

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

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

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

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

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

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	1970, n° 3
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1970

Collation	1 vol. (38 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	44
Cote	INDNAT (92)
Sujet(s)	Industrie
Thématique(s)	Généralités scientifiques et vulgarisation
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	03/09/2025
Date de génération du PDF	08/09/2025
Recherche plein texte	Non disponible
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT.92

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

Bibliographie

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

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

S. E. I. N.
Bibliothèque

L'INDUSTRIE NATIONALE

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

*fondée en 1801
reconnue d'utilité publique*



Revue trimestrielle
1970 - N° 3



SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES.

— L'atome nous donnera-t-il l'heure ?

par B. GUINOT p. 3

— Les horloges atomiques

Par C. AUDOIN p. 13

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

Prix et Médailles décernés pour l'année 1969.

1° Distinctions exceptionnelles	p. 33
2° Médailles d'Or	p. 34
3° Médailles et Prix spéciaux	p. 34
4° Médailles de Vermeil	p. 36
5° Médailles d'Argent	p. 36
6° Médailles de Bronze	p. 37

Publication sous la direction de M. Jacques TREFOUËL

Membre de l'Institut, Président

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

Abonnement annuel : 40 F

le n° : 10,00 F

C.C.P. Paris, n° 618-48

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

*L'atome nous donnera-t-il l'heure ? **

par B. GUINOT

*Directeur du Bureau international
de l'Heure*

Souvent, on me pose des questions du type : « Avec quelle précision, l'horloge parlante donne-t-elle l'heure ? » Ces questions supposent qu'il existe une échelle de temps idéale sur laquelle on peut se régler. Quelle est cette échelle idéale ? Comment l'obtient-on ? A quoi sert-elle ? Coexiste-t-il plusieurs échelles que l'on emploie suivant les applications en vue ? Voilà les questions auxquelles je vais m'efforcer de répondre.

Une échelle de temps est avant tout une échelle de repérage, d'un emploi universel, qui permet à tous d'assigner à un événement une coordonnée dans le temps qui sera appelée sa *date*. Nous admettrons que cette date est indépendante des coordonnées d'espace, c'est-à-dire que nous négligerons les effets relativistes qui restent encore petits vis-à-vis des précisions atteintes. Pour remplir ce rôle de base de repérage et par suite de base de synchronisation, il suffit qu'une échelle de temps soit disponible constamment et facile à lire avec précision : ces conditions seraient remplies par n'importe quel temps diffusé par des procédés radio-électriques. Mais, afin de permettre de diffuser simplement avec l'échelle de temps l'unité d'intervalle de temps et afin de permettre les interpré-

tations théoriques de mouvements, on demande de plus à une échelle de temps d'être uniforme.

Cette dernière qualité dont on perçoit intuitivement la signification peut se définir ainsi : si une expérience de physique a son début et sa fin aux dates t_A et t_B , notées dans l'échelle de temps T , on dira que sa *durée*, mesurée par T , est $t_B - t_A$; si la même expérience est recommencée ultérieurement entre les instants t'_B et t'_A , la nouvelle mesure de sa durée est $t'_B - t'_A$; l'échelle T est uniforme si $t_B - t_A = t'_B - t'_A$ quels que soient t_A et t'_A . Si cette égalité n'a pas lieu, on appelle défaut d'uniformité le nombre ϵ défini par

$$\epsilon = \frac{(t'_B - t'_A) - (t_B - t_A)}{(t_B - t_A)}$$

Il y a deux méthodes fondamentalement différentes pour obtenir une échelle de temps uniforme. La première méthode, celle des astronomes, consiste à choisir comme horloge un mouvement suffisamment simple pour que son étude théorique puisse être développée complètement : les lois de la Mécanique rationnelle fournissent alors un développement littéral du mouvement qui exprime en fonction du paramètre « Temps » les positions des mobiles en-

* Conférence prononcée le 27 novembre 1969 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

visagés. Des mesures permettent de fixer les valeurs numériques des coefficients du développement ; il reste le libre choix d'une origine pour le temps et d'une unité de mesure qui est l'*unité de temps*. On voit de suite d'où peuvent provenir les erreurs : la théorie peut être imparfaite, par exemple, on a pu négliger certaines forces, et les valeurs numériques peuvent être erronées. Afin que tous les observateurs obtiennent la même échelle de temps, on adopte un développement numérique conventionnel. Ainsi, aux erreurs d'observations près, la date est parfaitement déterminée, mais les erreurs du développement conventionnel affectent l'uniformité de l'échelle et, par suite, la constance de l'unité de temps qu'on en dérive.

La seconde méthode consiste à choisir un phénomène de durée invariable que l'on peut reproduire à tout instant et qui constitue un *étalon de temps*. A ses erreurs intrinsèques près, cet étalon donne donc l'*unité de temps*, invariable, en l'absence de toute théorie. On peut alors construire une échelle de temps en mettant bout à bout les unités de temps ainsi définies ; l'origine est arbitraire, c'est une origine de décompte. Ici, aux erreurs de la définition pratique de l'unité de temps s'ajoutent les erreurs de la méthode de sommation. De plus, les étalons de temps étant, dans la pratique, des appareils artificiels (même s'ils mettent en évidence une durée naturelle), ils sont faillibles. On y remédie en multipliant le nombre de sorte qu'on arrive à une multiplicité d'échelles de temps associées — ce qui ne convient évidemment pas.

Depuis quelques années, les deux méthodes sont employées conjointement, pour les besoins scientifiques. Il existe deux échelles de temps astronomiques, le *temps universel* TU et le *temps des éphémérides* TE, dont les horloges sont respectivement le mouvement de rotation et le mouvement de translation de la Terre. Il existe, d'autre part, une échelle de temps intégré, le *temps atomique* TA, obtenu par cumul des secondes définies par une transition atomique de

l'atome de césium. On utilise, en outre, pour les émissions de signaux horaires une variante du temps atomique, désignée par *temps universel coordonné* TUC qui subit des discontinuités afin de suivre approximativement TU. Nous examinerons brièvement les propriétés de ces divers temps.

TEMPS UNIVERSEL.

Le temps universel repose sur la rotation terrestre. Il provient en principe du mouvement apparent diurne du Soleil, mais, en pratique, il est mesuré par le mouvement diurne des étoiles... Il respecte presque parfaitement, à long terme, l'alternance des nuits et des jours, de sorte qu'il sera toujours environ Midi TU lors du passage du Soleil au méridien de Greenwich. L'étude théorique de la rotation terrestre montre que l'échelle TU serait uniforme si la Terre était un corps solide. Cette hypothèse étant admise dans le passé, on avait adopté comme unité de temps la seconde de TU, appelée *seconde de temps moyen*. Mais par comparaison avec d'autres mouvements astronomiques, on a constaté des défauts d'uniformité de TU de 10^{-7} (10 ms par jour) qu'on explique par des mouvements de masses sur la Terre (vents, courants) et à l'intérieur, ainsi qu'à l'action de la Lune. Bien qu'on ait abandonné la seconde de temps moyen comme unité légale de temps en 1961, TU est resté la base des temps légaux : ces derniers en dérivent suivant le système des fuseaux horaires de sorte que les temps légaux doivent être $TU \pm n$ heures, n étant entier. Notons que TU est souvent désigné, à tort, par les initiales GMT (Greenwich Mean Time). Il est important de noter que depuis 1961 les dispositions légales relatives à l'échelle de temps et à l'unité de temps ne sont plus homogènes, de sorte que la diffusion du temps légal ne donne plus accès à la seconde légale. Pour les usages précis, TU sert d'indicateur de la position de la Terre autour de son axe. Il est requis immédiatement à 1 seconde près pour la navigation astronomique. On le demande avec la meilleure préci-

sion possible, mais après un délai plus ou moins long, pour la géodésie, la recherche spatiale et la géophysique. Afin d'obtenir la meilleure précision, toutes les mesures mondiales sont centralisées par le Bureau international de l'Heure. Les signaux horaires étant émis dans le système TUC, le BIH publie avec un délai d'un mois, des tables donnant la meilleure estimation de TU-TUC ; la précision est de 1 ms.

TEMPS DES EPHÉMÉRIDES.

Pour remédier au défaut d'uniformité de TU, les astronomes ont adopté une nouvelle échelle de temps déduite du mouvement de translation de la Terre autour du Soleil. Ici, les forces mises en jeu sont plus simples et le développement théorique du mouvement, qui pour l'observateur se traduit par le mouvement du Soleil sur la sphère étoilée, peut être parfait. Il existe cependant certaines limitations dues aux valeurs numériques de constantes. D'autre part, afin d'éviter les difficiles observations du Soleil, on a défini une version pratique du TE d'après le mouvement de la Lune qui n'est pas rigoureusement équivalente. L'uniformité est de l'ordre de 10^{-9} . TE a le très grave inconvénient de ne pouvoir être lu qu'avec une précision mauvaise : 0,1 s : il est ainsi difficile de mettre à profit son uniformité et son emploi est resté du domaine de la mécanique céleste. Cependant l'unité de temps associée, la *seconde des éphémérides* a été l'unité de temps légale de 1961 à maintenant. Mais son remplacement par la seconde atomique a été décidée par la Conférence générale des Poids et Mesures de 1967.

TEMPS ATOMIQUE.

En 1955 les physiciens anglais Essen et Parry parvenaient à rendre utilisable pour mesurer le temps la fréquence de transition entre deux niveaux énergétiques de l'atome de césium. L'échelle de temps atomique qu'on a pu construire en étalonnant la fréquence d'horloges à quartz fut dès cette date plus uniforme

que les échelles astronomiques ; son élaboration a suivi les progrès des étalons atomiques et de leurs moyens de comparaison : je n'en donnerai les propriétés que dans l'état actuel des techniques.

Le perfectionnement continu des étalons de temps à césium a permis de redéfinir la seconde dans les termes suivants : « la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». Bien entendu, dans les trois définitions de la seconde qui se sont succédées en quelques années, on a fait en sorte que la durée de chacune soit aussi proche que possible de la durée de celle qui l'a précédée ; ainsi, pour les usages communs, le changement passe inaperçu. La seconde atomique peut être réalisée avec une inexactitude inférieure à 10^{-12} : l'exactitude est mille fois supérieure à celle de la seconde de TE et elle continue à s'améliorer. Un autre avantage considérable de la seconde atomique est qu'il est facile de l'utiliser : il suffit d'acheter un étalon atomique et de le placer dans son laboratoire, il délivre des secondes sans qu'il soit nécessaire d'attendre les résultats des travaux des astronomes.

