



This electronic version (PDF) was scanned by the International Telecommunication Union (ITU) Library & Archives Service from an original paper document in the ITU Library & Archives collections.

La présente version électronique (PDF) a été numérisée par le Service de la bibliothèque et des archives de l'Union internationale des télécommunications (UIT) à partir d'un document papier original des collections de ce service.

Esta versión electrónica (PDF) ha sido escaneada por el Servicio de Biblioteca y Archivos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) a partir de un documento impreso original de las colecciones del Servicio de Biblioteca y Archivos de la UIT.

(ITU) للاتصالات الدولي الاتحاد في والمحفوظات المكتبة قسم أجراه الضوئي بالمسح تصوير نتاج (PDF) الإلكترونية النسخة هذه والمحفوظات المكتبة قسم في المتوفرة الوثائق ضمن أصلية ورقية وثيقة من نقلًا.

此电子版（PDF版本）由国际电信联盟（ITU）图书馆和档案室利用存于该处的纸质文件扫描提供。

Настоящий электронный вариант (PDF) был подготовлен в библиотечно-архивной службе Международного союза электросвязи путем сканирования исходного документа в бумажной форме из библиотечно-архивной службы МСЭ.



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

CCIR

COMITÉ CONSULTATIF
INTERNATIONAL
DES RADIOCOMMUNICATIONS

RECOMMANDATIONS ET RAPPORTS DU CCIR, 1986

(AINSI QUE QUESTIONS, PROGRAMMES D'ÉTUDES,
RÉSOLUTIONS, VOEUX ET DÉCISIONS)

XVI^e ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE
DUBROVNIK, 1986

VOLUME VII

FRÉQUENCES ÉTALON ET SIGNAUX HORAIRES



Genève, 1986

CCIR

1. Le Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR) est l'organe permanent de l'Union internationale des télécommunications qui est chargé «... d'effectuer des études et d'émettre des recommandations sur les questions techniques et d'exploitation se rapportant spécifiquement aux radiocommunications, sans limitation quant à la gamme de fréquences...» (Convention internationale des télécommunications, Nairobi, 1982, Première Partie, Chapitre I, Article 11, numéro 83).

2. Le CCIR doit notamment:

- a) fournir les bases techniques à l'usage des conférences administratives des radiocommunications et des services de radiocommunication pour assurer l'utilisation efficace du spectre des fréquences radioélectriques et de l'orbite des satellites géostationnaires, sans négliger les besoins des divers services de radiocommunication;
- b) recommander pour les systèmes de radiocommunication des normes de fonctionnement ainsi que des mesures techniques qui assurent l'efficacité et la compatibilité de leur interfonctionnement dans les télécommunications internationales;
- c) recueillir, échanger, analyser, publier et diffuser des renseignements techniques résultant d'études du CCIR ou tous autres renseignements disponibles pour le développement, la planification et l'exploitation de systèmes de radiocommunication, y compris les mesures spéciales qui pourraient être nécessaires pour faciliter l'exploitation de ces renseignements dans les pays en développement.



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

CCIR

COMITÉ CONSULTATIF
INTERNATIONAL
DES RADIOCOMMUNICATIONS

RECOMMANDATIONS ET RAPPORTS DU CCIR, 1986

(AINSI QUE QUESTIONS, PROGRAMMES D'ÉTUDES,
RÉSOLUTIONS, VOEUX ET DÉCISIONS)

XVI^e ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE
DUBROVNIK, 1986

VOLUME VII

FRÉQUENCES ÉTALON ET SIGNAUX HORAIRES



Genève, 1986

ISBN 92-61-02762-8

**PLAN DES VOLUMES I A XIV
DE LA XVI^e ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU CCIR**

(Dubrovnik, 1986)

VOLUME I	Utilisation du spectre et contrôle des émissions.
VOLUME II	Recherche spatiale et radioastronomie.
VOLUME III	Service fixe fonctionnant sur des fréquences inférieures à 30 MHz environ.
VOLUME IV-1	Service fixe par satellite.
VOLUMES IV/IX-2	Partage des fréquences et coordination entre le service fixe par satellite et les faisceaux hertziens.
VOLUME V	Propagation dans les milieux non ionisés.
VOLUME VI	Propagation dans les milieux ionisés.
VOLUME VII	Fréquences étalon et signaux horaires.
VOLUME VIII-1	Service mobile terrestre. Service d'amateur. Service d'amateur par satellite.
VOLUME VIII-2	Service mobile maritime.
VOLUME VIII-3	Services mobiles par satellite (aéronautique, terrestre, maritime, mobile et radiodétermination). Service mobile aéronautique.
VOLUME IX-1	Service fixe utilisant les faisceaux hertziens.
VOLUME X-1	Service de radiodiffusion (sonore).
VOLUMES X/XI-2	Service de radiodiffusion par satellite (radiodiffusion sonore et télévision).
VOLUMES X/XI-3	Enregistrement sonore et télévisuel.
VOLUME XI-1	Service de radiodiffusion (télévision).
VOLUME XII	Transmission de signaux de radiodiffusion sonore et de télévision sur une grande distance (CMTT).
VOLUME XIII	Vocabulaire (CMV).
VOLUME XIV-1	Renseignements relatifs à la XVI ^e Assemblée plénière: Procès-verbaux des séances plénières. Textes administratifs. Structure du CCIR. Listes des textes émis par le CCIR.
VOLUME XIV-2	Index alphabétique des termes techniques contenus dans les Volumes I à XIII.

Sauf indication contraire, les références aux Recommandations, Rapports, Résolutions, Vœux, Décisions, Questions et Programmes d'études à l'intérieur des textes du CCIR sont celles de l'édition 1986, et seul le numéro principal est mentionné.

RÉPARTITION DES TEXTES DE LA XVI^e ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU CCIR PARMI LES VOLUMES I À XIV

Les Volumes I à XIV, XVI^e Assemblée plénière, contiennent tous les textes du CCIR actuellement en vigueur. Ils se substituent à ceux de l'édition de la XV^e Assemblée plénière, Genève, 1982.

1. Recommandations, Rapports, Résolutions, Vœux et Décisions

1.1 Indications sur la numérotation de ces textes

Les Recommandations, Rapports, Résolutions et Vœux sont numérotés dans la série en vigueur depuis la X^e Assemblée plénière.

Selon les décisions de la XI^e Assemblée plénière, en cas de révision de l'un de ces textes, celui-ci conserve son numéro auquel on ajoute un trait d'union et un chiffre indiquant le nombre de révisions successives. Exemples: Recommandation 253 pour la première version de la Recommandation, Recommandation 253-1 pour sa première révision, Recommandation 253-2 pour sa deuxième révision, et ainsi de suite. Cependant, dans le corps même du texte des Rapports et Recommandations, seul le numéro principal sera mentionné (par exemple, Recommandation 253) étant entendu que l'on se réfère à la version la plus récente du texte, sauf mention contraire.

Les numéros de ces textes figurent dans les tableaux ci-dessous; le chiffre indiquant le nombre de révisions successives n'a pas été mentionné dans les tableaux. Pour plus de détails sur la numérotation, voir le Volume XIV-1.

