impose que

$$|y(j\omega_0)|$$

soit nettement inférieur à 1 (courbe A).

En général un servo-mécanisme linéaire ne risque donc pas de devenir instable si l'on introduit les dispositifs limiteurs de couple.

Nota. — Le raisonnement précédent serait en défaut si on l'appliquait à un servo-mécanisme conditionnellement stable (courbe B de la figure 10) En général l'effet des dispositifs limiteurs de couples sera de faire osciller ce servo-mécanisme sur une fréquence voisine de ω_1 .

Conclusion

Les servo-mécanismes à relais ont été très souvent considérés comme des appareils grossiers et peu précis : cela tient à ce que le plus souvent la comparaison portait entre un servo-mécanisme à relais non corrigé et un servo-mécanisme linéaire bien corrigé et fonctionnant dans des conditions idéales (absence de réaction de la charge).

En pratique, nous l'avons vu au chapitre 1, lorsque l'on tient compte de ces couples perturbateurs, on est obligé même pour les servo-mécanismes linéaires de tolérer une certaine erreur.

Il n'y a donc, théoriquement du moins, aucune raison pour que les servo-mécanismes à relais soient moins précis que les servo-mécanismes linéaires.

La question des erreurs dynamiques des servo-mécanismes est beaucoup plus complexe. Tout ce que nous pouvons dire pour l'instant c'est qu'il ne doit pas y avoir de différences radicales entre les comportements des servo-mécanismes de ces deux

types et du bon marché peuvent dans beaucoup de cas remplacer des servo-mécanismes linéaires.

En particulier ils permettent de réaliser des servo-mécanismes « non électroniques » c'est-à-dire fonctionnant sans lampes de T.S.F.

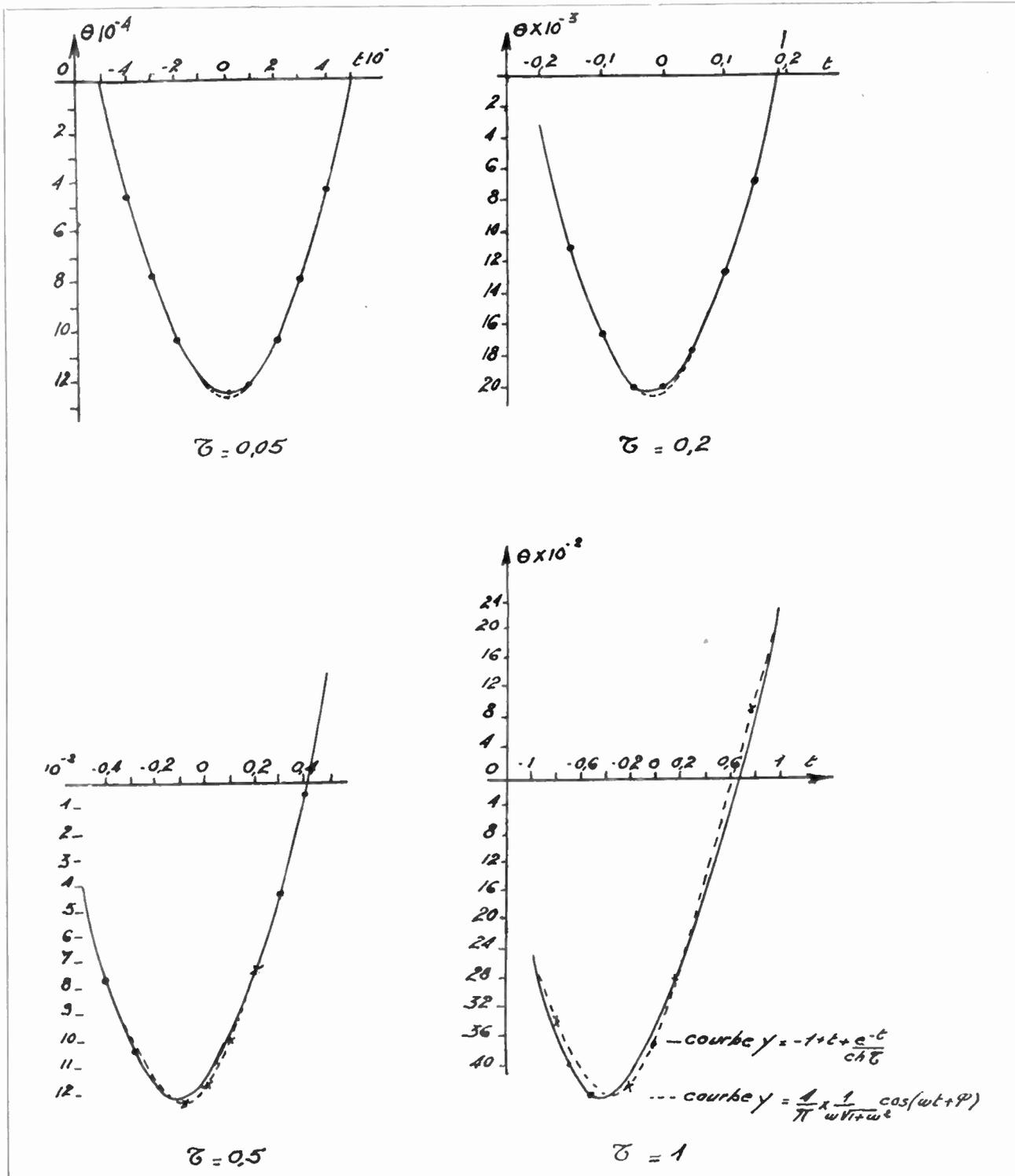


Fig. 11

types dès qu'il s'agit de mouvements d'une certaine amplitude (effet de la saturation).