Les étalons à césium modernes sont construits en horloge. L'un d'eux mis en service continu délivre une échelle de temps uniforme à quelques 10^{-13} près et il pourrait servir d'horloge de référence fournissant le temps atomique. Cependant, pour éviter les risques d'interruption et aussi pour augmenter encore l'uniformité du temps atomique, on réalise un temps atomique moyen sur un grand nombre d'étalons qu'il faut pouvoir comparer à distance, en permanence. En 1969, ces comparaisons se font en recevant les impulsions du système de navigation radio-électrique LORAN-C. Le temps de propagation de ces impulsions par onde de sol est stable à 0,1 μ s près ; il peut être déterminé une fois pour toutes à l'aide d'une horloge atomique en marche. L'inconvénient du LORAN-C est de ne pas couvrir toute la

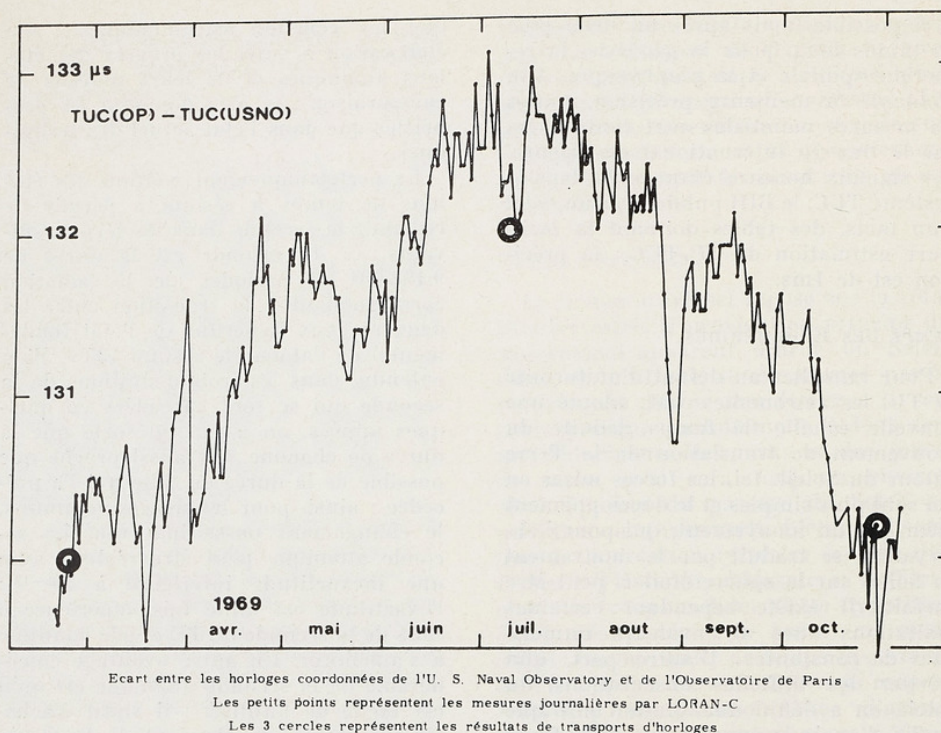


FIGURE 1.

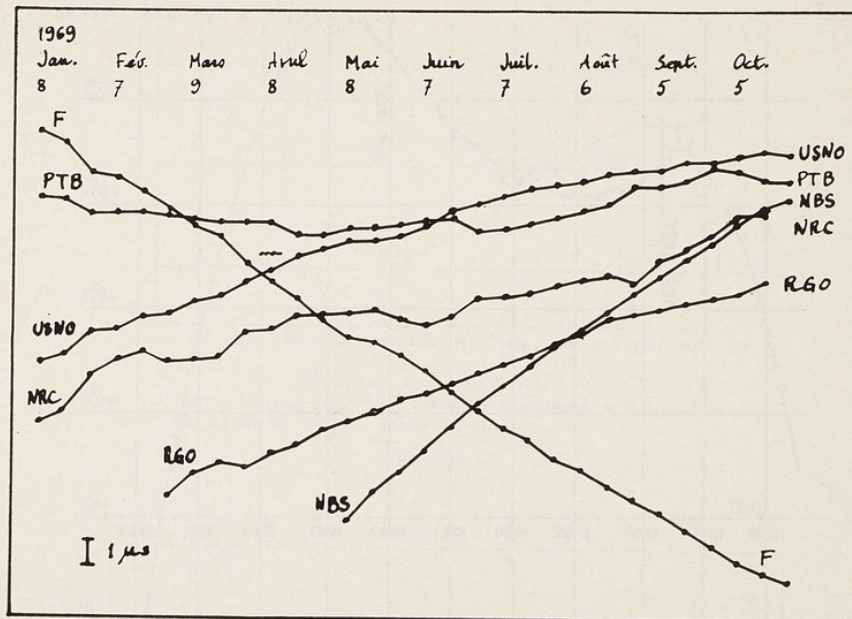
planète. Néanmoins, il permet de relier les laboratoires horaires d'Europe et d'Amérique du Nord de sorte que le Bureau international de l'Heure peut établir une échelle de temps atomique moyenne à partir des données de 6 laboratoires (en novembre 1969).

La *fig. 1* montre une comparaison des horloges de l'U.S. Naval Observatory et de l'Observatoire de Paris par l'intermédiaire du LORAN-C et par trois transports d'horloge : on voit que la précision d'une fraction de microseconde est atteinte en lissant les données sur quelques jours. La *fig. 2* montre les valeurs moyennes par 10 jours des écarts entre le temps atomique international et les temps de quelques laboratoires. Le fait que les courbes représentatives soient presque rectilignes, mais avec une pente, montre que les étalons sont plus stables qu'ils ne sont exacts. L'analyse de ces

données montre que TA est uniforme à 10^{-13} près sur un intervalle de temps de l'ordre de l'année.

Le temps atomique n'est pas encore diffusé directement. Mais s'il le fallait, on pourrait d'ores et déjà le transmettre à 1 μ s près par LORAN-C et, naturellement avec une précision moindre par les méthodes classiques d'envoi de signaux horaires.

Les figures 3 à 6 montrent le comportement relatif des échelles de temps que nous venons d'étudier. Sur la *fig. 3* on voit que TU-TE qui était proche de 0 en 1900 s'approche de -40 s maintenant ; la rotation de la Terre présente une succession d'accélération (concavité vers le haut) et de ralentissements (concavité vers le bas) ; depuis quelques années, elle ralentit. La *fig. 4* donne la différence entre TU et un temps uniforme déduit du temps atomique par une



Ecarts de temps individuels avec le temps international du BIH
(l'origine des ordonnées n'est pas la même pour tous les temps individuels)

FIGURE 2.

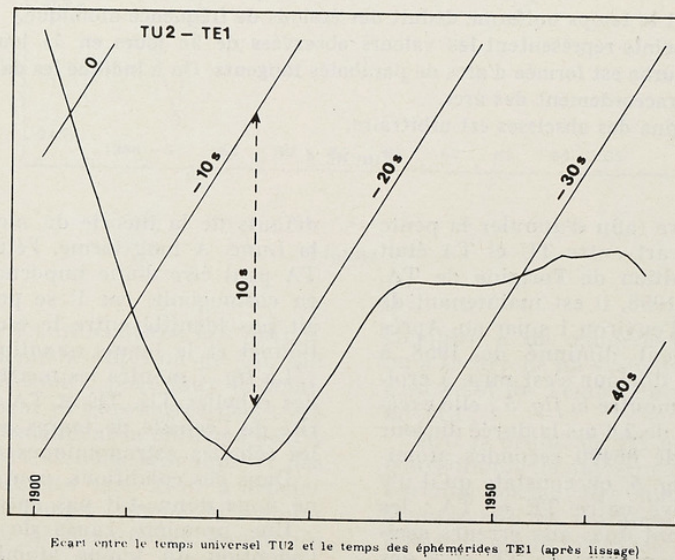
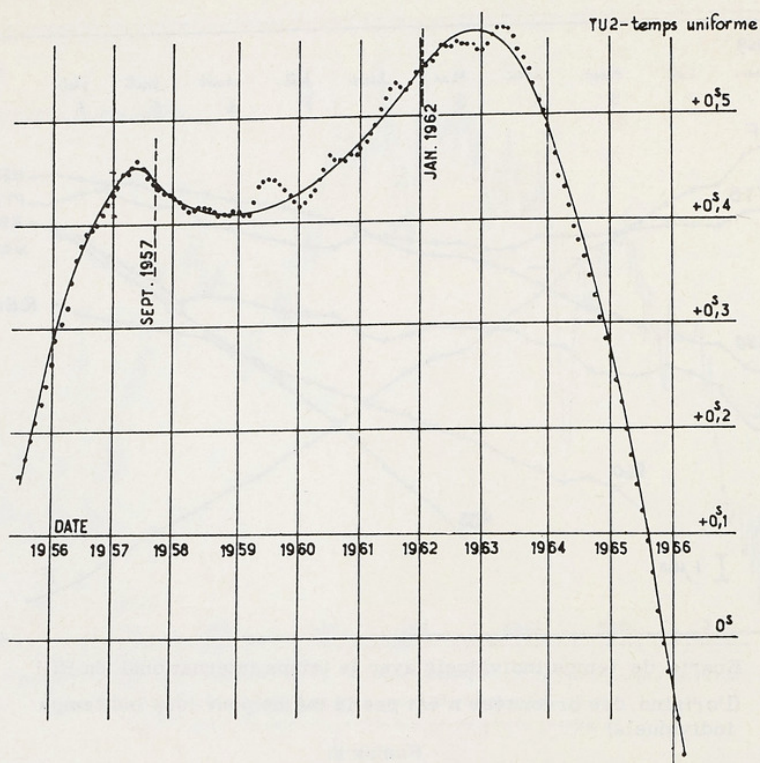


FIGURE 3.



— Différence entre le temps universel TU 2
et le temps uniforme déduit des étalons de fréquence atomique.
Les points représentent les valeurs observées de 30 jours en 30 jours.
La courbe est formée d'arcs de paraboles tangents. On a indiqué les dates
de raccordement des arcs.
L'origine des abscisses est arbitraire.

FIGURE 4.

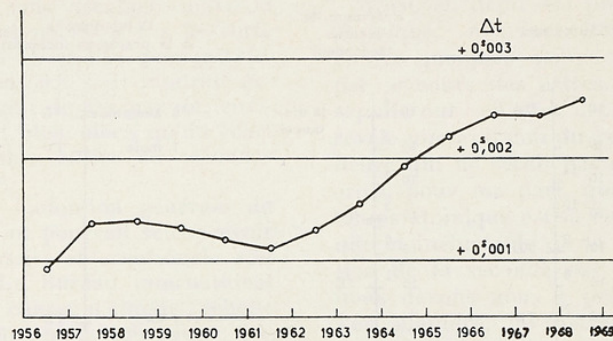
relation linéaire (afin d'annuler la pente générale) ; l'écart entre TU et TA était nul, par définition de l'origine de TA, le 1^{er} janvier 1958, il est maintenant de 8 s et il croît d'environ 1 s par an. Après avoir légèrement diminué de 1958 à 1961, la durée du jour s'est mise à croître, comme le montre la *fig. 5* ; elle excède maintenant de 2,6 ms la durée du jour « atomique » de 86400 secondes atomiques. Sur la *fig. 6*, on constate qu'il n'y a pas de dérive entre TE et TA : les irrégularités sont dues aux erreurs accidentelles de la mesure de TE et à des

défauts de la théorie du mouvement de la Lune. A long terme, l'étude de TE - TA peut être d'une importance capitale en cosmogonie, car il se peut qu'il n'y ait pas identité entre le temps gravitationnel et le temps quantique.