1.2 Recommandations

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
48	X-1	367	II	478	VIII-1
80	X-1	368-370	V	479	II
106	III	371-373	VI	480	III
139	X-1	374-376	VII	481-484	IV-1
162	III	377, 378	I	485, 486	VII
182	I	380-393	IX-1	487-493	VIII-2
205	X-1	395-405	IX-1	494	VIII-1
215, 216	X-1	406	IV/IX-2	496	VIII-3
218, 219	VIII-2	407, 408	X/XI-3	497	IX-1
239	I	410-412	X-1	498	X-1
240	III	414, 415	X-1	500	XI-1
246	III	417	XI-1	501	X/XI-3
257	VIII-2	419	XI-1	502, 503	XII
265	X/XI-3	428	VIII-2	505	XII
266	XI-1	430, 431	XIII	508	I
268	IX-1	433	I	509, 510	II
270	IX-1	434, 435	VI	513-517	II
275, 276	IX-1	436	III	518-520	III
283	IX-1	439	VIII-2	521-524	IV-1
290	IX-1	441	VIII-3	525-530	V
302	IX-1	443	I	531-534	VI
305, 306	IX-1	444	IX-1	535-538	VII
310, 311	V	446	IV-1	539	VIII-1
313	VI	450	X-1	540-542	VIII-2
314	II	452, 453	V	546-550	VIII-3
326	I	454-456	III	552, 553	VIII-3
328, 329	I	457, 458	VII	555-557	IX-1
331, 332	I	460	VII	558	IV/IX-2
335, 336	III	461	XIII	559-562	X-1
337	I	463	IX-1	564	X/XI-3
338, 339	III	464-466	IV-1	565	XI-1
341	V	467, 468	X-1	566	X/XI-2
342-349	III	469	X/XI-3	567-572	XII
352-354	IV-1	470-472	XI-1	573, 574	XIII
355-359	IV/IX-2	473, 474	XII	575	I
362-364	II	475, 476	VIII-2	576-578	II

IV

1.2 *Recommandations (suite)*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
579-580	IV-1	607, 608	XIII	642	X-1 + XII
581	V	609-611	II	643-644	X-1
582, 583	VII	612, 613	III	645	X-1 + XII
584	VIII-1	614	IV-1	646-647	X-1
589	VIII-2	615	IV/IX-2	648, 649	X/XI-3
591	VIII-3	616-620	V	650-652	X/XI-2
592-596	IX-1	621	VI	653-656	XI-1
597-599	X-1	622-624	VIII-1	657	X/XI-3
600	X/XI-2	625-631	VIII-2	658-661	XII
601	XI-1	632-633	VIII-3	662-666	XIII
602	X/XI-3	634-637	IX		
603-606	XII	638-641	X-1		

1.3 *Rapports*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
19	III	319	VIII-1	491	XII
32	X-1	322	VI ⁽¹⁾	493	XII
109	III	324	I	496, 497	XII
111	III	327	III	499	VIII-1
122	XI-1	336	V	500-501	VIII-2
137	IX-1	338	V	509	VIII-3
176, 177	III	340	VI ⁽¹⁾	516	X-1
181	I	342	VI	518	VII
183	III	345	III	519-522	I
184	I	347	III	524-526	I
195	III	349	III	528	I
197	III	354-357	III	530	I
200	III	358	VIII-1	533, 534	I
203	III	363, 364	VII	535, 536	II
204, 205	IV-1	371, 372	I	536-541	II
208	IV-1	374-376	IX-1	542	VIII-1
209	IV/IX-2	378-380	IX-1	543	II
212	IV-1	382	IV/IX-2	546	II
214	IV-1	383-385	IV-1	548	II
215	X/XI-2	386-388	IV/IX-2	549-551	III
222	II	390, 391	IV-1	552-561	IV-1
224	II	393	IV/IX-2	562-565	V
226	II	395, 396	II	567	V
227-229	V	401	X-1	569	V
236	V	404, 405	XI-1	571	VI
238, 239	V	409	XI-1	574, 575	VI
249-251	VI	411, 412	XII	576-580	VII
252	VI ⁽¹⁾	420	I	584, 585	VIII-2
253-255	VI	430-432	VI	588	VIII-2
258-260	VI	434-437	III	607	IX-1
262, 263	VI	439	VII	610	IX-1
265, 266	VI	443-445	IX-1	612-615	IX-1
267	VII	448, 449	IV/IX-2	616, 617	X-1
270, 271	VII	451	IV-1	619	X-1
272, 273	I	453-455	IV-1	622	X/XI-3
275-277	I	456	II	624-626	XI-1
279	I	458	X-1	628, 629	XI-1
284, 285	IX-1	461	X-1	630	X/XI-3
287-289	IX-1	463-465	X-1	631-634	X/XI-2
292	X-1	468, 469	X/XI-3	635-637	XII
294	X/XI-3	472	X-1	639	XII
300	X-1	473	X/XI-2	642, 643	XII
302-304	X-1	476-478	XI-1	646-648	XII
311-313	XI-1	481-485	XI-1	651	I
314	XII	488	XII	653-657	I

⁽¹⁾ Publiés séparément.

1.3 *Rapports (suite)*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
659-668	I	795	X-1	943-947	X-1
670, 671	I	797-799	X-1	950	X/XI-3
672-685	II	800	X/XI-3	951-955	X/XI-2
687	II	801, 802	XI-1	956	XI-1
692-697	II	803	X/XI-3	958, 959	XI-1
699, 700	II	804, 805	XI-1	961, 962	XI-1
701-704	III	807-812	X/XI-2	963, 964	X/XI-3
706, 707	IV-1	814	X/XI-2	965-970	XII
710-713	IV-1	815-823	XII	972-979	I
714-724	V	826-842	I	980-988	II
725-729	VI	843-854	II	989-996	III
730-732	VII	857	III	997-1004	IV-1
735, 736	VII	859-865	III	1005-1006	IV/IX-2
738	VII	867-875	IV-1	1007-1010	V
739-742	VIII-1	876, 877	IV/IX-2	1011-1015	VI
743, 744	VIII-2	879-880	V	1016, 1017	VII
747-749	VIII-2	882-885	V	1018-1025	VIII
751	VIII-3	886-895	VI	1026-1044	VIII-2
760-766	VIII-3	896-898	VII	1045-1051	VIII-3
768	VIII-3	899-906	VIII-1	1052-1057	IX-1
770-773	VIII-3	908-915	VIII-2	1058-1072	X-1
774, 775	VIII-2	917-923	VIII-3	1073-1076	X/XI-2
778	VIII-1	925-929	VIII-3	1077-1089	XI-1
779-789	IX-1	930-934	IX-1	1090-1096	XII
790-793	IV/IX-2	936-942	IX-1		

1.3.1 *Note au sujet des Rapports*

La mention individuelle «adopté à l'unanimité» a été supprimée pour chaque Rapport. Les rapports contenus dans ce Volume sont adoptés à l'unanimité sauf dans les cas où des réserves faisant l'objet d'une note de bas de page sont émises.