Il semble que convenablement traités, les servo-mécanismes à relais, qui ont l'avantage de la robu-

On peut, en effet, réaliser des dispositifs avanceurs de phases entièrement mécaniques et obtenir ainsi des servo-mécanismes extrêmement simples compacts et puissants, considérablement plus avantageux

que les servo-mécanismes linéaires correspondant. Nous avons vu que le facteur temps intervient dans les servo-mécanismes à relais par l'intermédiaire de deux paramètres : la constante de temps du moteur et le temps de retard du relais. L'effet de la constante de temps du moteur peut être réduit, c'est donc en définitive la constante de temps du relais qui limitera directement ou indirectement les performances dynamiques du servo-mécanisme.

Il est donc souhaitable que l'on puisse disposer de relais à faible constante de temps : l'avenir des servo-mécanismes à relais dépendra beaucoup des solutions apportées à cette question.

ANNEXE AU CHAPITRE 2

Calcul de $\theta(t)$

1°) Soit $U(t)$ la tension appliquée au moteur ; on a en général une équation de la forme :

$$T \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} U(t) \quad (1)$$

Dans le cas d'un moteur à excitation séparée cette équation résulte de :

$$U = IR + k \frac{d\theta}{dt} \quad \text{loi d'Ohm}$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = k I \quad \text{équation de la mécanique}$$

J moment d'inertie du rotor et de la charge ;

K coefficient de force contre-électromotrice ;

R Résistance de l'induit ;

I Courant de l'induit.

2°) Dans le cas qui nous intéresse $U(t)$ est une onde carrée c'est-à-dire que l'on a $U(t) = \pm U_0$ par un changement de variable sur θ , et l'équation (1) peut être mise sous la forme :

$$\frac{d^2 y}{dt_1^2} + \frac{dy}{dt_1} = U_1(t) = \begin{cases} +1 & \text{de } t_1 = -\tau \text{ à } +\tau \\ -1 & \text{de } t_1 + \tau \text{ à } 3\tau \text{ etc...} \end{cases}$$

La solution correspondant à un mouvement périodique de θ est telle que

$$y(\tau) + y(-\tau) = 0$$

$$\frac{dy}{dt}(\tau) \times \frac{dy}{dt}(-\tau) = 0$$

par un calcul élémentaire on obtient :

$$y = -1 + t_1 + \frac{e^{-t_1}}{ch \tau}$$

qui représente θ pendant la demi-période (de $t_1 = -\tau$ à $t_1 = +\tau$).

3°) Par ailleurs on peut poser

$$U_1(t_1) = \frac{1}{\pi} \left[\cos \omega t_1 - \frac{1}{3} \cos 3 \omega t_1 + \dots \right]$$

$$\text{avec} \quad \omega = \frac{2\pi}{4\tau}$$

en ne conservant que le premier terme nous obtenons la valeur approchée

$$y_1 = -\frac{1}{\pi} \frac{\cos(\omega t_1 + \varphi)}{\omega \sqrt{1 + \omega^2}}$$

$$\text{avec} \quad \tau \varphi = \frac{1}{\omega}$$

la figure 11 nous permet de nous faire une idée de l'approximation obtenue.

Visiblement l'erreur que l'on commet en prenant pour y la valeur approchée y_1 est très faible.

4°) En partant de l'équation (1) on obtient avec une approximation très suffisante.

$$U = \frac{1}{\pi} U_0 e^{j\omega t}$$

d'où

$$\theta = \frac{1}{\pi} U_0 \frac{1}{J\omega (1 + J\omega T)}$$

$$\theta_0 = \frac{1}{\pi} \frac{U_0}{\omega \sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$$

S. OSTROVIDOW

Ingénieur Civil du Génie Maritime

TRAITÉ DE RADIOGUIDAGE

aux agents techniques et ingénieurs
aux étudiants
aux utilisateurs

Rappel de notions fondamentales. — Fréquences utilisées. — Emission et réception dirigées. — Problèmes posés par le radio-guidage. — Le cadre dans le radio-guidage. — Les premiers systèmes de radio-guidage. — Le système européen d'A. S. V. avec radio-phare et deux balises. — La courbe de descente Le câble d'atterrissage. — Radio-phares à champ tournant. — Le radio-compas. — Détection d'obstacles et mesures de hauteurs. — Procédés modernes Le radar. — P. S. V. par systèmes hyperboliques. — Autres systèmes récents. — A. S. V. moderne (Système I. L. S.). — Navigation sans pilote à bord
Notions élémentaires sur la navigation

Un volume de 232 pages 16 × 25 cm
Prix : broché : 1080 fr Relié : 1200 fr
Port : 70 francs

ÉDITIONS CHIRON, 40, rue de Seine, 40, PARIS (6^e) — C. C. P. Paris 53.35

Deuxième édition...