La *fig. 7* montre les mérites comparés des échelles TU, TE et TA. La supériorité de l'échelle de temps atomique sur les échelles astronomiques est évidente.

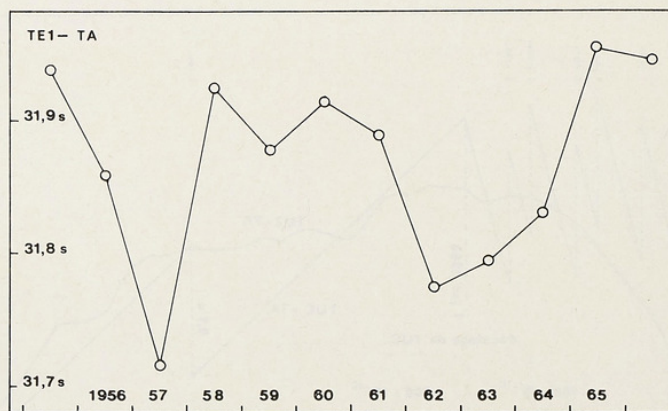
Dans ces conditions, pourquoi l'atome ne nous donne-t-il pas encore l'heure ?

Une première cause de retard dans l'adoption du temps atomique est un



Variations de la durée du jour.
La durée du jour est 86 400 secondes atomiques + Δt .
On donne les valeurs annuelles moyennes de Δt .

FIGURE 5.



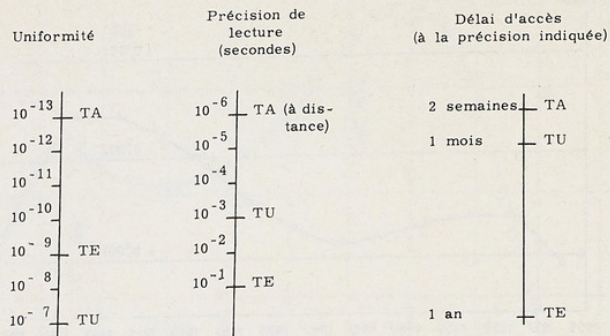
Écart entre le temps des éphémérides (version TE1) et le temps atomique

FIGURE 6.

conflit entre les utilisateurs. Les navigateurs réclament la diffusion de TU, qui leur est nécessaire pour faire le point, immédiatement et sans corrections ; les physiciens demandent la diffusion de TA afin d'avoir la seconde atomique et des fréquences exactes sans avoir à acheter un étalon de temps. Comme on a voulu éviter d'avoir deux systèmes simultanés de diffusion du temps, qui pourraient

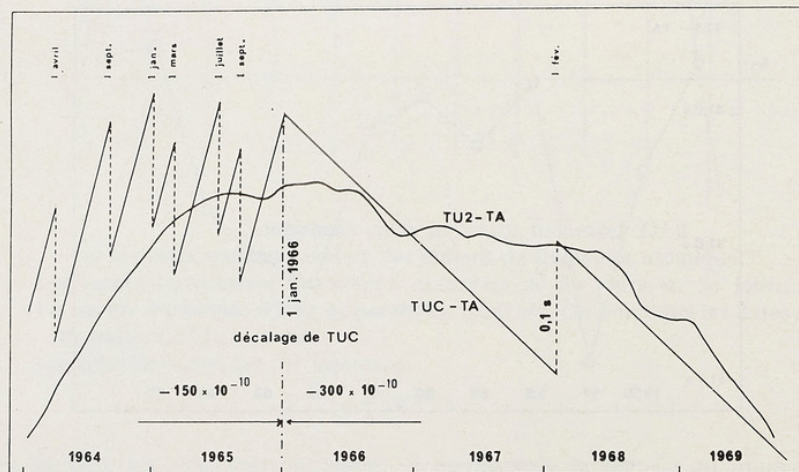
conduire à de dangereuses confusions, on a recherché un système de compromis c'est celui du Temps Universel coordonné TUC.

TUC se déduit de TA par une relation conventionnelle, linéaire, dont la pente et l'origine peuvent être changées de temps à autre afin de maintenir $|TU - TUC|$ inférieur à une tolérance convenue (0,1 s actuellement). La connaissance de cette



Mérîtes comparés des échelles de temps

FIGURE 7.



Comportement relatif de TU2, TUC et TA
(Pour établir cette figure, on a corrigé TA de $-2 \frac{1}{3}$ ms par jour)

FIGURE 8.

penne, appelée décalage, et des sauts d'origine permettent de remonter de TUC à TA.

La fig 8 montre comment TUC suit TU depuis 1964. De 1964 à 1966, le ralentissement de la rotation terrestre a rendu très mauvais le décalage relatif de -150×10^{-10} adopté pour TUC, de

sorte que de très nombreux sauts ont été nécessaires. Le changement de décalage de 1966, décidé par le BIH a permis de ne faire qu'un seul saut de 1966 à maintenant.

Ce système ingénieux est cependant critiqué, surtout à cause du décalage. Aussi étudie-t-on un nouveau système

de compromis, sans décalage, mais où les sauts seraient portés à 1 s de sorte que l'écart entre TU et TUC pourrait dépasser légèrement 0,5 s. Il faudrait actuellement un saut de 1 s par an. environ. Il n'y aurait plus, alors, qu'un écart égal à un nombre entier de secondes entre TUC et TA *.

D'autre part, l'adoption générale du temps atomique ne pourrait se concevoir sans que son assise internationale soit mieux établie. Le Bureau international de l'Heure a été chargé d'établir l'échelle de TA par son union scientifique parente : l'Union astronomique internationale ; il serait nécessaire qu'il reçoive son mandat de la part d'un organisme intergouvernemental. Le Comité international des Poids et Mesures a donc été saisi de cette question et il a établi un comité consultatif chargé de l'étudier.

Ainsi, en dépit des progrès du temps atomique, nos activités continueront encore quelques temps à être réglées par le cours des astres. Beaucoup s'en réjouiront : en effet, des collègues m'ont révélé une aversion du public contre une heure qui ne serait pas celle du ciel. Je crois, pour ma part, que l'adoption du temps atomique est la conséquence logique et inéluctable de la nouvelle définition de la seconde par l'atome et que nous devons nous y préparer. Loin de s'en plaindre, les astronomes considèrent comme un bienfait l'existence d'une échelle de temps indépendante de l'astronomie et d'être enfin libérés de cette entreprise apparemment sans espoir d'avoir à déterminer le temps d'après les mouvements célestes et à étudier les mouvements célestes avec ce temps.

* Note ajoutée sur les épreuves. Une nouvelle définition de TUC doit être mise en application le 1^{er} janvier 1972. Les décalages de fréquences auront alors disparu et les sauts de TUC seront d'une seconde exactement. La différence entre TA et TUC sera un nombre entier de secondes.

*Les horloges atomiques **

par C. AUDOIN

Maître de Recherche au C.N.R.S.

La définition de l'unité de temps, la seconde, est maintenant fondée sur un phénomène atomique. La seconde est la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

L'appareil qui permet d'observer cette transition et qui délivre un top chaque seconde de temps atomique est une horloge atomique, l'horloge à jet de césium en l'occurrence.

Il existe d'autres types d'horloges atomiques. Les plus répandues sont, à l'heure actuelle : l'horloge à jet de césium, l'horloge à hydrogène atomique et l'horloge à rubidium à pompage optique. Ce sont celles dont je parlerai ici.

L'idée de base qui a conduit à la réalisation des horloges atomiques, ainsi qu'à la réalisation de l'étalon de longueur au krypton est fondée sur la théorie quantique des atomes qui postule que la différence d'énergie entre deux niveaux donnés d'un atome libre est — à des effets relativistes près — invariante dans le temps et dans l'espace.

Comme l'a indiqué M. Guinot dans

une conférence récente, des groupes d'horloges atomiques, comparées de part et d'autre de l'Atlantique montrent une stabilité de 10^{-13} près environ sur une durée de une année, ce qui correspond à un écart de quelques microsecondes par an (ou de 1 s pour 3.000 siècles, si l'on admet cette extrapolation hardie !).

Les performances actuelles des horloges atomiques résultent des progrès technologiques accomplis durant la dernière décennie, la plus jeune des horloges atomiques, le maser à hydrogène ayant été inventé en 1960.

1. — PRINCIPES PHYSIQUES MIS EN ŒUVRE DANS LES HORLOGES ATOMIQUES

Les connaissances nécessaires à la réalisation des horloges atomiques, réalisation entreprise à grande échelle depuis 1949 ont été accumulées depuis le début du xx^e siècle. Toutes ont été acquises dans des travaux de recherche fondamentale. Certaines notions, telle celle de l'émission stimulée (Einstein 1917), n'ont abouti à des applications pratiques que plusieurs dizaines d'années après leur découverte.

* Conférence prononcée le 29 janvier 1970 devant la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

I.1. — STRUCTURE HYPERFINE.

Les horloges à hydrogène, césium, rubidium, utilisent la structure hyperfine, à l'état fondamental, des atomes correspondants. Cette structure (Pauli 1924) résulte d'un couplage entre le noyau et l'électron périphérique de ces atomes. (L'atome d'hydrogène ne possède qu'un

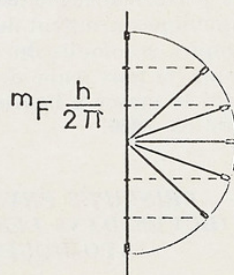
seul électron. Le césium et le rubidium, qui sont des alcalins, ne possèdent aussi qu'un seul électron sur la couche électronique la plus externe).

Le noyau d'un atome possède un moment cinétique propre ou spin nucléaire

→
I dont la grandeur est $\frac{h}{2\pi} \sqrt{I(I+1)}$, où h est la constante de Planck et I un

ATOMES H ^{87}Rb ^{133}Cs

	ELECTRON	NOYAU	TOTAL
MOMENT CINETIQUE	$\vec{J}$	$\vec{I}$	$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$
NOMBRE DE SPIN	J	I	$F = I \pm 1/2$
ATOME H	$J = 1/2$	$I = 1/2$	$F = 0; 1$
// ^{87}Rb	$J = 1/2$	$I = 3/2$	$F = 1; 2$
// ^{133}Cs	$J = 1/2$	$I = 7/2$	$F = 3; 4$



$$m_F = \pm F, \pm(F-1), \dots, 0$$

FIG. 1. — Résultats essentiels concernant la structure hyperfine de l'hydrogène, du rubidium 87 et du césium 133.

nombre positif entier ou demi-entier. I s'appelle le nombre de spin nucléaire (fig. 1).

L'électron périphérique possède un moment cinétique propre ou spin électronique noté J . Son nombre de spin est $J = 1/2$.

Le moment cinétique total de l'atome dans l'état fondamental se réduit à

→ → →

$F = I + J$. Il résulte de la théorie que le nombre quantique F ne peut prendre, pour les atomes considérés, avec $J = 1/2$, que les valeurs $F = I + \frac{1}{2}$ et $F = I - \frac{1}{2}$.