1.4 *Résolutions*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
4	VI	61	XIV-1	76	X-1
14	VII	62	I	78	XIII
15	I	63	VI	79-83	XIV-1
20	VIII-1	64	X-1	86, 87	XIV-1
23	XIII	66	XIII	88	I
24	XIV-1	71	I	89	XIII
26, 27	XIV-1	72, 73	V	90-95	XIV-1
33	XIV-1	74	VI	96	XI-1
39	XIV-1				

1.5 *Vœux*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2	I	43	VIII-2	70-72	VII
11	I	45, 46	VI	73	VIII-1
14	IX-1	49	VIII-1	74	X-1
15	X-1	50	IX-1	75	XI-1
16	X/XI-3	51	X-1	77	XIV-1
22, 23	VI	56	IV-1	79-81	XIV-1
26-28	VII	59	X-1	82	VI
32	I	63	XIV-1	83	XI-1
35	I	64	I	84	XIV-1
38	XI-1	65	XIV-1	85	VI
40	XI-1	66	III	86	XIII
42	VIII-1	67-69	VI		

1.6 Décisions

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2	IV-1	45	III	61	II
3-5	V	50	V	63	III
6	VI	51	X/XI-2	64	IV-1
9-11	VI	52	X-1	65	VII
18	XII	53, 54	I	66	XI-1
19	XIII	56	I	67, 68	XII
27	I	57	VI	69	VIII-1
32	VIII-3	58	XI-1	70	IV-1
42	XI-1	59	X/XI-3	71	VIII-3 + X-1
43	X/XI-2	60	XI-1	72	X-1 + XI-1

1.6.1 Note au sujet des Décisions

Etant donné que les Décisions ont été adoptées par les Commissions d'études, on a utilisé l'expression: «La Commission d'études ... considérant», et l'expression «à l'unanimité» ne figure pas.

2. Questions et Programmes d'études

2.1 Indications sur la numérotation de ces textes

2.1.1 Questions

Les Questions sont numérotées dans des séries différentes pour chaque Commission d'études; le cas échéant, le numéro d'ordre est suivi d'un trait d'union et d'un chiffre indiquant le nombre de révisions successives du texte. Le numéro d'une Question est suivi d'un *chiffre arabe indiquant la Commission d'études*. Exemples:

- Question 1/10 pour la première version de la Question;
- Question 1-1/10 pour sa première révision, Question 1-2/10 pour sa deuxième révision.

2.1.2 Programmes d'études

Les Programmes d'études sont numérotés de manière à indiquer de quelle Question ils dérivent le cas échéant, le numéro étant complété par une lettre majuscule qui permet de distinguer plusieurs Programmes d'études qui dérivent d'une même Question. La partie du numéro du Programme d'études qui sert à indiquer le numéro de la Question dont il dérive ne mentionne pas l'indice éventuel de révision de la Question, mais se réfère au texte en vigueur de cette Question tel qu'il figure dans le Volume. Exemples:

- Programme d'études 1A/10, première version du premier Programme d'études qui dérive de la Question 1/10;
- Programme d'études 1C/10, première version du troisième Programme d'études qui dérive de la Question 1/10;
- Programme d'études 1A-1/10, première révision du premier Programme d'études qui dérive de la Question 1/10.

On remarquera qu'un Programme d'études peut être adopté sans qu'il dérive d'une Question; dans ce cas, il est numéroté d'une façon analogue à celle des autres Programmes d'études de la Commission d'études sauf que, si l'on se réfère à la liste des Questions correspondantes, on ne trouve pas de Question qui corresponde à ce numéro.

Comme pour les autres textes du CCIR, les références aux Questions et Programmes d'études à l'intérieur des textes ne font mention que du numéro principal.

2.2 Emplacement des Questions et Programmes d'études

Le plan de la page II désigne le Volume qui contient les textes de chaque Commission d'études, ce qui permet de savoir dans quel Volume se trouve une Question ou un Programme d'études donné.

VOLUME VII

FRÉQUENCES ÉTALON ET SIGNAUX HORAIRES

(Commission d'études 7)

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Plan des Volumes I à XIV de la XVI ^e Assemblée plénière du CCIR	II
Répartition des textes de la XVI ^e Assemblée plénière du CCIR parmi les Volumes I à XIV	III
Table des matières	VII
Index des textes supprimés	XI
Index des textes par ordre numérique	XIII
Index des textes publiés dans d'autres volumes, mais présentant aussi de l'intérêt pour les services de fréquences étalon et de signaux horaires	XV
Mandat de la Commission d'études 7 et Introduction par le Rapporteur principal de la Commission d'études 7	XVII
 <i>Section 7A — Glossaire</i>	
Rapport 730-1 Glossaire	1
 <i>Section 7B — Spécifications pour les services de fréquences étalon et de signaux horaires</i>	
Rec 374-3 Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires	9
Rec 375-2 Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans de nouvelles bandes de fréquences	9
Rec 376-1 Suppression des brouillages d'origine extérieure causés aux émissions du service de fréquences étalon dans les bandes attribuées à ce service	10
Rec 457-1 Utilisation de la date julienne modifiée par les services de fréquences étalon et de signaux horaires	11
Rec 458-1 Comparaisons internationales d'échelles de temps atomique	11
Rec 460-4 Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires	12
Rec 485-1 Utilisation d'échelles de temps dans les services de fréquences étalon et de signaux horaires	16
Rec 486-1 Référence à l'échelle de temps atomique international pour les générateurs et les émissions de fréquence commandés avec précision	16
Rec 535-1 Emploi du terme UTC	17
Rec 536 Notations à utiliser pour désigner les échelles de temps	17
 <i>Section 7C — Systèmes pour la dissémination et les comparaisons</i>	
Rapport 267-6 Fréquences étalon et signaux horaires	19
Rapport 270-3 Utilisation optimale du spectre des fréquences pour les signaux horaires de haute précision	45
Rapport 271-7 Stabilité et précision de la réception des fréquences étalon et des signaux horaires en ondes myriamétriques et kilométriques	47
Rapport 363-6 Méthodes appliquées pour le transfert et la diffusion des fréquences étalon et des signaux horaires	52
Rec 582 Diffusion et coordination de signaux de référence de temps et de fréquence par satellite	59

		Page
Rapport 518-4	Diffusion et coordination par satellite de l'information temps/fréquence	60
Rapport 576-3	Diffusion de fréquences étalon par stabilisation de la fréquence porteuse d'une station de radiodiffusion	84
Rapport 577-2	Diffusion de signaux horaires par superposition d'une modulation de phase à la modulation d'amplitude d'émissions de radiodiffusion sonore	84
Rec 583	Codes horaires	85
Rapport 578-2	Codes horaires	86
Rapport 731-1	Enquête faite parmi des usagers des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires	89
Rec 537	Réduction des brouillages mutuels entre émissions du service de fréquences étalon et de signaux horaires sur les fréquences qui leur sont attribuées dans les bandes 6 et 7	96
Rapport 732-2	Réduction proposée des brouillages mutuels entre émissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes 6 et 7	96
Rapport 735-1	Importance des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires faites dans la bande 5	101
Rapport 736-1	Partage des fréquences entre le service des signaux horaires et le service de radiolocalisation, le service fixe par satellite et les services fixe et mobile au voisinage de 14, 21, 26 et 31 GHz	102
Rapport 896-1	Documentation des modifications apportées aux signaux horaires	109
Rapport 897-1	Méthodes de transfert de précision de signaux horaires à courte distance	110
Rapport 1016	Méthodes utilisant les signaux de télévision pour le transfert et la diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon	113
Rapport 1017	Caractérisation des retards produits dans les antennes	117

Section 7D – Caractérisation des sources et de la formation des échelles de temps

Rec 538	Mesures de la stabilité de fréquence et de phase	119
Rapport 364-5	Comportement des générateurs de fréquences étalon	120
Rapport 439-4	Effets relativistes dans un système de temps-coordonnée terrestre	134
Rapport 579-3	Algorithmes d'échelles de temps et problèmes d'établissement de moyennes associés	138
Rapport 580-2	Caractérisation du bruit de fréquence et de phase	142
Rapport 738-2	Les générateurs de fréquences étalon dans les gammes submillimétrique, infrarouge et visible du spectre électromagnétique	150
Rapport 898-1	Fonctionnement et fiabilité des horloges de référence	159