TECHNIQUE et ÉVOLUTION du RADAR

par
le Capitaine de Corvette DEMANCHE

ÉQUATION DU RADAR — CHOIX DES PARAMÈTRES
AÉRIENS — APPAREILS INDICATEURS

Prix : 380 frs — Port : 45 frs

ÉDITIONS CHIRON, 40, rue de Seine, PARIS-6^e

Condensateurs au Mica sous gaine céramique étanche

(conforme
aux normes
C G T U)



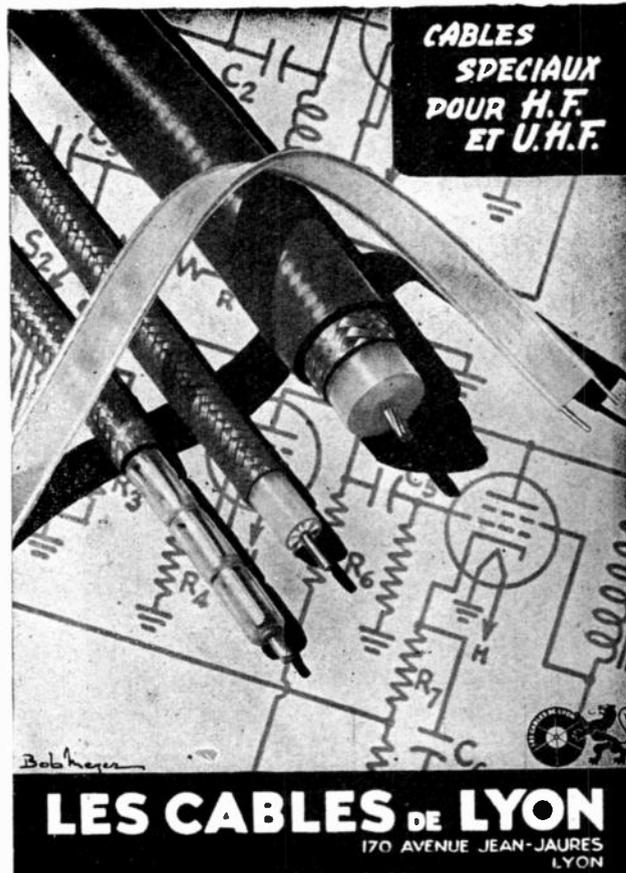
Grandeur nature



André SERF

127, Faubourg du Temple
PARIS (10^e) Nor 10-17

PUBL. RAPHY



**CABLES
SPECIAUX
POUR H.F.
ET U.H.F.**

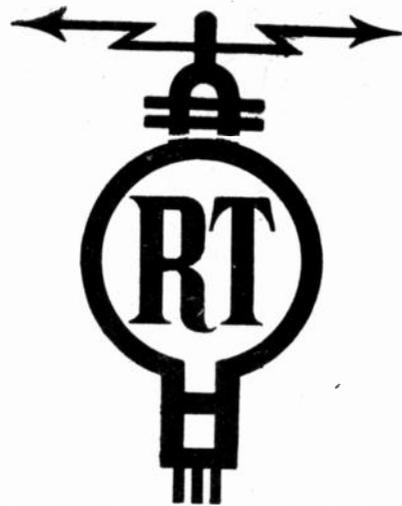
LES CABLES DE LYON
170 AVENUE JEAN-JAURES
LYON

Tête pour magnétophone

PMF

assure aux magnétophones
LA FIDÉLITÉ INTÉGRALE
vente exclusive aux constructeurs de magnétophones

PROCEDES MAGNETIQUES FRANÇAIS
145, avenue de la République
CHATILLON-SOUS-BAGNEUX (SEINE) ALÉSIA 03-13



TUBES POUR APPLICATIONS SPÉCIALES

Ondes courtes - Amplificateurs de lignes
Préamplis - Mesures - Télécommande

S. A. LA RADIOTECHNIQUE
Fournisseur des Administrations et des Services Publics
LABORATOIRES ET USINES :
51, RUE CARNOT - SURESNES

*Transformateurs
spéciaux* JUSQU'À 30 KVA

R. L. Dupuy

S. A. F. A. R. E.
"FERRIX"

98, Av. Saint-Lambert
Téléphone : 849-29 NICE
Agence de Paris :
172, Rue Legendre - XVII^e
Téléphone : Mar. 99-21

★

AUTRES FABRICATIONS:
Transfos de : sonneries,
sécurité, néon, mazout.
Survolteurs - dévolteurs,
Sonneries,
Autotransfos réversibles,
etc...

DARIO

TOUS LES TUBES DE RÉCEPTION

9, AVENUE MATIGNON, PARIS-8°

ÉMETTEURS · RÉCEPTEURS
TELEVISION
A HAUTE DÉFINITION

819
LIGNES



*déjà adoptés par les
stations émettrices*
PARIS
LE VATICAN
LILLE...