Pour l'hydrogène, dont le noyau se réduit à un proton, I vaut $1/2$ et F peut prendre les valeurs 0 ou 1. Pour l'isotope 87 du rubidium $I = 3/2$ et $F = 1$

ou 2. Pour l'isotope ^{133}Cs du césium $I = 7/2$ et $F = 3$ ou 4.

La projection sur l'axe de quantification du vecteur F ne peut prendre que les valeurs $m_F h/2\pi$, m_F étant égal à $\pm F, \pm (F-1), \dots, 0$. m_F est le nombre quantique magnétique associé au moment cinétique total.

Aux moments cinétiques I et J sont associés des moments magnétiques, de même direction. Ces moments magnéti-

ques possèdent une énergie magnétique mutuelle dont la grandeur dépend de leur orientation relative, et donc de la

valeur du produit scalaire $I \cdot J$. Les valeurs des nombres de spin I et J étant données, la valeur de $I \cdot J$ dépend de F . Ce produit scalaire peut donc prendre deux valeurs distinctes, et il y a deux niveaux de structure hyperfine, en l'absence de champ magnétique extérieur.

Lorsque les atomes sont placés dans

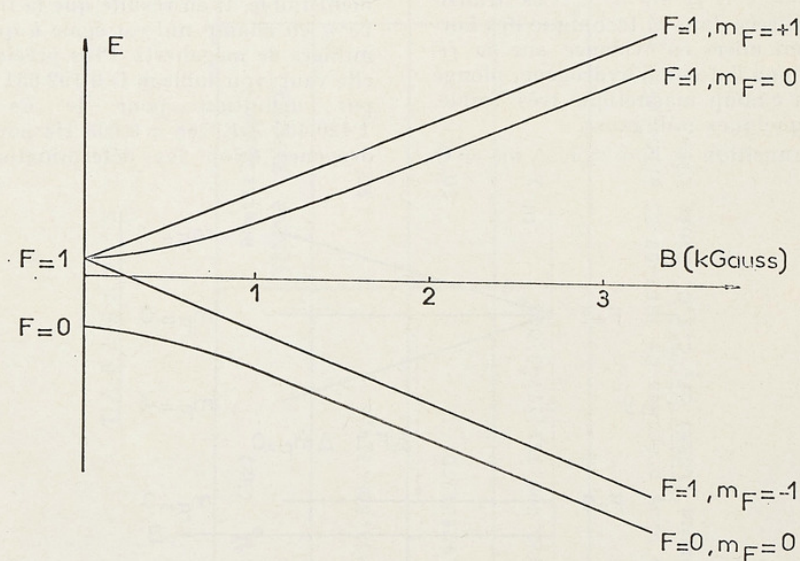


FIG. 2. — Diagramme magnétique de structure hyperfine de l'hydrogène.

un champ magnétique continu, l'énergie des moments magnétiques dans le champ appliqué doit être ajoutée à l'énergie mutuelle. Chacun des deux niveaux est alors décomposé en autant de sous-niveaux qu'il y a de valeurs possibles de m_F , soit $2F + 1$.

La figure 2 montre le diagramme d'énergie de structure hyperfine de l'atome d'hydrogène. Celle-ci est la plus simple qui puisse se concevoir. Celles des atomes de rubidium et de césium sont beaucoup plus compliquées comme on peut s'en convaincre en calculant le nombre de sous-niveaux possibles.

I.2. — TRANSITIONS PERMISES.

Une transition mettant en jeu un photon et deux niveaux d'énergie peut avoir lieu si des conditions, de deux natures différentes, sont remplies.

1° Conservation de l'énergie.

Lorsqu'une transition entre deux niveaux dont l'énergie diffère de $E_2 - E_1$ a lieu, l'atome émet ou absorbe une onde électromagnétique de fréquence ν telle que la condition de résonance (relation de Bohr) :

$$h\nu = E_2 - E_1$$

soit satisfaite. Cette relation traduit la conservation de l'énergie. En fait, la résonance peut avoir une certaine largeur, comme nous le verrons au paragraphe suivant.

2° Règles de sélection.

Des transitions entre sous-niveaux sont permises, à condition qu'elles satisfassent aux règles de sélection $\Delta F = 0$ et

$\Delta m_F = \pm 1$ ou $\Delta F = \pm 1, \Delta m_F = 0$, ou $\Delta F = \pm 1, \Delta m_F = \pm 1$. Ces transitions utilisées dans la technique des horloges sont mises en évidence sur la figure 3 pour l'atome d'hydrogène, plongé dans un champ magnétique très faible, de 0 à quelques milligauss.

Une transition $\Delta F = \pm 1, \Delta m_F = 0$

est induite quand le champ magnétique variable de l'onde électromagnétique est parallèle au champ magnétique statique appliqué.

Les deux sous-niveaux $m_F = 0$ des atomes considérés (H, Rb, Cs) ont, en champ faible, leur énergie qui ne dépend de la valeur de l'induction magnétique qu'au second ordre.

C'est cette transition qui est utilisée dans les horloges atomiques.

L'énergie de couplage entre le spin du noyau et celui de l'électron est relativement faible. Il en résulte que la fréquence ν_0 en champ nul est égale à quelques milliers de mégahertz. Plus précisément, elle vaut (voir tableau I) 9 192 631 770 Hz par définition pour le Cs 133 ; 1 420 405 751, 768 $\pm$ 0,003 Hz pour l'hydrogène, selon les déterminations les

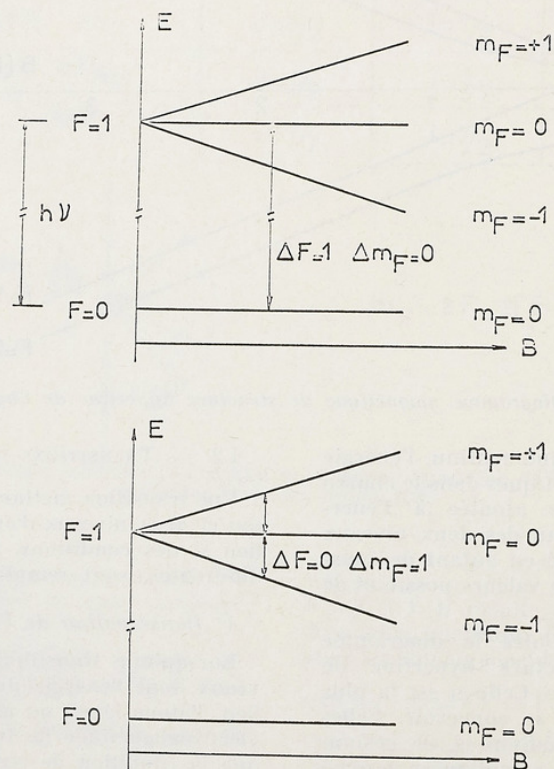


FIG. 3. — Atome d'hydrogène en champ magnétique faible.

T A B L E A U I

ATOME	ν_0 (Hz)	B(milligauss) VALEUR TYPIQUE	CORRECTION	$\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0}$
Rb 87	6.834.685.314,5	50	$2,1 \times 10^{-10}$	
Cs 133	9.192631770	50	$1,15 \times 10^{-10}$	
H	$1.420.405.751,777 \pm 0,003^*$	1	$0,02 \times 10^{-10}$	

(*) moyenne des mesures les plus précises de 1967-68-69 effectuées par L.N. Bodily (H.P.),
H. Peters (NASA), C. Menoud (LSRH) cf. C.I.C. Paris 1969.

plus récentes ; 6.834.685.314,5 Hz environ pour le Rb 87.

Dans un champ magnétique d'induction B non nulle, la fréquence de la transition d'horloge $\Delta F = \pm 1$, $\Delta m_F = 0$ vérifie la loi

$$\nu = \nu_0 + CB^2$$

La constante C dépend de l'atome considéré. Les valeurs de B utilisées dans les horloges atomiques, ainsi que le terme correctif $(\nu - \nu_0)/\nu_0$ sont indiqués dans le *tableau I*.

Une transition $\Delta F = 0$, $\Delta m_F = \pm 1$ est induite quand le champ magnétique de l'onde est perpendiculaire au champ magnétique statique.

La fréquence des transitions basse fréquence $\Delta F = 0$ et $\Delta m = \pm 1$ est, en champ faible, proportionnelle à la valeur de B (la constante de proportionnalité est connue). Elle permet de mesurer, avec une très grande précision, la valeur de B et celle de l'écart de ν à ν_0 .

I.3. — LARGEUR DE LA RÉSONANCE.

La relation de Bohr, $h\nu = E_2 - E_1$, définit le sommet de la résonance atomique. Celle-ci présente une certaine largeur, en conséquence de la relation d'incertitude de Heisenberg. L'incertitude $\Delta\nu$, sur la mesure d'une fréquence de transition est reliée à la durée de l'observation Δt par

$$\Delta\nu \cdot \Delta t \sim 1$$

Ce temps d'observation est :

- un temps de vol lorsque la résonance est observée sur un jet (Cs),
- le temps moyen qui sépare deux collisions modifiant l'état quantique de l'atome lorsque la résonance est observée dans une cellule (H, Rb).

La détermination du sommet de la courbe de résonance est donc d'autant plus précise que Δt est plus grand : dans une horloge atomique le temps pendant lequel un atome est observé doit être aussi long que possible. En pratique, la valeur de Δt s'étend de quelques ms dans une horloge à Cs commerciale à 1 s environ dans un maser à hydrogène.

I.4. — EMISSION ET ABSORPTION.

Un atome peut passer d'un niveau à l'autre par trois processus différents : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée (un atome peut passer d'un niveau à un autre par d'autres processus que nous n'envisagerons pas explicitement).

L'absorption se produit lorsqu'un photon d'énergie $h\nu$ disparaît en faisant passer un atome du niveau E_1 au niveau $E_2 > E_1$. L'absorption est schématisée sur la figure 4. Le nombre total de photons absorbés est proportionnel à l'excès initial de la population du niveau E_1 , par rapport à la population au niveau E_2 d'une part, ainsi qu'au nombre de photons incidents d'autre part.

L'émission se produit lorsqu'un atome passe d'un niveau d'énergie E_2 à un niveau E_1 d'énergie inférieure, avec création d'un photon d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$.

L'émission spontanée (*fig. 4*) est un phénomène aléatoire : un atome dans l'état E_2 tombe dans l'état E_1 sans qu'aucune action extérieure n'intervienne. L'émission spontanée est totalement négligeable aux fréquences radioélectriques qui nous intéressent

$$1 \text{ GHz} < \nu < 10 \text{ GHz}$$

(Il n'en n'est plus de même aux fréquences optiques).

L'émission stimulée (*fig. 4*) est provoquée par un photon incident qui fait tomber un atome du niveau E_2 au niveau E_1 . La caractéristique essentielle de l'émission stimulée est que l'onde électromagnétique associée au photon créé est en phase avec l'onde incidente dont l'amplitude se trouve ainsi augmentée.