Questions et Programmes d'études, Résolutions, Vœux et Décisions

Question 1/7	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires	169
Programme d'études 1A-1/7	Amélioration d'efficacité du service de fréquences étalon et de signaux horaires	169
Question 2/7	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans de nouvelles bandes de fréquences	170
Programme d'études 2A-2/7	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires par satellite	170
Programme d'études 2B/7	Modes d'exploitation pour l'émission de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes d'ondes myriamétriques et kilométriques	171
Question 3-1/7	Stabilité de la réception des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires	171
Programme d'études 3A-1/7	Utilisation optimale du spectre des fréquences pour les signaux horaires de haute précision	172
Programme d'études 3C-3/7	Comparaison de diverses méthodes de transfert et de diffusion de fréquences étalon et de signaux horaires	172
Programme d'études 3D-2/7	Méthodes de comparaisons de phases fiables en ondes myriamétriques	173

Question 4-1/7	Diffusion de fréquences étalon et de signaux horaires	173
Programme d'études 4A/7	Diffusion de fréquences étalon par stabilisation de la fréquence porteuse d'une station de radiodiffusion	173
Programme d'études 4B/7	Diffusion de signaux horaires par application d'une modulation de phase additionnelle aux émetteurs de radiodiffusion sonore à modulation d'amplitude	174
Question 5-1/7	Besoins en matière de transfert de temps de haute précision	175
Programme d'études 5A/7	Besoins en indications de temps de grande précision	175
Programme d'études 5B-1/7	Garde-temps et synchronisation aux niveaux inférieurs à la nanoseconde	175
Question 7/7	Codes horaires	176
Programme d'études 7A/7	Caractéristiques des codes horaires	176
Question 8/7	Fiabilité des étalons de temps et de fréquence	177
Question 9/7	Retards de signaux introduits par les antennes et autres circuits en ce qui concerne le transfert de signaux horaires de haute précision	177
Programme d'études 9A/7	Caractérisation des retards de signaux introduits par les antennes	177
Question 10/7	Qualité des étalons de fréquence et de temps	178
Programme d'études 10A/7	Qualité et caractérisation des étalons de fréquence et de temps	178
Programme d'études 10B/7	Algorithmes d'échelles de temps et problèmes statistiques	179
Résolution 14-4	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires	179
Vœu 26-2	Etudes et expériences relatives aux émissions de signaux horaires	180
Vœu 27	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans de nouvelles bandes de fréquences	180
Vœu 28	Programmes spéciaux de contrôle des émissions de l'IFRB en vue de dégager les bandes de fréquences attribuées exclusivement au service de fréquences étalon	180
Vœu 70	Le système UTC et le rôle du Bureau international de l'heure	181
Vœu 71-1	Documentation des émissions de signaux horaires	181
Vœu 72	Diffusion de signaux horaires par des satellites météorologiques	182
Décision 65	Manuel sur l'utilisation de la diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon par satellite	183
Index alphabétique des termes (mots clés) du Volume VII		185

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

**INDEX DES TEXTES SUPPRIMÉS A LA FIN DE LA PÉRIODE
D'ÉTUDES 1982-1986**

(Pour permettre de repérer plus facilement les divers textes, le numéro de page du Volume VII de la XV^e Assemblée plénière (Genève, 1982) est indiqué.)

Texte	Titre	N° de la page Vol. VII Genève, 1982
Rapport 737-1*	Fiabilité des étalons de temps et de fréquence	129
Programme d'études 1B-1/7	Emissions à bande latérale unique dans les services de fréquences étalon et de signaux horaires	148
Programme d'études 1D-1/7**	Poids statistiques d'horloges qui contribuent à une échelle de temps — Problèmes d'établissement de moyennes	148
Programme d'études 3B/7	Instabilité des générateurs de fréquences étalon	151
Décision 28	Diffusion mondiale de signaux horaires au moyen de satellites	160
Décision 29-1	Qualité de fonctionnement et fiabilité des générateurs de fréquences étalon et des horloges de référence	161

* Le Rapport 737 a été incorporé dans le Rapport 898.

** Ce Programme d'études est devenu le nouveau Programme d'études 10B/7.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INDEX DES TEXTES PAR ORDRE NUMÉRIQUE

RECOMMANDATIONS	Page
Recommandation 374-3	9
Recommandation 375-2	9
Recommandation 376-1	10
Recommandation 457-1	11
Recommandation 458-1	11
Recommandation 460-4	12
Recommandation 485-1	16
Recommandation 486-1	16
Recommandation 535-1	17
Recommandation 536	17
Recommandation 537	96
Recommandation 538	119
Recommandation 582	59
Recommandation 583	85
 RAPPORTS	
Rapport 267-6	19
Rapport 270-3	45
Rapport 271-7	47
Rapport 363-6	52
Rapport 364-5	120
Rapport 439-4	134
Rapport 518-4	60
Rapport 576-3	84
Rapport 577-2	84
Rapport 578-2	86
Rapport 579-3	138
Rapport 580-2	142
Rapport 730-1	1
Rapport 731-1	89
Rapport 732-2	96
Rapport 735-1	101
Rapport 736-1	102
Rapport 738-2	150
Rapport 896-1	109
Rapport 897-1	110
Rapport 898-1	159
Rapport 1016	113
Rapport 1017	117

Note. — Les Questions, Programmes d'études, Résolutions, Vœux et Décisions figurant déjà dans l'ordre numérique à la table des matières, ne sont pas repris dans le présent index.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

**INDEX DES TEXTES PUBLIÉS DANS D'AUTRES VOLUMES,
MAIS PRÉSENTANT AUSSI DE L'INTÉRÊT POUR LES SERVICES
DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES**

Texte	Titre	Volume
Recommandation 328	Spectres et largeurs de bande des émissions	I
Recommandation 329	Rayonnements non essentiels	I
Recommandation 331	Bruit de fond et sensibilité des récepteurs	I
Recommandation 332	Sélectivité des récepteurs	I
Rapport 181	Tolérances de fréquence des émetteurs	I
Rapport 657	Modèle statistique pour la détermination des critères de partage des bandes de fréquences	I
Rapport 670	Niveau minimal de bruit externe: spécification mondiale (0,1 Hz à 100 GHz) . .	I
Rapport 829	Calcul de la probabilité de brouillage	I
Rapport 841	Application des techniques informatiques à la gestion du spectre radioélectrique	I
Question 18/1	Conception des systèmes en vue d'une efficacité et d'une utilisation optimales du spectre	I
Question 44/1	Modèles de système pour l'évaluation de la compatibilité dans l'utilisation du spectre	I
Question 45/1	Critères techniques de partage des fréquences	I
Décision 56	Transfert de technologie	I
Recommandation 364	Fréquences et largeurs de bande préférées pour les satellites habités ou non du service de recherche spatiale, proches de la Terre	II
Recommandation 517	Protection du service de radioastronomie contre les émetteurs fonctionnant dans les bandes adjacentes	II
Rapport 396	Télémessure de maintenance, poursuite et télécommande pour les satellites expérimentaux et opérationnels. Possibilités de partage des fréquences entre les services de Terre et les liaisons de télémessure et de télécommande des satellites .	II
Rapport 546	Technologie des systèmes spatiaux utilisés dans le service de recherche spatiale: techniques de commande d'orientation	II
Programme d'études 15C/2	Protection du matériel de télécommunications contre les rayonnements de fréquence radioélectrique de stations terriennes de recherche spatiale	II
Question 19/2	Rayonnements non essentiels produits ou reçus par les stations des services de radiocommunications spatiales	II
Question 25/4	Emissions non désirées rayonnées et reçues par les stations terriennes et les stations spatiales du service fixe par satellite	IV-1
Question 30/4	Etablissement de liaisons de connexion entre stations terriennes fixes et stations spatiales de divers services, dans des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite	IV-1
Recommandation 452	Données sur la propagation nécessaires à l'évaluation des brouillages entre stations situées à la surface de la Terre	V
Recommandation 581	Notion de «mois le plus défavorable»	V
Recommandation 618	Données sur la propagation nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunications Terre-espace	V
Recommandation 619	Données sur la propagation nécessaires à l'évaluation des brouillages entre des stations dans l'espace et des stations situées à la surface de la Terre	V
Recommandation 620	Données sur la propagation nécessaires pour le calcul des distances de coordination	V
Rapport 564	Données sur la propagation et méthodes de prévision nécessaires pour les systèmes de télécommunication Terre-espace	V
Rapport 569	Évaluation des facteurs de propagation liés aux problèmes de brouillage entre stations situées sur la surface de la Terre aux fréquences supérieures à 0,5 GHz	V