LA RADIO-INDUSTRIE S.A.
55 à 59, R. DES ORTEAUX, PARIS XX^e
TÉLÉPHONE : ROquette 26-71 et 91-00

FABRICATIONS DE QUALITÉ **MFOEM** **FONDÉE EN 1836**

*Fabricants de supports
de lampes de T.S.F. Contacteurs
rotatifs s/bakélite ou stéatite
et toutes pièces
métalliques dans une
usine de réputation
mondiale*

Nouveaux supports

RIMLOCK MOULÉ * **RIMLOCK Bak.H.F.** * **MINIATURE**

STÉATITE

TYPE BREVETÉ **D.I.P.R.**

MANUFACTURE FRANÇAISE D'OEILLETS MÉTALLIQUES
SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 10.000.000 FR^s
64, B^e de STRASBOURG PARIS X. Tel. BOT. 72-76

ALTER

Département

radio et télévision

- CONDENSATEURS
Mica et Céramique
- POTENTIOMÈTRES
graphités et bobinés
- RÉSISTANCES
bobinées nues et émaillées
- TRANSFORMATEURS
Alimentation et B.F
- AUTO-TRANSFOS & SELFS

Catalogue et tarif
sur demande à :

M. C. B. ET VÉRITABLE ALTER

S.A.R.L. au capital de 35.000.000 de frs

11, R. Pierre Lhomme, COURBEVOIE (Seine) - Tél DEF. 20-90

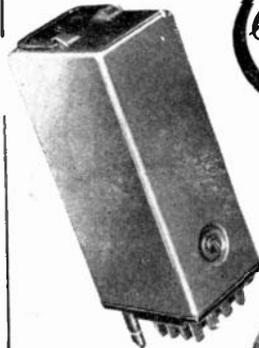
Autres Fabrications

Condensateurs Mica de puis-
sance ou spéciaux
Potentiomètres de précision
Résistances et Transformateurs
industriels
Régulateurs automatiques de
tension " Régulvit."

POUR LES

SERVOMÉCANISMES

les **RELAIS**
POLARISÉS SENSIBLES
Notice N° 281 sur demande

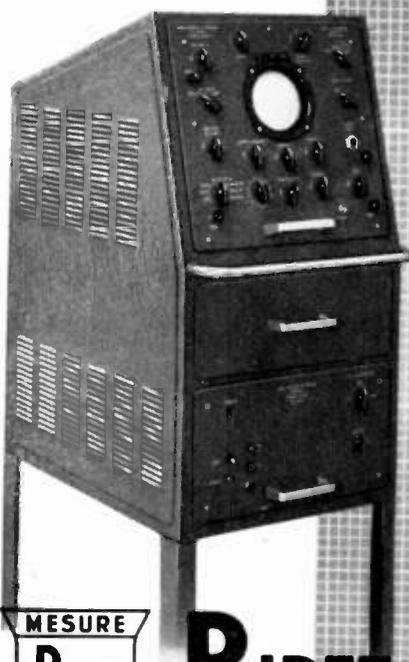


les **MOTEURS**
TRANSYNS
POUR TRANSMISSIONS SYNCHRONES
Notice N° 581 sur demande

SADIR CARPENTIER, 101, B^e MURAT, PARIS-XVI^e

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 500.000.000 DE FRANCS

ACTA



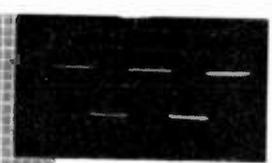
RIBET & DESJARDINS
 13, RUE PÉRIER, MONTRouGE (SEINE) ALÉ. 24-40

TRANSITOIRES
IMPULSIONS - RADAR
TÉLÉVISION

- Amplificateur vertical 10 M C
- Balayage déclenché ultra-rapide
- Ligne de retard incorporée
- Marqueur de temps jusqu'à 1 μ s
- Tube à post-accélération

font du
262 A

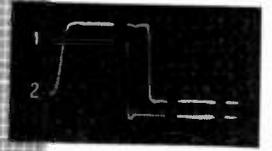
LE PLUS PERFECTIONNÉ DES
OSCILLOGRAPHES
CATHODIQUES



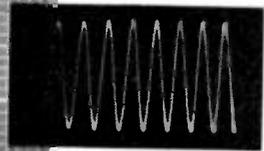
Signaux carrés à 10 pps



Signaux carrés à 50 Kc avec marquage



Impulsions 1 μ s avec marquage toutes les micro-secondes
 1) sans ligne de retard
 2) avec ligne de retard



Sinusoïde 10 Mc

RADIOFOTOS

FABRICATION
 GRAMMONT

TUBES

"MINIATURE"
Type International



une technique éprouvée

LICENCE R.C.A.