Le nombre total des photons créés par émission stimulée est proportionnel à l'excès initial de la population du niveau E_2 , par rapport à celle du niveau E_1 d'une part, ainsi qu'au nombre de photons incidents d'autre part.

Le coefficient de proportionnalité est le même que pour l'absorption. Il en résulte que si les deux niveaux E_1 et E_2 sont initialement de populations égales l'amplitude de l'onde électromagnétique

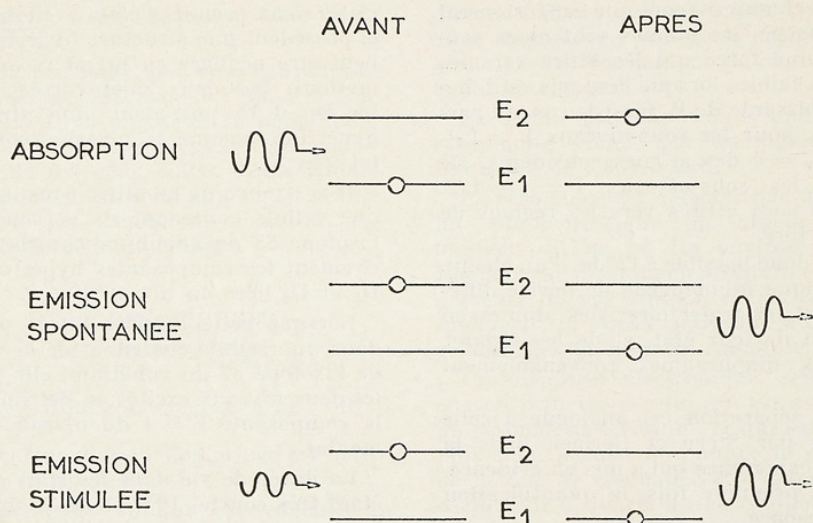


FIG. 4. — Echange de photons et transfert de population par absorption et émission.

et la population des deux niveaux ne sont pas modifiées par l'interaction atome-rayonnement. Pour que l'interaction conduise à un résultat observable, la population des deux niveaux doit donc être différente.

A l'équilibre thermique les atomes se répartissent entre les différents niveaux d'énergie en suivant la statistique de Boltzmann

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-h\nu / kT}$$

où N_1 et N_2 sont, respectivement, les populations des niveaux E_1 et E_2 . k est la constante de Boltzmann et T la température absolue.

Le niveau le plus bas est le plus peuplé, mais pour toutes les transitions entre niveaux de structure hyperfine, $h\nu \ll kT$ et les différences de populations sont insuffisantes pour l'application envisagée. Par contre, il existe, à l'équilibre thermique, une différence de population notable entre niveaux reliés par une transition de fréquence optique.

Nous aboutissons donc au résultat important suivant : pour que l'interac-

tion atome-rayonnement aux fréquences des micro-ondes produise une modification aisément observable de l'état des atomes ou de l'amplitude de l'onde électromagnétique, l'équilibre thermique doit être rompu. Dans les exemples que nous envisagerons, on produit une inversion de population, c'est-à-dire, un large excès d'atomes du niveau d'énergie le plus élevé.

1.5. — PRODUCTION D'UNE DIFFÉRENCE DE POPULATION ENTRE NIVEAUX

1.5.1. — Sélection magnétique d'état (césium, hydrogène).

Lorsque les atomes sont placés dans un champ magnétique de forte valeur leur énergie magnétique est sensiblement celle du moment magnétique de l'électron (celui du noyau est 2.000 fois plus faible environ). Les deux niveaux $m_F = 0$ en particulier ont un comportement différent. L'un a une énergie qui est, en champ fort, fonction croissante de la valeur de l'induction magnétique B , pour l'autre l'énergie décroît (figure 2).

Si ce champ magnétique est fortement inhomogène, les atomes sont alors soumis à une force qui les attire vers les champs faibles lorsque l'énergie est fonction croissante de B . C'est le cas, en particulier, pour les sous-niveaux $F = I + 1/2$, $m_F = 0$ des atomes considérés. De même, les sous-niveaux $F = I - 1/2$, $m_F = 0$ sont attirés vers les régions de champ fort.

Il est donc possible à l'aide d'un champ magnétique inhomogène de dévier différemment les trajectoires des atomes en fonction de leur état, et de les séparer par des diaphragmes convenablement placés.

Cette séparation est analogue à celle obtenue par Stern et Gerlach dans la célèbre expérience qui a mis en évidence, pour la première fois, la quantification dans l'espace.

1.5.2. — *Pompage optique* (rubidium).

Cette méthode a été proposée par le Professeur Kastler en 1950. Elle est utilisée dans l'horloge à rubidium 87.

Une lampe à vapeur de ^{87}Rb émet une lumière rouge (7.800 Å) correspondant à une transition entre l'état fondamental

et les deux premiers états excités (ceux-ci possèdent une structure hyperfine qui peut être négligée en première approximation). Les deux raies correspondantes D_1 et D_2 possèdent une structure hyperfine, comme le niveau fondamental (fig. 5).

Il se trouve qu'un filtre constitué par une cellule contenant de la vapeur de l'isotope 85 du rubidium absorbe sélectivement les composantes hyperfines de D_1 et D_2 liées au niveau $F = 2$.

Lorsque cette lumière filtrée pénètre dans une cellule contenant de la vapeur de l'isotope 87 du rubidium, elle peuple les deux niveaux excités au détriment de la composante $F = 1$ du niveau fondamental.

La durée de vie dans les états excités étant très courte (10^{-8} s), les atomes retombent avec une probabilité égale sur les deux niveaux $F = 1$ et $F = 2$.

Il en résulte un équilibre dynamique tel que la population du niveau $F = 2$ excède notablement celle du niveau $F = 1$.

L'absorption de la lumière filtrée par la cellule à ^{87}Rb est proportionnelle à la population du niveau $F = 1$. Elle est

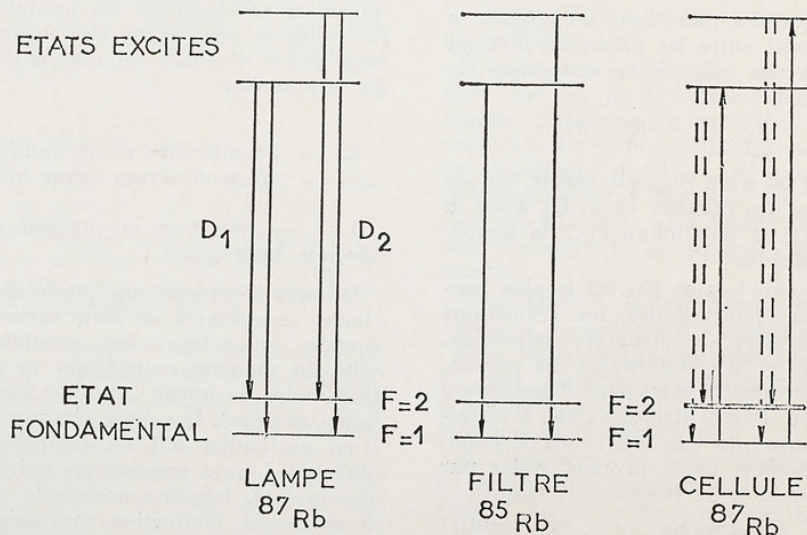


FIG. 5. — Principe du pompage optique du rubidium ^{87}Rb

donc faible lorsque l'équilibre précédent est atteint.

Si l'on provoque, par émission stimulée le passage d'atomes de l'état $F = 2$ à l'état $F = 1$, on augmente la population de cet état (on tend à égaliser les populations de ces deux états). L'absorption de la lumière est donc augmentée, et la détection des transitions entre les niveaux hyperfins est optique.

II. — DESCRIPTION DES HORLOGES

II.1. — HORLOGE A CELLULE DE ^{87}Rb .

Le schéma d'une telle horloge est indiqué sur la *figure 6*.

Le pompage optique est effectué à l'aide de la lampe à ^{87}Rb associée au filtre à ^{85}Rb . La cellule de résonance contient du ^{87}Rb ainsi qu'un gaz inerte ou gaz tampon composé de 55 % de néon et 45 % d'argon, qui a pour but d'augmenter l'efficacité du pompage et de réduire la largeur de la raie de résonance.

Un solénoïde crée le champ magnétique de 50 mG environ qui définit la

direction de la quantification. Un blindage magnétique protège la région d'interaction des fluctuations du champ magnétique ambiant.

La cellule est placée dans une cavité résonnante excitée par un signal à la fréquence de 6.834,7 MHz.

La résonance est détectée par une cellule photoélectrique. Sa largeur à mi-hauteur est de 50 Hz environ. L'effet Doppler est pratiquement éliminé car la présence du gaz tampon réduit considérablement la vitesse moyenne de déplacement des atomes de rubidium.

Un dispositif électronique, semblable en son principe à celui qui est associé à un résonateur à césium, et qui est décrit plus loin, permet de pointer le sommet de la raie de résonance et d'asservir un oscillateur à quartz à une fréquence déterminée par celle de la résonance observée.

L'avantage de l'horloge à rubidium est son faible encombrement, sa faible masse (absence d'aimants) et son coût relativement peu élevé.

Par contre, la fréquence dépend de la présence du gaz tampon et de l'intensité lumineuse. Cette horloge doit donc être calibrée. C'est un étalon secondaire, dont

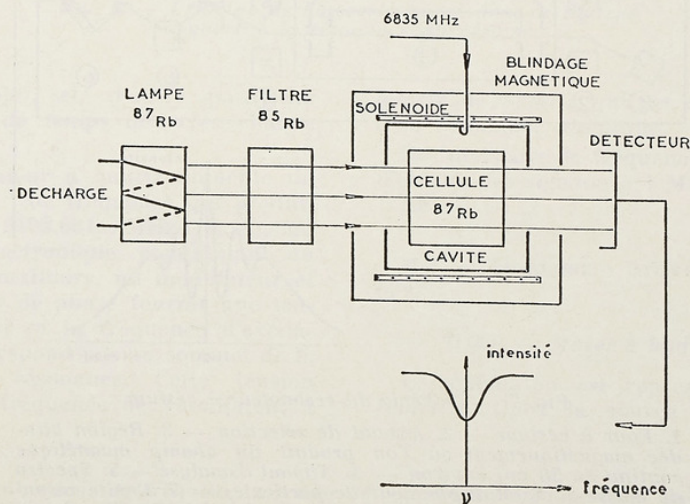


FIG. 6. — Schéma du résonateur à rubidium.

la durée à long terme égale à 10^{-11} par mois environ est 10 à 100 fois plus faible, en ordre de grandeur, que celle d'une horloge à quartz.

II.2. — HORLOGE A JET DE CESIUM.

II.2.1. — Le résonateur à césium.

Il est représenté schématiquement sur la figure 7.

Un four chauffé à 80 °C environ produit, dans un récipient où règne un vide très poussé, un jet atomique d'atomes de césium.