Texte	Titre	Volume
Rapport 719	Affaiblissement par les gaz de l'atmosphère	V
Rapport 720	Emissions radioélectriques produites par les sources naturelles à des fréquences supérieures à 50 MHz environ	V
Rapport 721	Affaiblissement dû aux hydrométéores, en particulier aux précipitations, et autres particules atmosphériques	V
Rapport 722	Transpolarisation due à l'atmosphère	V
Rapport 723	Statistiques relatives au mois le plus défavorable	V
Rapport 724	Données sur la propagation nécessaires à l'évaluation de la distance de coordination dans la gamme de fréquences de 1 à 40 GHz	V
Rapport 885	Données sur la propagation nécessaires à l'évaluation des brouillages entre stations dans l'espace et stations situées à la surface de la Terre	V
Rapport 1007	Distributions statistiques dans la propagation des ondes radioélectriques	V
Rapport 1010	Données sur la propagation pour la coordination bidirectionnelle des stations terriennes	V
Recommandation 373	Définition des fréquences maximales de transmission	VI
Rapport 895	Propagation de l'onde ionosphérique et qualité de fonctionnement des circuits aux fréquences inférieures à 30 kHz environ	VI
Programme d'études 28D/6	Caractéristiques de propagation qui affectent le partage du spectre radioélectrique entre systèmes de Terre faisant intervenir la propagation ionosphérique	VI
Vœu 85	Mesures des caractéristiques du bruit radioélectrique atmosphérique	VI
Recommandation 589	Brouillage des services de radionavigation par d'autres services dans les bandes comprises entre 70 kHz et 130 kHz	VIII-2
Rapport 915	Brouillage entre les services de radionavigation et les services mobile maritime et fixe dans les bandes de fréquences comprises entre 70 kHz et 130 kHz	VIII-2
Programme d'études 2E/10-11	Rayonnement d'émissions non désirées par les stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite (radiodiffusion sonore et télévision)	X/XI-2
Rapport 1078	Radiodiffusion d'informations codées d'heure et de date	XI-1
Recommandation 431	Nomenclature des bandes de fréquences et de longueurs d'onde employées en télécommunication	XIII
Recommandation 573	Vocabulaire des radiocommunications	XIII
Recommandation 574	Emploi du décibel et du néper dans les télécommunications	XIII
Recommandation 607	Termes et symboles relatifs aux quantités d'information en télécommunication	XIII
Recommandation 662	Termes et définitions	XIII
Recommandation 666	Abréviations et sigles utilisés en télécommunication	XIII
Résolution 66	Termes et définitions	XIII
Résolution 78	Présentation des textes relatifs à la terminologie	XIII
Résolution 89	Directives pour le choix des termes et l'élaboration des définitions	XIII
Décision 19	Termes et définitions	XIII

FRÉQUENCES ÉTALON ET SIGNAUX HORAIRES

COMMISSION D'ÉTUDES 7

Mandat:

1. Coordonner les services de diffusion de fréquences étalon et de signaux horaires à l'échelon mondial.
2. Etudier les aspects techniques à l'émission et à la réception, y compris l'emploi de techniques spatiales dans ces services, et les moyens d'améliorer la précision des mesures.

1982-1986-1990 *Rapporteur principal:* J. McA. STEELE (Royaume-Uni)

Vice-Rapporteur principal: S. LESCHIUTTA (Italie)

INTRODUCTION PAR LE RAPPORTEUR PRINCIPAL DE LA COMMISSION D'ÉTUDES 7

1. Généralités

A sa réunion finale tenue à Genève en 1985, la Commission d'études a examiné l'ordre et la présentation de ses textes. Il a été décidé de les regrouper en trois grands chapitres qui feront ressortir les principales subdivisions de la documentation et fourniront les informations dans un ordre plus rationnel. Après le Rapport 730 qui est un glossaire de termes utilisés par la Commission d'études 7, les divers Rapports et Recommandations sont maintenant rassemblés sous les têtes de chapitres suivantes:

- spécification du service de fréquences étalon et de signaux horaires;
- méthodes disponibles pour la diffusion et la comparaison des signaux; et
- caractéristiques des sources de fréquences étalon et leur utilisation pour l'établissement des échelles de temps.

Les autres textes, y compris les Questions, Programmes d'études, Résolutions et Vœux figurent à la fin du Volume. Pour plus de commodité, on a repris dans cette introduction les grandes subdivisions adoptées pour la documentation de la Commission d'études.

2. Spécification du service des fréquences étalon et des signaux horaires

2.1 *Système de temps universel coordonné (UTC)*

Il est significatif que le système UTC n'ait dû faire l'objet d'aucune modification importante ces dernières années, par rapport à sa conception initiale exposée dans la Recommandation 460. Pendant la période qui a suivi l'introduction du système en 1972, la Terre s'est comportée avec une grande régularité et des secondes intercalaires ont été ajoutées tous les ans, le dernier jour du mois de décembre, pour compenser la différence entre la marche du temps astronomique, calculé à partir de la vitesse de rotation de la Terre et celle du temps atomique de référence. Mais, depuis 1979 environ, la Terre a un comportement beaucoup moins prévisible et la disposition de la Recommandation 460 qui autorise à introduire des secondes intercalaires le dernier jour du mois de juin a été appliquée pour la première fois en 1981, puis tous les ans jusqu'en 1985, à l'exception de 1984 où cela n'a pas été nécessaire, la vitesse de rotation de la Terre s'étant considérablement accélérée par rapport aux années précédentes.

Depuis sa mise en service, il y a quinze ans environ, le système UTC et ses secondes intercalaires a rencontré une grande faveur dans le monde entier, et il est maintenant parfaitement admis que tout système opérationnel de garde du temps doit comporter un mécanisme d'ajustement des secondes. Peut-être faut-il déplorer que, pour certaines émissions de navigation, on ne puisse tolérer la perte de cohérence qui résulterait de l'introduction d'une seconde intercalaire, en particulier quand les stations terriennes ou spatiales sont très éloignées les unes des autres. Le système Oméga et le Système mondial de positionnement (GPS) sont deux cas particuliers qui n'exigent pas l'introduction de secondes intercalaires mais où il est toujours possible de connaître la différence entre le temps universel coordonné et la trame de temps du système de navigation utilisé. Dans le cas du système Oméga, cette différence est donnée dans le Rapport 267 pour une période déterminée. Ce même Rapport précise clairement que, dans le cas du réseau Loran-C, l'introduction d'une seconde intercalaire n'entraîne pas de changement du temps mais se traduit néanmoins par une redéfinition du «temps de coïncidence» avec la seconde UTC; ce temps de coïncidence est indiqué dans des tables fournies par le US Naval Observatory.