SÉRIE COURANT ALTERNATIF	SÉRIE TOUS COURANTS	SÉRIE PROFESSIONNELLE	
6 BE 6	12 BE 6	0 A 2	6 AU 6
6 BA 6	12 BA 6	2 D 21	6 J 4
6 AT 6	12 AT 6	6 AG 5	6 J 6
6 AQ 5	50 B 5	6 AK 5	12 AU 6
6 X 4	35 W 4	6 AK 6	9001
		6 AL 5	9003

PUBL. RAPPY

STÉ DES LAMPES FOTOS

11, Rue Raspail-MALAKOFF (Seine)
 Tél: ALÉ 50-00 • Usines à LYON

IL EXISTE *un* REDRESSEUR

pour chaque cas particulier

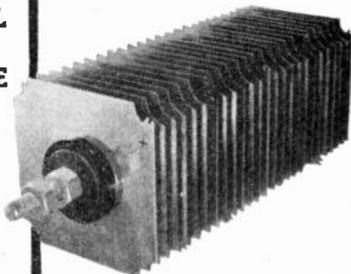
Dans chaque cas nous vous proposons le meilleur redresseur soit à l'Oxyde de Cuivre

OXYMÉTAL

soit au Sélénium

WESTALITE

Les milliers de redresseurs actuellement en service sont notre meilleure référence.



DEMANDEZ NOTRE DOCUMENTATION

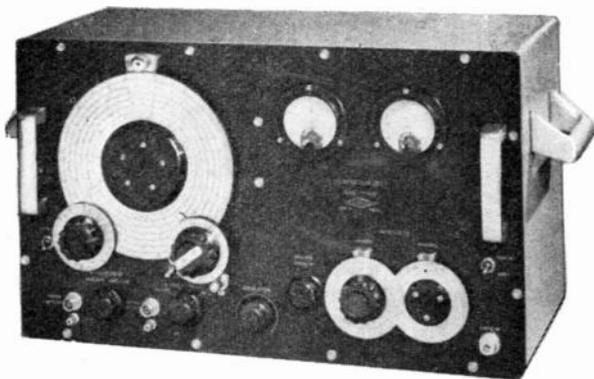
N° 124

COMPAGNIE DES FREINS ET SIGNAUX

WESTINGHOUSE

16, RUE DE LA VILLE-L'ÉVÊQUE - PARIS 8^e

TÉL. : ANJOU 17-51 & 38-91



★ GÉNÉRATEUR ONDES COURTES

de 5 à 410 mégacycles

Atténuateur à piston de 0,01 à 100.000 microvolts

Générateur intérieur pour modulation d'amplitude 400 et 1000 C. S. à 30 %

Modulation d'impulsion par générateur extérieur

★ AUTRES FABRICATIONS

Mégohmmètre type R. M. 101 de 0,1 à 1.000.000 de mégohms

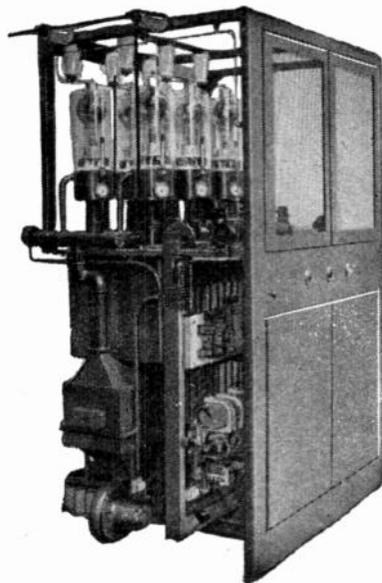
Générateur d'impulsion P. 101

GEFFROY & CIE CONSTRUCTEURS
9, Rue des CLOYS - PARIS - MON. 4465 (3 LIGNES)

S. F. M. E.

Société Française de Matériel Electrique

62 Rue Denis-Papin, PANTIN (Seine) - Téléphone : NORD 47-62



Redresseur — 15.000 volts — 5 ampères

● Redresseurs. Bobines de Self-Inductance pour filtrage de courants redressés. ● Transformateurs spéciaux. ● Réglage de la Tension.

● Tableaux et pupitres de commande.

Nombreuses Références dans les Stations d'Emission

PANTIN

TÉLÉVISION

ÉMISSION — RÉCEPTION

MESURES HF



VOLTMÈTRE ÉLECTRONIQUE

VE 15

Notice 7519

THERMOCOUPLES DANS LE VIDE

Notice 7501

OSCILLOGRAPHE HF OCP 41

Notice 7515

COMPTEURS MONTROUGE

MAGNÉTIQUES...

UTILISABLES
JUSQU'À QUELQUES
DIZAINES DE MC

•
PERMÉABILITÉS
DE 1 à 120

•
TRÈS FAIBLES
PERTES ET GRANDE
STABILITÉ

•
TORES - POTS
CROISILLONS
BATONNETS
POULIES - VIS

•
NOYAUX SPÉCIAUX
SUR
DEMANDE



DIRECTION SERVICES COMMERCIAUX
89, RUE DE LA FAISANDERIE - PARIS (16^e)