Un premier aimant, qui produit un champ magnétique intense (de l'ordre de 1 Tesla), fortement inhomogène, effectue la sélection d'état. Les atomes d'état $F=4$, $m_F=0$ forment alors un faisceau sensiblement parallèle. Les atomes d'état $F=3$, $m_F=0$ frappent les parois de l'appareil où ils se condensent.

Le faisceau traverse ensuite la région d'interaction avec le champ électromagnétique. Celui-ci est appliqué en deux

régions distinctes, à l'extrémité des deux bras d'une cavité résonnante. Cette disposition, due à l'Américain Ramsey, est adoptée pour des raisons techniques qu'il n'est pas possible de développer ici. Le résultat essentiel est que tout se passe comme si la durée d'interaction était sensiblement égale au temps de vol des atomes entre les deux bras de la cavité. Dans un appareil commercial (Hewlett Packard) la largeur de la raie de résonance est de 530 Hz pour une longueur d'interaction de 25 cm environ. Dans des appareils de laboratoire, la longueur d'interaction est plus longue (plusieurs mètres) et la raie plus fine.

Le champ magnétique de fréquence ν qui induit la transition est orthogonal au vecteur vitesse des atomes. Il en résulte que l'effet Doppler est éliminé.

Un champ magnétique faible, de quelques dizaines de milligauss est appliqué dans la région d'interaction afin de définir la direction de quantification. Un blindage magnétique, constitué de plusieurs enveloppes de mumétal protège

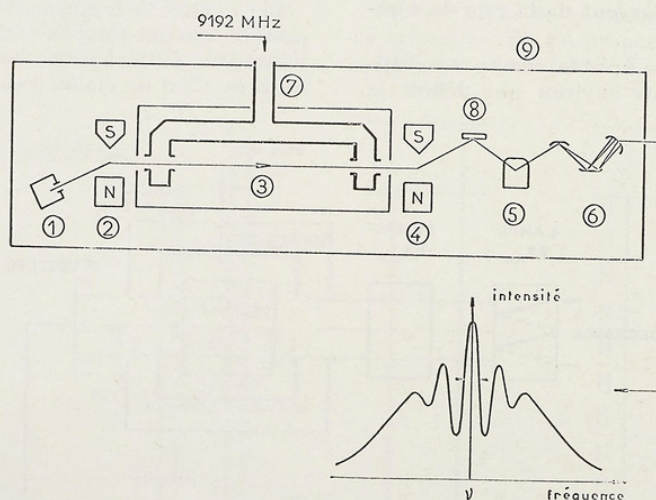


FIG. 7. — Schéma du résonateur à césium

1. Four à césium — 2. Aimant de sélection — 3. Région blindée magnétiquement où l'on produit un champ magnétique continu de 50 mG environ — 4. Aimant d'analyse — 5. Spectromètre de masse — 6. Multiplicateur de particules — 7. Cavité résonnante à deux bras — 8. Ioniseur à fil chaud — 9. Enveloppe étanche.

cette région des variations du champ magnétique terrestre.

Par émission stimulée, les atomes d'état $F=4$, $m_F=0$ passent à l'état $F=3$, $m_F=0$. Ceux-ci sont déviés dans un aimant à champ fort et inhomogène vers un détecteur, qui n'est ainsi atteint que par les atomes qui ont effectué la transition :

$$F=4, m_F=0 \longrightarrow F=3, m_F=0.$$

Le détecteur est constitué d'un fil de Niobium chauffé à 1.000°C qui ionise les atomes. Les ions formés traversent un spectromètre de masse. Un multiplicateur de particules (dont le fonctionne-

ment ressemble à celui d'un multiplicateur photoélectrique) accroît l'intensité de la réponse du résonateur.

La figure 7 montre la forme de la courbe de résonance obtenue.

II.2.2. — Horloge à césium

Ce résonateur ne constitue pas à lui seul une horloge atomique : un système électronique doit lui être associé. Son rôle est de fournir des signaux dont la fréquence est dans un rapport déterminé avec celle de la fréquence de résonance. Ces signaux sont, d'une part, une onde sinusoïdale à la fréquence de 5 MHz

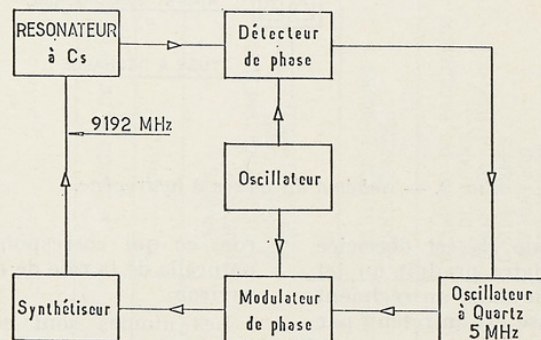


FIG. 8. — Principe de l'asservissement d'un oscillateur à quartz à la résonance du césium.

(par exemple), et, d'autre part, des impulsions de temps délivrées chaque seconde.

Un oscillateur à quartz alimente un synthétiseur* de fréquence qui produit un signal à $9192.631\dots$ MHz (fig. 8), un dispositif électronique, comprenant un oscillateur auxiliaire, un modulateur et un détecteur de phase fournit une tension d'erreur si la fréquence d'excitation ne correspond pas au sommet de la courbe de résonance. Cette tension contrôle la fréquence de l'oscillateur à

quartz de 5 MHz qui est ainsi asservi à la résonance atomique.

Des diviseurs de fréquence permettent d'obtenir les signaux à 1 MHz, 100 kHz, 1 Hz.

II.3. — HORLOGE A HYDROGÈNE ATOMIQUE.

II.3.1. — Maser à hydrogène

Le schéma en est représenté sur la figure 9. Dans la source d'hydrogène

* Un synthétiseur de fréquence effectue des opérations arithmétiques sur les fréquences (somme, différence, multiplication, division). Le rapport entre la fréquence d'entrée et la fréquence de sortie est une fraction rationnelle.

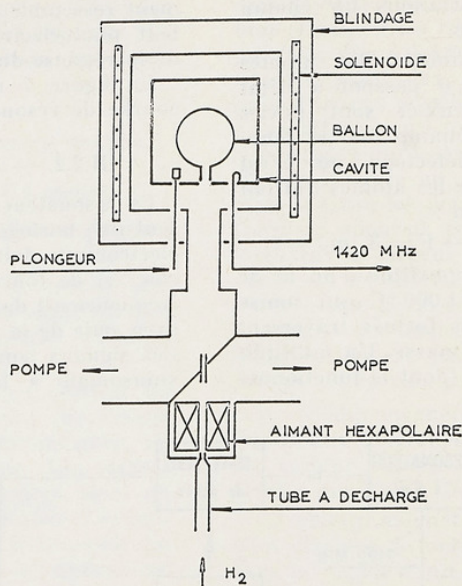


FIG. 9. — Schéma du maser à hydrogène.

atomique, la molécule H_2 est dissociée en atomes. Un capillaire produit un jet d'hydrogène atomique dans un récipient où un vide très poussé est entretenu par des pompes.

Les atomes sont triés dans un champ magnétique inhomogène et les atomes d'état $F=1$, $m_F=0$ et $F=1$, $m_F=1$ pénètrent dans le ballon. Seuls, les atomes d'état $F=1$, $m_F=0$ sont utiles à la transition d'horloge.

Ici, le champ magnétique inhomogène est produit par un aimant hexapolaire qui a la propriété de se comporter comme une lentille convergente pour les atomes d'état $F=1$, $m_F=0$, $F=1$, $m_F=1$ qui pénètrent dans la cavité résonnante. Elle est divergente pour les atomes d'état $F=1$, $m_F=-1$ et $F=0$, $m_F=0$ qui sont éliminés.

Dans la cavité résonnante, les atomes sont stockés dans un ballon dont la paroi est recouverte d'un enduit inerte (téflon) qui ne perturbe que très peu les atomes, lorsqu'ils frappent la paroi. Le temps d'interaction est ici de 0,3 s envi-

ron, ce qui correspond à une largeur naturelle de la raie de résonance de 1 Hz environ.

Les atomes sont confinés dans un ventre du champ électromagnétique de la cavité. Il en résulte que l'effet Doppler est éliminé.

La région d'interaction est blindée magnétiquement par 3 à 6 enveloppes de mumétal. Le champ magnétique produit par un solénoïde y est de 1 mG environ.

Lorsque l'énergie apportée à la cavité par le jet dépasse les pertes de diverses origines (pertes par effet Joule dans les parois de la cavité, relaxation des atomes) le maser oscille à la fréquence de 1420405... MHz.

Le maser à hydrogène produit son propre signal, c'est une horloge active.

II.3.2. Horloge à hydrogène

Le système électronique qui transpose la fréquence d'oscillation à 5 MHz est ici moins délicat à réaliser que pour le résonateur à césium : lorsque sa cavité

T A B L E A U II

COMPARAISON DES ETALONS DE FREQUENCE ET DE TEMPS

	HORLOGE A Rb 87	HORLOGE A Cs 133	HORLOGE H
ENCOMBREMENT	25 dm ³	45 dm ³	500 dm ³
AVANTAGES	COMPACTE LEGERE FAIBLE CONSOMMATION MEILLEURE STABILITE A LONG TERME QU'UN OSCILLATEUR A QUANTZ	COMPACTE PORTABLE EXCELLENTE STABILITE A LONG TERME ETALON PRIMAIRE	STABILITE INEGALEE (COURT ET LONG TERME) ETALON PRIMAIRE
DEFAUTS	CALIBRATION PERIODIQUE (ETALON SECONDAIRE)	STABILITE A COURT TERME LIMITEE	ENCOMBREMENT MASSE
EMPLOI	COMMUNICATIONS NAVIGATION RADAR DOPPLER RADIOASTRONOMIE	STANDARD DE FREQUENCE ET DE TEMPS TRANSPORT D'HORLOGE GARDE TEMPS NAVIGATION ASTRONOMIE	STANDARD DE FREQUENCE ET DE TEMPS GARDE TEMPS TRES PRECIS RADIOASTRONOMIE INTERFEROMETRE A BASE TEMPERATURE REGULEE POUR SUITE DE SATELLITES LOINTAINS TEST DE LA THEORIE DE LA RELATIVITE

est convenablement accordée, le maser oscille à la fréquence correspondant au sommet de la raie. Le pointage du sommet de la raie est effectué par le maser lui-même.

Schématiquement, la fréquence du maser est ramenée à 19,595 MHz (par exemple) dans un récepteur hétérodyne (fig. 10). L'oscillateur local est obtenu par multiplication de fréquence, à partir de l'oscillateur à quartz à 5 MHz. Celui-ci pilote également un synthétiseur qui fournit 19,595 MHz. Un dispositif de comparaison de phase permet d'asservir l'oscillateur à quartz dont la fréquence

d'oscillation est ainsi déterminée par celle du maser.

Les signaux à la disposition de l'utilisateur sont les mêmes que pour l'horloge à césium.