Avant l'introduction du système UTC, on utilisait diverses méthodes d'ajustement des signaux horaires. Il est important que les détails de ces ajustements restent accessibles pour les besoins des archives. Il était prévu initialement de les insérer dans le Rapport 896 sur la documentation des modifications apportées aux signaux horaires, mais il a été convenu lors de la Réunion interimaire, conformément au Vœu 71, qu'il valait mieux les communiquer au Bureau international de l'heure (BIH) et aux Centres mondiaux d'exploitation des données A, B et C. Les Administrations des Etats-Unis d'Amérique, de la France, du Japon, de la République fédérale d'Allemagne et du Royaume-Uni ont déjà envoyé ces renseignements au Bureau international de l'heure.

2.2 *Bureau international de l'heure (BIH)*

Certaines fonctions du BIH liées à la surveillance de l'exploitation du système UTC ont déjà été mentionnées: le rôle central du Bureau en la matière est défini dans le Vœu 70 qui souligne que le BIH doit être épaulé dans ses activités liées à l'établissement et à la maintenance des échelles de temps atomique. Un tel appui restera nécessaire à l'avenir puisque les fonctions du BIH ont été séparées en deux parties: les questions relatives au temps atomique seront traitées au Bureau international des poids et mesures (BIPM) à Sèvres tandis que les études sur la rotation de la Terre se poursuivront à l'Observatoire de Paris. Il est proposé que le CCIR se fasse représenter dans un Groupe de travail chargé de surveiller le Temps atomique international (TAI) qui entrera en vigueur dès que toutes les unions scientifiques concernées auront accepté les nouveaux arrangements. C'est le Comité international des poids et mesures (CIPM) qui sera responsable du temps atomique international. Pour ce qui est du système UTC, il faudra attendre d'avoir d'autres données fournies par les observations sur la rotation de la Terre avant de décider de l'incidence des secondes intercalaires.

3. *Diffusion et comparaison de l'information temps et fréquence*

3.1 *Bandes attribuées*

Les caractéristiques actuelles des stations qui fonctionnent dans les bandes (de Terre) attribuées, c'est-à-dire sur les fréquences centrales de 20 kHz, 2,5, 5, 10, 15, 20 et 25 MHz, sont données dans le Tableau I du Rapport 267. Aucune administration n'utilise la fréquence la plus basse (20 kHz) ni, depuis 1977, la fréquence la plus élevée (25 MHz). Un certain nombre de modifications ont été apportées, ces dernières années, aux services disponibles et il faut noter que, malgré la mise au point d'autres méthodes de diffusion, les adjonctions au tableau ont été plus nombreuses que les suppressions. Depuis mai 1982, la station FFH (Paris) n'émet plus sur 2,5 MHz mais la station BPM (Pusheng) a ajouté à son programme une émission sur cette même fréquence uniquement pendant la journée. La station RCH (Tashkent) qui n'émettait que sur 2,5 MHz, émet maintenant aussi sur 5 et 10 MHz et en Extrême-Orient, la République de Corée a introduit une nouvelle station HLA (Taedok) qui émet sur 5 MHz, pendant un total de 7 heures, les jours ouvrables. Ces nouvelles émissions augmentent inévitablement le risque de brouillages mutuels (Recommandation 537) et compromettent l'efficacité des mesures proposées dans le Rapport 732. La situation s'est un peu améliorée depuis que la CAMR-79 a autorisé l'exploitation sur les fréquences de 4, 8 et 16 MHz pour la diffusion de signaux horaires et de fréquences étalon dans la Région 3; il est encourageant de constater que la fréquence de 8 MHz a été ajoutée aux fréquences de 2,5, 5, 10 et 15 MHz déjà utilisées par l'émetteur JJY.

3.2 *Bandes de fréquences additionnelles*

Dans la Recommandation 375, on encourage l'exploitation des stations existant dans les bandes 4, 5, 6, 8 et 9 pour diffuser des fréquences étalon et des signaux horaires. Les Tableaux II à V du Rapport 267 donnent les caractéristiques de ces stations qui comprennent les émetteurs pour la navigation, les télécommunications et la radiodiffusion (ces derniers sont traités plus spécialement dans le Rapport 576), ainsi qu'un certain nombre de stations «spécialisées» qui assurent seulement un service de signaux horaires et de fréquences étalon. Pour la plupart des sources de grande puissance en ondes myriamétriques, on a inséré une note d'avertissement en bas de page attirant l'attention sur l'utilisation généralisée de la modulation par déplacement minimal (MDM) qui provoque la perte de la cohérence de phase. On peut remédier à cet inconvénient au prix d'un traitement supplémentaire dans un récepteur approprié.

Le spectre des fréquences disponible pour la diffusion de signaux horaires et de fréquences étalon étant nécessairement limité, il convient, comme le souligne le Rapport 270, d'en rationaliser l'utilisation pour le transfert de signaux horaires de haute précision. Plusieurs stations ont maintenant recours à la modulation de phase pour améliorer la précision et la résistance aux brouillages. Comme il est décrit dans le Rapport 577, l'émetteur d'Allouis (162 kHz) applique une modulation de phase triangulaire, d'une amplitude de ± 1 rad dans l'intervalle de 0,1 s pour diffuser des signaux de référence de temps et un code horaire, la modulation de phase se superposant à la modulation d'amplitude normale des émissions de radiodiffusion sonore. En URSS, la modulation de phase a également été étudiée à la station RBU (66 2/3 kHz) qui utilise des signaux à bande étroite sur des sous-porteuses de 100 et 312,5 Hz et une excursion de phase de 0,7 rad pour identifier les repères de seconde et de minute. Une autre technique, qui consiste à utiliser la modulation de phase par une séquence pseudo-aléatoire, est expérimentée à la station DCF77 (77,5 kHz) depuis 1983. Les premiers résultats montrent que le temps obtenu par corrélation de la séquence pseudo-aléatoire est plus facile à reproduire que celui obtenu par le repère de seconde modulé en amplitude.

3.3 Méthodes de transfert de précision de signaux horaires

Etant donné que l'on améliore constamment les comparaisons de signaux horaires de précision (≤ 1 ns) établies par divers moyens, il est nécessaire de déterminer les limitations imposées par l'instabilité des instruments et les variations de la propagation; cette nécessité est reconnue dans le nouveau Programme d'études 5B/7. Se pose alors un autre problème lié au précédent, celui de déterminer les retards subis dans les antennes utilisées pour émettre des signaux horaires de haute précision et un premier Rapport a été élaboré à ce sujet (Rapport 1017). Le Rapport 897, relatif aux méthodes de transfert de précision de signaux horaires à courte distance, a été développé et présente maintenant les résultats obtenus avec des câbles, y compris des câbles en fibres optiques et des liaisons en visibilité directe utilisant des émetteurs laser.