SERVICES D'INSTALLATION LABORATOIRES
TÉLÉPHONE : TROCADÉRO (12-71) et 12-85

AGENCE-PUBLÉDITEC-DOMENACH



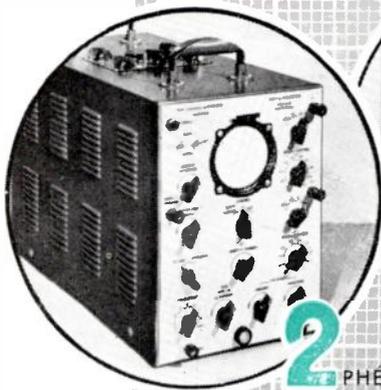
Installations de Studios
DE
RADIO DIFFUSION
TÉLÉPHONIE
à longue distance
Répéteurs
Courants porteurs
**APPAREILS
DE MESURES**

SOCIÉTÉ ALSACIENNE DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES

DÉPARTEMENT CABLES ÉLECTRIQUES ET TÉLÉCOMMUNICATIONS
69, RUE DE MONCEAU, PARIS-8^e - TÉL. : LABORDE 60-50

Giorgi

EXAMEN SIMULTANÉ de 2 à 5 PHÉNOMÈNES



2 PHÉNOMÈNES
Oscillographe
Bicourbe



3 PHÉNOMÈNES
Commutateur 2 et 3 courbes
pour oscillographe



5 PHÉNOMÈNES
Oscillographe
3, 4 et 5 courbes

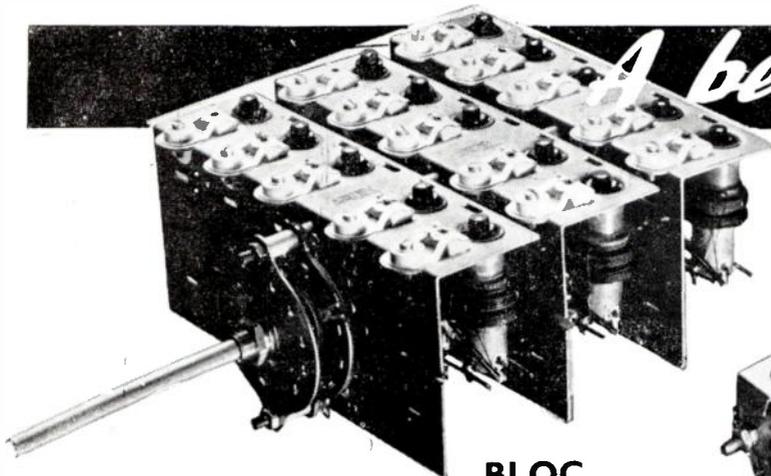


RIBET & DESJARDINS

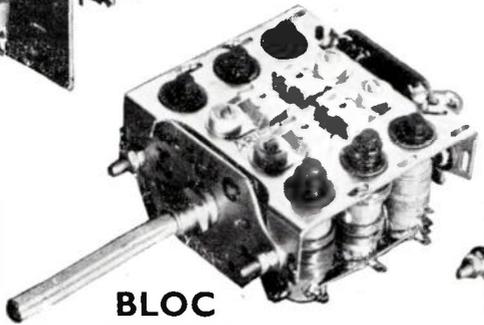
13, RUE PÉRIER, MONTROUGE (SEINE) ALE. 24-40

ACSA

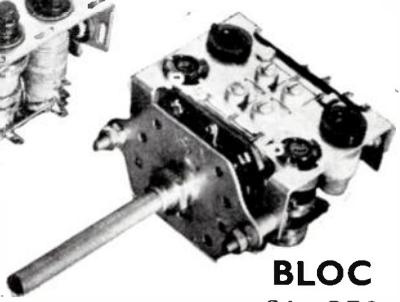
A belle gamme...



BLOC
Série 1520



BLOC
Série 315
A BANDES ÉTALÉES



BLOC
Série 350

...beau fini...