III. — PERFORMANCES DES HORLOGES ATOMIQUES

Les performances des horloges à césium et à hydrogène seront examinées plus en détail, à cause de leur importance comme étalon primaire de fréquence et de temps. Les avantages, les

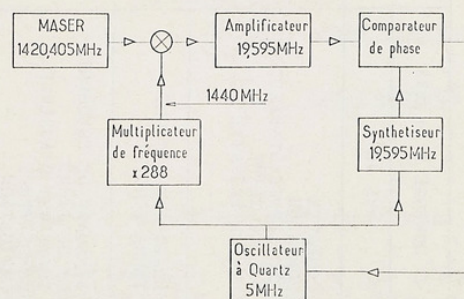


FIG. 10. — Principe de la transposition à 5 MHz de la fréquence d'oscillation d'un maser à hydrogène

défauts, et les utilisations principales des horloges sont indiquées dans le tableau II.

III.1. — STABILITÉ.

La stabilité de fréquence des horloges atomiques est, d'une façon générale, meilleure que celle des autres catégories d'oscillateurs. Cette propriété doit être reliée à la faible largeur des résonances utilisées, ou, ce qui revient au même à la durée relativement longue du temps d'interaction entre les atomes et le rayonnement.

La figure 11 représente le diagramme asymptotique de la stabilité de fréquence des horloges étudiées. La mesure est effectuée selon une méthode préconisée par le National Bureau of Standards.

Elle a la propriété d'éliminer les dérives lentes. (Elle fournit donc un résultat avantageux pour les horloges). Par contre, la méthode présente des avantages considérables : les conditions de mesure sont très bien définies d'une part et elle permet une analyse des sources des fluctuations de fréquence d'autre part.

On remarquera la supériorité du maser à hydrogène particulièrement pour les intervalles de temps compris entre une seconde et dix jours.

Les dérives lentes correspondent à des variations de l'ordre de 10^{-11} par mois pour l'horloge à rubidium et de quelques 10^{-13} par an pour l'horloge à césium. La stabilité de l'horloge à hydrogène sera probablement de l'ordre de 10^{-13} par an lorsque divers systèmes d'accord automatique de la cavité résonnante auront été mis au point.

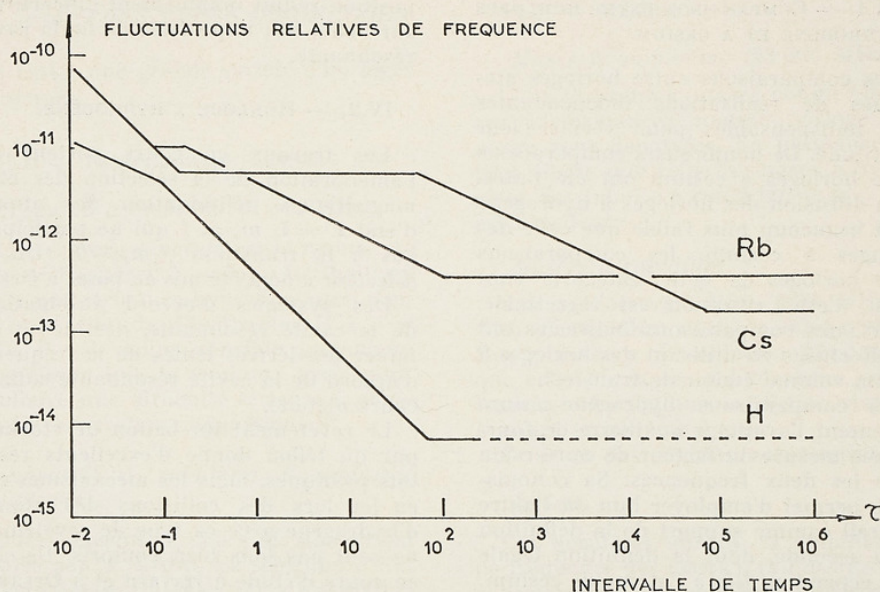


FIG. 11. — Fluctuation relative de fréquence des horloges atomiques (dérive éliminée).

III.2. — REPRODUCTIBILITÉ.

La reproductibilité caractérise la précision avec laquelle la fréquence d'un étalon peut être reproduite après un dérèglement (pour un appareil donné), ou d'un appareil à l'autre dans une série de construction. Lorsqu'il n'est pas nécessaire d'avoir recours à un autre type d'étalon pour effectuer des vérifications, il s'agit de reproductibilité intrinsèque. C'est le cas pour les étalons primaires, à césium ou à hydrogène.

La reproductibilité intrinsèque est de $2 \cdot 10^{-13}$ pour l'horloge à hydrogène et de 2×10^{-12} pour des horloges à césium (version commerciale).

III.3. — EXACTITUDE.

La fréquence définie par une horloge atomique est principalement déterminée par l'espèce atomique utilisée. Néanmoins, la fréquence mesurée dépend légèrement de l'environnement car, par principe, l'atome n'est pas libre. Il est, pour le moins, placé dans un champ

magnétique statique et couplé au champ électromagnétique d'une cavité résonnante.

La fréquence de transition de l'atome libre diffère de la fréquence mesurée d'une quantité qui est la somme des termes correctifs correspondant aux différentes causes de décalage de fréquence. Ces termes correctifs sont, soit mesurés, soit calculés.

L'exactitude est numériquement égale à l'écart-type de l'incertitude relative sur la somme de ces termes correctifs.

L'exactitude de l'horloge à césium est limitée principalement, par la symétrie des deux bras de la cavité résonnante. Elle est de 10^{-12} pour l'étalon NBS III du National Bureau of Standards Boulder (1966) et de 5×10^{-13} pour l'étalon de la Physikalisch Technische Bundesanstalt-Braunschweig (1969).

Elle est de 5×10^{-13} pour l'horloge à hydrogène construite par Varian-Hewlett-Packard (1966). Elle est limitée par l'effet des collisions des atomes d'hydrogène sur la paroi du ballon.

III.4. — COMPARAISON ENTRE HORLOGES A HYDROGÈNE ET A CÉSIUM.

Des comparaisons entre horloges atomiques de réalisations indépendantes sont indispensables pour vérifier leur exactitude. De nombreuses comparaisons entre horloges à césium ont été faites.

La diffusion des horloges à hydrogène étant beaucoup plus faible que celle des horloges à césium, les comparaisons entre horloges de cette catégorie sont rares. Cette situation est regrettable. Seules, des comparaisons indirectes ont été effectuées en utilisant des horloges à césium comme étalon de transfert.

Ces comparaisons hydrogène-césium présentent l'avantage auxiliaire de fournir une mesure du facteur de conversion entre les deux fréquences. Sa connaissance permet d'employer l'un ou l'autre appareil comme support de la définition de la seconde, dont la définition légale reste cependant liée à l'atome de césium.

Selon les mesures les plus précises, effectuées en 1967, 1968, 1969 par L. N. Bodily (H. P.), H. Peters (NASA), C. Menoud (L.S.R.H.), citées lors du récent Colloque International de Chronométrie de Paris (Septembre 1969), la fréquence de transition de structure hyperfine de l'atome d'hydrogène est :

$$1\,420\,405\,751,777 \pm 0,003 \text{ Hz}$$

c'est la grandeur physique dont la mesure est la plus précise : l'incertitude (écart-type) est de $\pm 2 \times 10^{-12}$ en valeur relative.

IV. — AMÉLIORATIONS EN COURS D'ÉTUDE

IV.1. — HORLOGE A CÉSIUM.

Une meilleure stabilité de fréquence est recherchée en accroissant l'intensité du jet (emploi d'aimants hexapolaires) et en cherchant le meilleur compromis entre la largeur de raie et le rapport signal/bruit.

Une meilleure exactitude est obtenue par l'emploi d'un appareil symétrique comprenant une source de césium et un détecteur à chaque extrémité. Cette dis-

position réduit notablement l'incertitude sur l'effet des imperfections de la cavité résonnante.

IV.2. — HORLOGE A HYDROGÈNE.

Les travaux en cours portent sur l'amélioration de la sélection des états magnétiques (élimination des atomes d'état $F=1$, $m_F=1$ qui ne participent pas à la transition $\Delta m_F=0$). Un tel sélecteur a déjà été mis au point à Orsay.

Des systèmes d'accord automatique de la cavité résonnante, destinés à éliminer les dérives lentes de la fréquence d'accord de la cavité résonnante sont en cours d'étude.

Le revêtement du ballon de stockage par du téflon donne d'excellents résultats pratiques, mais les mécanismes mis en jeu lors des collisions des atomes d'hydrogène avec ce type de revêtement ne sont pas tous bien compris. Ils sont en cours d'étude à Havard et à Orsay.

Le maser de Ramsey équipé d'un énorme ballon d'un volume 1.000 fois plus grand que les ballons habituellement utilisés a donné les résultats espérés : le décalage de fréquence dû aux collisions avec les parois du ballon ont été réduites d'un facteur 10. Signalons enfin que le maser à hydrogène se prête à de nombreuses et intéressantes expériences de Physique Atomique.

V. — EMPLOI DES HORLOGES ATOMIQUES

Les principaux domaines d'emploi sont indiqués dans le *tableau II*.

Les horloges à rubidium et à césium sont largement diffusées.

A cause de son encombrement, le maser à hydrogène existe en un plus petit nombre d'exemplaires. Il est surtout utilisé comme étalon primaire de Laboratoire, dans des applications spatiales (poursuite de véhicules spatiaux très lointains) et dans des expériences scientifiques : Interférométrie à très longue base et donc à très haute résolution angulaire, Tests de la théorie de la Relativité.

VI. — AUTRES TYPES D'HORLOGES

Il existe une grande variété d'horloges atomiques.

VI.1. — RÉSONATEURS PASSIFS.

— Appareil à thallium (21.311 MHz).

Sa structure générale est la même que celle de l'appareil à césium. Le thallium 205 a une structure hyperfine aussi simple que celle de l'hydrogène ($I = J = 1/2$). Il est moins sensible au champ magnétique que le césium, avec pour corollaire une difficulté sérieuse à effectuer la séparation magnétique.

— Appareil à rubidium à pompage optique.

Cette conception, due à M. Kastler est étudiée par M. Arditi. La sélection d'état et l'analyse du faisceau après interaction avec le rayonnement sont effectuées par pompage optique, et non par des aimants. Une amélioration de la stabilité à court terme et de l'exactitude des résonateurs passifs sont espérées grâce à cette technique.

VI.2. — MASERS.

— Maser à ammoniac (23 000 MHz).

C'est le premier maser connu (1953), ses performances comme horloge primaire sont dépassées. Sa puissance est plus élevée que celle du maser à hydrogène. Sa stabilité à court terme ($\tau < 1$ s.) est excellente.

— Masers à rubidium.

Des oscillateurs à ^{87}Rb (6835 MHz) et ^{85}Rb (3.036 MHz) sont en cours d'étude. Une puissance d'oscillation plus élevée que celle du maser à hydrogène est attendue, ainsi qu'une meilleure stabilité à court terme ($\tau < 1$ s.).

Ce sont des étalons secondaires.

— Lasers.