3.4 Méthodes appliquées pour le transfert et la diffusion de fréquences étalon et de signaux horaires

Suite aux discussions lors de la Réunion intérimaire, il a été estimé que le texte original du Rapport 363 sur les comparaisons entre les méthodes appliquées pour le transfert et la diffusion était devenu peu maniable et qu'il convenait de confier à un Rapporteur spécial la tâche de réviser son contenu et de chercher à identifier les parties de ce Rapport qu'il faudrait peut-être traiter séparément, en les développant, soit dans le cadre d'un Rapport existant, soit pour servir de base à un nouveau texte. La Commission d'études a eu la chance de pouvoir faire appel au Dr G. M. R. Winkler (Etat-Unis d'Amérique) pour effectuer ce travail qui, ayant été examiné à la Réunion finale, constitue maintenant la version révisée du Rapport 363. Il s'agit d'un document principalement comparatif qui passe en revue toutes les différentes méthodes de transfert et de diffusion de signaux horaires dont la description détaillée est donnée ailleurs, par exemple dans le Rapport 518 pour le transfert par satellite.

Cette révision a fait apparaître que l'emploi des méthodes télévisuelles pour le transfert et la diffusion constituait un sujet suffisamment important pour justifier l'élaboration d'un nouveau Rapport (Rapport 1016).

3.5 Codes horaires

L'émission d'un code horaire reste de grande utilité pour un certain nombre de services exploités dans les bandes de fréquences attribuées et dans les bandes de fréquences additionnelles. On trouvera dans le Rapport 578 une description détaillée des formats de code utilisés: il n'existe pas de code unique, commun à tous les services de signaux horaires et de fréquences étalon, bien que la Recommandation 583 conseille de limiter le nombre des codes et de faire en sorte que tout nouveau système soit conforme à l'un des codes déjà approuvés. A la Réunion finale, on a pris note de la Recommandation sur les formats de code horaire, publiée en juin 1985 par le Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS). Cette Recommandation définit un format de base commun pour les données de code horaire qui sera utilisé par sept agences spatiales membres de ce comité.

4. Caractérisation des sources et établissement des échelles de temps

La qualité des sources de fréquences étalon et les méthodes dont on dispose pour la caractériser sont des concepts essentiels pour les travaux de la Commission d'études 7. La Réunion finale a adopté une structure plus logique pour les textes traitant de ce sujet: la nouvelle Question 10/7 sur la qualité des étalons de fréquence et de temps a été approuvée et on lui a adjoint le nouveau Programme d'études 10B/7 «Algorithmes d'échelles de temps et problèmes statistiques» (ancien Programme d'études 1D-1/7 dont seul le titre a été changé) ainsi que le nouveau Programme d'études 10A/7 sur la qualité des étalons de fréquence et de temps. Des corrections mineures ont été apportées à un certain nombre de Rapports connexes y compris le Rapport 364 sur le comportement des générateurs de fréquences étalon, le Rapport 439 sur les effets relativistes, le Rapport 579 sur les algorithmes d'échelles de temps et le Rapport 580 sur la caractérisation du bruit de fréquence et de phase. Les nouveaux résultats obtenus pour les fréquences étalon dans les gammes submillimétrique et visible du spectre électromagnétique sont consignés dans le Rapport 738.

5. Groupes de travail intérimaires

Ayant fonctionné activement et efficacement durant deux périodes d'études, les GTI 7/4 et 7/5 s'étaient acquittés de la majeure partie de leur tâche et ont pu achever leurs travaux à la Réunion finale. En conséquence, les Décisions 28 et 29 ont été annulées. La Commission d'études a exprimé ses remerciements aux Présidents des deux Groupes, M. R. E. Beehler (Etats-Unis d'Amérique) et Dr P. Kartaschoff (Suisse), pour les efforts inlassables et le zèle qu'ils ont déployés pendant près de huit ans pour mener ces études importantes. Les remerciements de la Commission d'études s'adressent également aux membres des deux Groupes de travail et à leurs administrations, qui ont contribué au succès des travaux.

5.1 GTI 7/4

Doté de larges attributions, ce Groupe de travail était chargé d'étudier les conditions, les possibilités techniques et les méthodes qui permettraient de diffuser, à l'échelle mondiale, une référence de temps par satellite. Selon la pratique habituelle, le GTI a travaillé essentiellement par correspondance, recueillant ainsi une documentation considérable. Cependant, les entretiens qui ont eu lieu à l'occasion des Réunions intérimaires et des Réunions finales en 1980, 1981 et 1983 ont également fait progresser les travaux.

Après avoir réuni une vaste documentation de base sur les techniques spatiales, y compris des résultats expérimentaux et des examens comparatifs des avantages et des inconvénients des divers systèmes, le GTI 7/4 a rédigé des résumés qui ont été insérés dans la version révisée du Rapport 518. Ce Rapport très général, qui constitue le document de base de la Commission d'études dans ce domaine, contient aussi du matériel sur le secteur spatial, tiré d'autres Rapports, en particulier du Rapport 363 déjà mentionné au § 3.4, et c'est au GTI qu'il incombait de le tenir à jour en procédant aux révisions appropriées lors des Réunions intermédiaires et des Réunions finales. Parmi les autres textes de la Commission d'études qui découlent directement des travaux du GTI 7/4, on trouve la Recommandation 582 invitant les administrations à tenir compte des avantages qu'offrent les techniques spatiales lorsqu'elles planifient les futurs services de diffusion de signaux horaires ainsi que le Vœu 72 portant sur l'intérêt des satellites météorologiques sur orbite géostationnaire pour l'émission de signaux horaires et de codes horaires. Le Groupe de travail avait également été chargé de préparer la contribution de la Commission d'études à la Réunion préparatoire (CPM, 1984) pour la CAMR ORB-85 sur l'utilisation de l'orbite géostationnaire.

Etant donné le nombre et la diversité des systèmes à satellites déjà en service ou prévus, qui améliorent la diffusion et le transfert de signaux horaires, il n'est pas surprenant que le GTI 7/4 n'ait pas été en mesure de recommander un système ou une technique unique. Cependant, le GTI a joué un rôle important: il a fourni des renseignements objectifs sur les systèmes les plus prometteurs, encouragé les administrations membres à accorder la plus haute priorité à la mise au point de nouvelles techniques spatiales pour le transfert de signaux horaires et de services d'exploitation, enfin il a informé tous les spécialistes concernés des moyens d'action dont ils disposent pour faire établir des systèmes à satellites spécifiques capables de répondre à leurs besoins. Certaines de ces activités auront des répercussions à longue échéance en facilitant les travaux qui seront entrepris en vue de la rédaction d'un manuel sur la diffusion par satellite des signaux horaires et des fréquences étalon (voir § 6).

5.2 GTI 7/5

On rappellera que le GTI 7/5 doit sa création à une demande de la Commission d'études XVIII du CCITT qui avait sollicité de la Commission d'études 7 des conseils et des renseignements sur les horloges de référence assurant la synchronisation dans les réseaux numériques, en particulier sur leur fiabilité et leur instabilité et sur les techniques qui permettent de mesurer cette dernière. Pour répondre à la question posée sur la fiabilité des fréquences étalon et des horloges de référence, le Groupe de travail a mené dans le monde entier une enquête complète portant à la fois sur les dispositifs atomiques et non atomiques. Ce fut un travail très utile auquel ont participé activement tous les membres du GTI. Les résultats sont présentés dans plusieurs tableaux du Rapport 898 qui peut être considéré comme une réponse complète aux questions qu'avait posées la Commission d'études XVIII. Le Rapport reprend également l'ancien Rapport 737 sur la fiabilité des étalons de temps et de fréquence, qui se trouve ainsi supprimé.