NOUVELLE RAISON SOCIALE

LES ATELIERS

GALLIAN MILLERET & C^{ie}

S. A. R. L. AU CAPITAL DE 4.000.000 DE FRANCS

6 bis, RUE DU PROGRÈS — MONTREUIL - SOUS - BOIS — Téléphone : AVRon 03-81

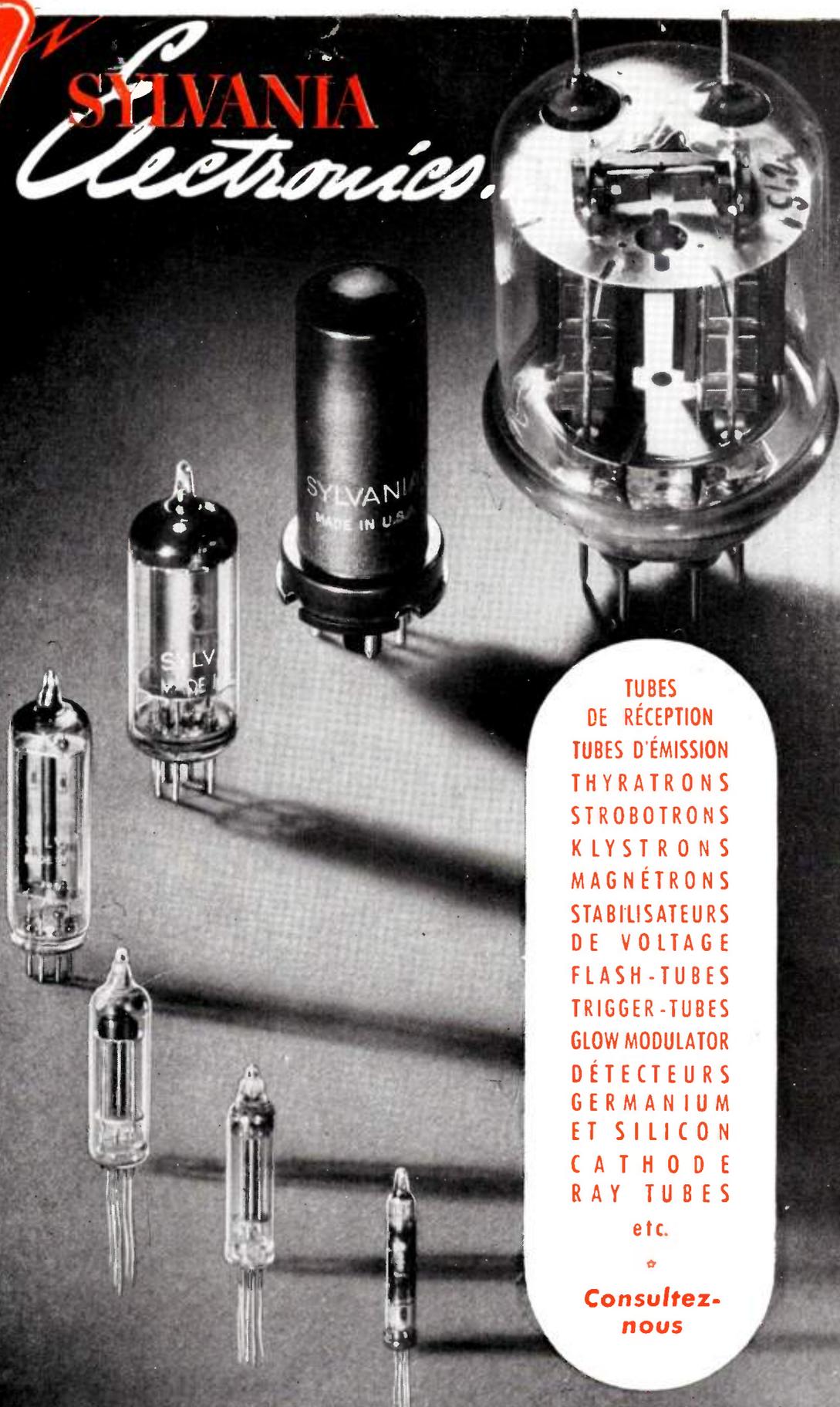
AGENCE PUBLÉDITEC

Régisseur exclusif de la Publicité de l'Onde Electrique : Agence-Publéditec-Domenach, 21, Rue des Jeuneurs, PARIS-2^e, Tél. CENTral 97-63





SYLVANIA
Electronics.



TUBES
DE RÉCEPTION
TUBES D'ÉMISSION
THYRATRONS
STROBOTRONS
KLYSTRONS
MAGNÉTRONS
STABILISATEURS
DE VOLTAGE
FLASH-TUBES
TRIGGER-TUBES
GLOW MODULATOR
DÉTECTEURS
GERMANIUM
ET SILICON
CATHODE
RAY TUBES
etc.

☆
**Consultez-
nous**

AGENT EXCLUSIF POUR LA FRANCE :