Ces dernières années, la stabilisation de fréquence des lasers a fait des progrès considérables. Un laser Hélium-Néon stabilisé par absorption saturée sur une cellule de méthane présente une reproductibilité de 10^{-11} environ et une stabilité de fréquence de 10^{-13} sur 10 secondes. Les lasers sont peut-être les horloges atomiques de l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

A survey of Atomic Frequency Standards
A.I. Mc COUBREY. — *Proceedings of the I.E.E.E.*, vol. 54, n° 2, February 1966, p. 116.

(tout ce volume 54 est consacré à des articles traitant de différents aspects de la chronométrie de haute précision).

Annual Symposium on Frequency Control,
Atlantic City U.S.A.

Colloque International de Chronométrie,
Paris, Septembre 1969.

Hewlett Packard Journal.

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

ACTIVITES DE LA SOCIÉTÉ DE RECHERCHE
POUR L'ÉDUCATION ADULTES

Prix et médailles
décernés par la Société d'Encouragement
pour l'année 1969

I. - Distinctions exceptionnelles

La Grande Médaille Annuelle, attribuée au titre des Arts Chimiques, est décernée à M. Raymond PAUL, pour l'ensemble de sa carrière, sur rapport, de M. Tré-fouël, Membre de l'Institut, Président de la Société d'Encouragement.

Le Grand Prix Lamy, décerné à la SOCIÉTÉ UGINE KUHLMANN sur rapport de M. Tré-fouël, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques, sera remis en séance spéciale.

La Médaille Louis Pineau est décernée à M. Gérard GRAU, pour ses travaux de géophysique pétrolière, sur rapport de M. Laffitte, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

La Grande Médaille des Activités d'Enseignement est décernée à M. Jean GIVAUDON, sur rapport de M. Chaudron, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

La Médaille Oppenheim est attribuée à M. Paul RAPIN, pour ses recherches et son enseignement dans les domaines de la métallurgie, de l'électricité, de la mécanique automobile, de l'étude des contraintes et des vibrations, sur rapport de M. Picard, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

La Médaille de la Conférence Bardy est attribuée à M. Pierre LEHR, pour son exposé sur « Les Propriétés et les Applications des Métaux du Groupe IV », sur rapport de M. Chaudron, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

La Médaille de la Conférence Carrion est attribuée à M. Georges BREBION, pour son exposé sur « Le Traitement des Eaux résiduaires industrielles par Voie Biologique », sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille Dumas exceptionnelle est attribuée à M. André PACOUD, pour l'ensemble de sa carrière, sur rapport de M. Laffitte, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille Dumas est attribuée à M. Germain DEBACKER, pour l'ensemble de sa carrière, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

II. - Médailles d'Or

Une Médaille d'Or est attribuée à M. René BEDHOME, pour ses réalisations d'unités de production combinée d'ammoniac et d'eau lourde, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille d'Or est attribuée à la SOCIÉTÉ DES PAPETERIES DE NANTERRE, pour ses remarquables réalisations, particulièrement, dans le domaine du papier filtre, sur rapport de M. Brun, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

Une Médaille d'Or est attribuée à M. Pierre JONARD, pour ses études approfondies dans le domaine de la biologie du blé, sur rapport de MM. Buré et Desaynard, au nom du Comité de l'Agriculture.

Une Médaille d'Or est attribuée à M^{me} Claude ROCCHICCIOLI-DELTCHIEFF pour ses travaux de spectrophotométrie d'absorption infrarouge, sur rapport de M. Chaudron, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

III. - Médailles et prix spéciaux

Le Prix Osmond est attribué à M. Joseph ROCHE, pour ses travaux de métallographie, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

La Médaille Menier est attribuée à M. Pierre NAVELLIER pour ses travaux de bromatologie, sur rapport de M. Chovin, au nom du Comité des Arts Chimiques.

La Médaille Legrand est attribuée à M. Arthur LAMENDIN pour ses travaux dans le domaine de la détergence, sur le rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

- La Médaille de Milly* est attribuée à M. Maurice LOURY, pour ses travaux sur les matières grasses, sur rapport de M. Chovin au nom du Comité des Arts Chimiques.
- Le Prix de la Classe 51* est attribuée à M. Jean ANDRIOLY, pour les perfectionnements qui lui sont dus dans le matériel d'exploitation de l'Industrie Chimique, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.
- Le Prix de la Classe 65* est attribué à M. Marcel DAVIGNON, pour sa participation efficace aux travaux de recherches métallurgiques d'Ugine, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.
- La Médaille Farcot* est attribuée à M. Henri CALLAMAND, pour ses Mémoires sur les essais accoustiques qui ont contribué au choix des cloisons du paquebot France, sur le comportement des stabilisateurs à ailerons par mer houleuse et sur le bruit dans les compartiments des machines, sur rapport de M. de Leiris, au nom du Comité des Arts Mécaniques.
- La Médaille Massion* est attribuée à M. René POINCENOT, pour les perfectionnements et innovations techniques apportées sous son impulsion à la fabrication des machines-outils, sur rapport de M. Naslin, au nom du Comité des Arts Mécaniques.
- La Médaille Giffard* est attribuée à M. Pierre PACAULT, pour l'ensemble de sa carrière, vouée au perfectionnement et à la construction des grands générateurs de vapeur, sur rapport de M. Chaffiotte, au nom du Comité des Arts Mécaniques.
- Le Prix Letort* est attribué à M. Victor POMPER, pour ses travaux sur la commande hydraulique des machines-outils, sur rapport de M. Naslin, au nom du Comité des Arts Mécaniques.
- Le Prix Parmentier* est attribué à M. Germain MOCQUOT, pour ses travaux en bactériologie et biochimie du lait et des produits laitiers, sur rapport de M. le Vétérinaire Général Guillot, au nom du Comité d'Agriculture.
- La Médaille Jollivet* est attribuée à M. Paul BECKER, pour son rôle éminent dans la formation des Ingénieurs du Génie Rural, sur rapport de M. Baratte, au nom du Comité d'Agriculture.
- Le Prix Galitzine* est attribué à la COMPAGNIE EUROPÉENNE DE RÉGULATION, pour ses diverses réalisations, et notamment la création récente et la construction industrielle d'un appareil constituant un progrès important dans le domaine du perfectionnement des fabrications optiques, sur rapport de M. Arnulf, au nom du Comité des Arts Physiques.
- La Médaille Gaumont* est attribuée à M. Robert AUVILLAIN, pour son activité bénévole au sein de la Société Française de Photographie, et en particulier pour son œuvre d'enseignement, sur rapport de M. Arnulf, au nom du Comité des Arts Physiques.
- La Médaille Bourdon* est attribuée à M. GAGLIARDI, pour ses réalisations de manipulateurs, sur rapport de M. Vodar, au nom du Comité des Arts Physiques.
- La Médaille Toussaint* est attribuée à M. DREUX, qui a accompli une tâche importante comme Président de la Société Commerciale d'Affrètements et de Combustibles S.C.A.C., sur rapport de M. Georges-Picot, au nom du Comité des Arts Economiques.

IV. - Médailles de Vermeil

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Louis TRUFFERT, pour ses travaux sur les conditions de travail et sur l'amélioration de l'Industrie Alimentaire, sur rapport de M. Chovin, au nom du Comité des Arts Chimiques.

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

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Jean MOTTE, pour ses travaux dans le domaine phytosanitaire, sur rapport de M. Desaymard, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Roger FAIVRE-DUPAIGRE, pour ses travaux consacrés à la lutte contre les mauvaises herbes et notamment sur son activité au sein du C.O.L.U.M.A., sur rapport de M. Lhoste, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Robert BRUNETAUD, pour les services nombreux que lui doivent les Industries Aéronautiques Françaises, sur rapport de M. Trillat, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Jacques CHOLET pour ses travaux comme Directeur à la Division Géophysique de l'Institut Français du Pétrole, sur rapport de M. Laffitte, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

V. - Médailles d'Argent

Sont attribuées :

Une Médaille d'Argent à M. Marcel GUÉANT, pour l'ensemble de sa carrière, et notamment son rôle dans l'état et la mise en pratique industrielle de catalyseurs, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille d'Argent à M^{me} Raymonde BRUNIN, pour ses travaux sur la chimie du café, sur rapport de M. Chovin, au nom du Comité des Arts Chimiques.

- Une Médaille d'Argent* à M. François JOYEUX, pour ses travaux dans le domaine des accumulateurs et des piles, sur rapport de M. Laffitte, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.
- Une Médaille d'Argent* à M. Marcel MORIN, pour sa contribution à la mise au point de prototypes de moteurs, turbo-compresseurs et soufflantes, sur rapport de M. Marchal, au nom du Comité des Arts Mécaniques.
- Une Médaille d'Argent* à M. Gustave SOIGNET, pour son activité comme Directeur de la Station d'Analyses des Sols d'Arras, sur rapport de M. Hénin, au nom du Comité d'Agriculture.
- Une Médaille d'Argent* à M. Jean JACQ, pour ses études sur la thermocinétique des métaux et alliages, sur rapport de M. Lucas, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille d'Argent* à M. LEPEINTRE, pour ses travaux de dosages et d'analyses et ses réalisations d'appareils, sur rapport de M. Trillat, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille d'Argent* à M. André MENDÈS da COSTA, pour ses réalisations dans le domaine des réfractaires électrofondus, sur rapport de M. Trillat, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille d'Argent* à M^{me} Paulette HERAULT, pour ses recherches de caractère fondamental, aussi bien que pour ses travaux d'application à des problèmes d'aérodynamique, sur rapport de M. Escande, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

VI. - Médailles de Bronze

Sont attribuées :

- Une Médaille de Bronze* à M^{me} Madeleine COUAILLIER, pour ses travaux au Service de Recherche scientifique du Laboratoire Central de la Préfecture de Police, sur rapport de M. Chovin, au nom du Comité des Arts Chimiques.
- Une Médaille de Bronze* à M. Michel GUÉRIN, pour ses réalisations d'appareils, sur rapport de M. Laffitte, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.
- Une Médaille de Bronze* à M. Albert GATOUX, pour ses créations et mises au point à l'usine Chocques de la Société Marles-Kuhlmann de produits dérivés, notamment des oxydes d'éthyle et de propylène, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.
- Une Médaille de Bronze* à M. Claude LOUIS, pour son activité dans l'œuvre de Conservation des Zones naturelles, sur rapport de M. Vayssière, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille de Bronze à M^{me} Hélène DUTERTRE, pour ses recherches en toxicologie, sur rapport de M. Le Moan, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille de Bronze à M. Alain BAQUET, assistant de la chaire de toxicologie de la Faculté de Pharmacie de Paris, sur rapport de M. Le Moan, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille de Bronze à M. René TRAN, pour ses réalisations d'optoélectronique et ses recherches récentes en matière de circuits de commutation, d'électronique logique et de circuits intégrés, sur rapport de M. Laffitte, Membre de l'Institut, au nom des Comités des Arts Physiques et Chimiques.

Le Président de la Société, Directeur de la publication : J. TRÉFOUËL, D.P. n° 1.080

I.T.Q.A.-CAHORS. — 00 957 — Dépôt légal : II-1971