RADIO TELEVISION FRANÇAISE

29, RUE D'ARTOIS, PARIS-8^e - TÉL. BAL. 42-35 et 36

AGENCE PUBLÉDITEC DOMENACH

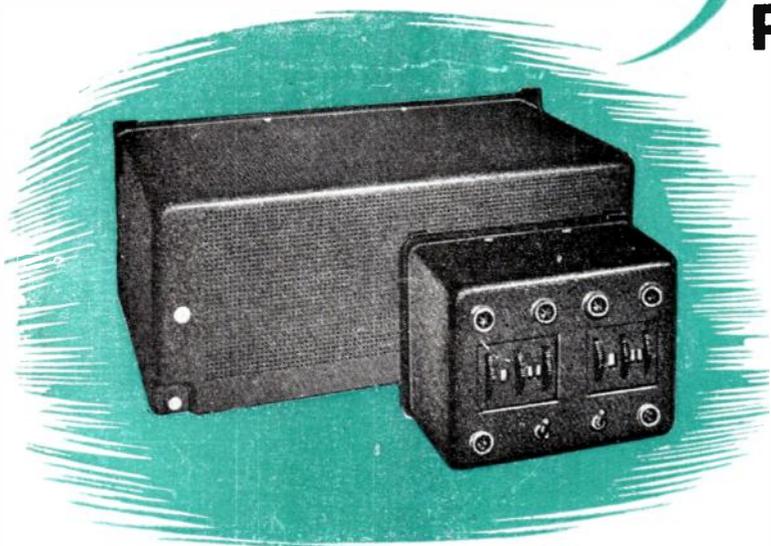
SADIR - CARPENTIER

3

Présente

POSTES DE BORD

VHF

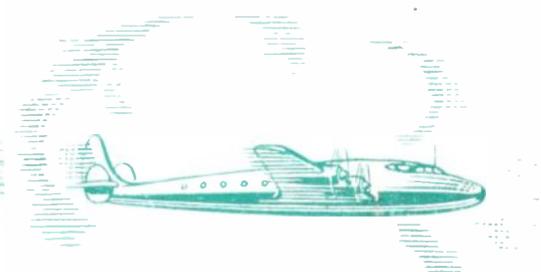
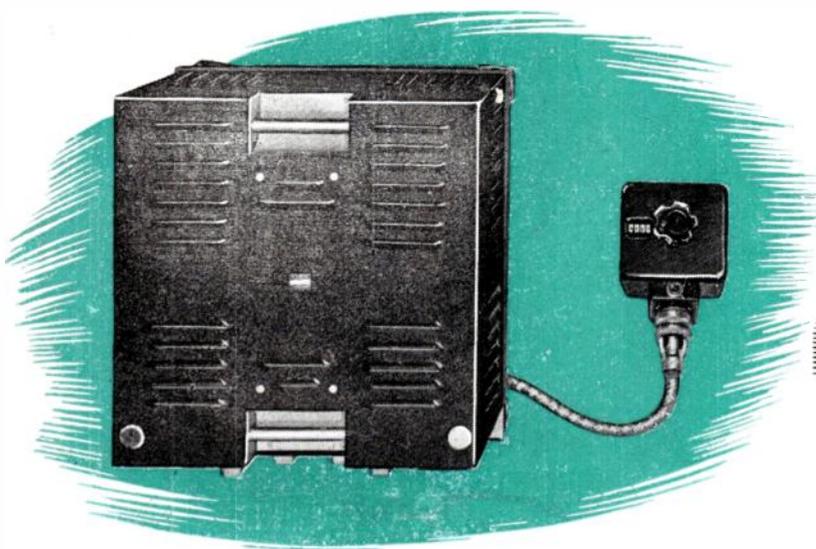


POUR AVIONS MILITAIRES

E.R. 546

POLYCANAUX

Gamme 100 à 156 Mc/s.
Grande facilité d'emploi.

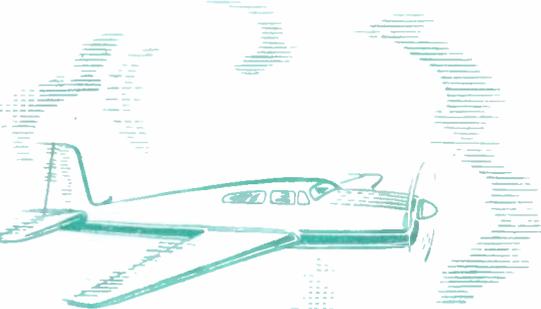
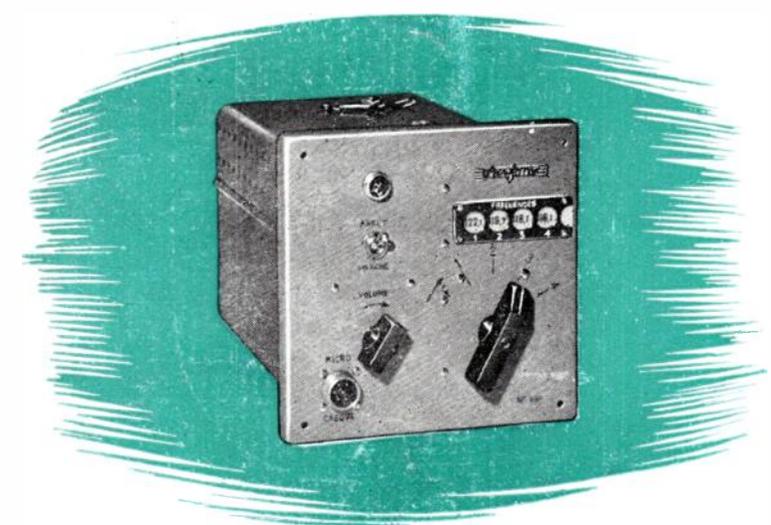


POUR AVIONS COMMERCIAUX

E.R. 420

160 CANAUX

Gamme 116 à 132 Mc/s.
Conforme aux recommandations de l'O.A.C.I.



POUR AVIONS LÉGERS

AIRFONE

4 CANAUX

Gamme 108 à 156 Mc/s.
Poids inférieur à 6 Kgs.
Dimensions réduites.
S'utilise comme un téléphone ordinaire

SADIR - CARPENTIER

101, BOULEVARD MURAT - PARIS (16^e)

AGENCE PUBLÉDITEC-DOMENACH



Société Anonyme
au Capital de
400.000.000 de F

AUT. 81-25

Régisseur exclusif de la Publicité de l'Onde Electrique : Agence-Publéditec-Domenach, 21, Rue des Jeuneurs, PARIS-2^e, Tél. CENTral 97-6.