Il est très satisfaisant de constater que les données sur la fiabilité recueillies et analysées par le GTI 7/5 ont été insérées dans une annexe à la Recommandation G.811 du CCITT. Dans cette Recommandation, on spécifie également le rythme à associer aux nœuds auxquels aboutissent des liaisons internationales, sous la forme de l'erreur d'intervalle de temps (TIE) admissible en fonction de la période d'observation pour les horloges de référence. L'une des caractéristiques du Rapport 898 est qu'il traduit l'erreur d'intervalle de temps (TIE) en termes couramment utilisés par la Commission d'études 7 comme l'intégrale de l'écart de fréquence normalisé.

Les contacts entre la Commission d'études 7 et la Commission d'études XVIII du CCITT continuent d'être très utiles pour les deux parties et il est encourageant que le Dr Kartaschoff ait accepté d'assurer les fonctions de Rapporteur spécial pour promouvoir les rapports entre les deux Commissions d'études.

6. Décision 65: Manuel sur l'utilisation des satellites pour la diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon

La Commission d'études 7 est chargée d'étudier l'utilisation des systèmes à satellites pour la diffusion à l'échelle mondiale de signaux horaires et de fréquences étalon; de par leur nature, les satellites permettent de surmonter nombre de restrictions inhérentes aux systèmes de Terre équivalents qui servent à cette diffusion. Les études menées par le GTI 7/4 ont montré les possibilités qu'offrent les techniques spatiales, sur la base des résultats d'exploitation d'un certain nombre de systèmes de diffusion ou de comparaison de signaux horaires utilisant des satellites placés sur l'orbite géostationnaire. Il ne fait aucun doute qu'il y aura place à l'avenir pour un service mondial de ce type, en raison notamment de la mise en service du système mondial de positionnement (GPS) qui sera opérationnel dès la prochaine période d'études.

Compte tenu de ce qui précède, la Commission d'études a décidé, à sa Réunion finale, que le moment était venu de constituer un Groupe de travail spécial pour préparer un Manuel sur les services de diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon par satellite. Dans un premier temps, le texte sera établi à partir de documents de la Commission d'études 7, en particulier du Rapport 518 et des contributions réunies par le GTI 7/4: il s'appuiera également sur les documents pertinents d'autres Commissions d'études ainsi que sur la volumineuse documentation extérieure relative aux systèmes à satellites pour la détermination de la position. Il est encourageant de noter qu'à la suite de la communication de cette Décision, les administrations suivantes ont fait connaître leur intention de participer au Groupe de travail: Canada, France, Inde, Japon, Royaume-Uni et la République socialiste fédérative de Yougoslavie ainsi que le Bureau international de l'heure.

SECTION 7A: GLOSSAIRE

Rapport

RAPPORT 730-1 *

GLOSSAIRE

(1978-1986)

1. Introduction

La liste des termes ci-après constitue un glossaire destiné aux membres de la Commission d'études 7 et aux usagers des services de fréquences étalon et de signaux horaires. Les mesures précises du temps peuvent souvent être influencées par des effets relativistes. Les termes et définitions qu'on trouvera ci-après ne tiennent pas compte dans tous les cas de ces effets; ils n'impliquent pas non plus qu'on doive toujours en tenir compte. Les termes appartiennent à deux catégories: ceux dont l'emploi est propre aux services de fréquences étalon et de signaux horaires et ceux dont l'emploi est plus général, mais qui ont un emploi spécifique dans ce domaine. On s'est efforcé d'obtenir une concordance de fond entre les définitions de ces derniers termes et celles que contient le Vocabulaire électrotechnique international (VEI). La liste a été présentée pour examen à la Commission mixte CCIR/CCITT pour le vocabulaire (CMV). Les équivalences des termes sont indiquées en anglais et en espagnol (termes imprimés en italique).

2. Définitions

La numérotation suit l'ordre donné par le GTI 7/2: les définitions manquantes seront progressivement soumises après l'Assemblée plénière.

3.25 Temps, Time, Tiempo (explication)

Comme le temps est une notion générale, on ne peut pas définir ce terme sans ambiguïté.

Note. — Dans chaque langue, on utilise ce terme avec plusieurs sens différents.

3. Index (dans l'ordre alphabétique)

Code horaire	4.8	Exactitude	0.1
Cohérence de fréquence	2.4	Fréquence	1.1
Cohérence de phase	2.3	Fréquence étalon	1.4
Comparaison de temps	3.16	Fréquence normée	1.3
Date	3.12	Fréquence porteuse	1.2
Date julienne (DJ)	4.10	Horloge	3.23C
Date julienne modifiée (DJM)	4.13	Horloge coordonnée	4.2
Décalage	0.11	Incertitude	0.3
Décalage normé	0.12	Instabilité de fréquence	0.5
Défaut de fidélité	0.8	Instant	4.3
Déphasage	2.7	Intervalle de temps	4.9
Déplacement de fréquence	1.9	Lecture d'une échelle de temps	3.13
Dérive de fréquence	1.10	Numéro de jour julien	4.11
Dérive de fréquence normée	1.11	Phase	2.1
Différence de fréquence	1.12	Précision	0.2
Différence de fréquence normée	1.13	Repère de temps	3.15
Différence entre échelles de temps	3.14	Reproductibilité	0.7
Différence entre temps d'horloge	4.1	Saut de temps	3.20
DUT1	3.21	Seconde intercalaire	4.4
Ecart de fréquence	1.7	Service des fréquences	
Ecart de fréquence normé	1.8	étalon par satellite	1.6A
Echelle de temps atomique	3.2	Service des signaux	
Echelle de temps coordonnée	3.5	horaires par satellite	1.6B
Echelles de temps en synchronisme	3.17	Station de fréquence étalon	
Emission de fréquence étalon	1.5	et/ou de signaux horaires	1.6
Emission de signaux horaires	1.5A	Synchronisme	4.15
Erreur	0.4	Temps	3.25
Etalon de fréquence	1.14	Temps atomique international (TAI)	3.3
Etalon de temps	3.23	Temps coordonné	3.6
Etalon primaire de temps	3.23A	Temps propre	3.7
Etalon secondaire de temps	3.23B	Temps universel (UT)	3.9
Etalon primaire de fréquence	1.15	Temps universel coordonné (UTC)	3.4
Etalon secondaire de fréquence	1.16	Unité d'une échelle de temps	3.18
Etalonnage	0.9	Valeur nominale	0.10

* Ce Rapport doit être porté à l'attention de la CMV.

0.1 **Exactitude, Accuracy, Exactitud**

Généralement équivalente à l'incertitude systématique d'une valeur mesurée. (Voir aussi «incertitude» (0.3).)

0.2 **Précision, Precision, Precisión**

Incertitude aléatoire d'une valeur mesurée, exprimée par l'écart type ou un multiple de l'écart type. (Voir aussi «incertitude» (0.3).)

0.3 **Incertitude, Uncertainty, Incertidumbre**

L'incertitude d'une valeur mesurée exprime l'amplitude d'un écart possible entre cette valeur et la valeur réelle.

Il est souvent possible de faire la distinction entre deux composantes: l'incertitude systématique et l'incertitude aléatoire.

L'incertitude aléatoire est exprimée par l'écart type ou par un multiple de l'écart type. L'incertitude systématique est généralement évaluée par l'étude des paramètres qui affectent la valeur mesurée.

Le terme «exactitude» est généralement équivalent au terme «incertitude systématique», alors que le terme «précision» est équivalent à «incertitude aléatoire». De façon similaire, l'exactitude «totale» d'une mesure est équivalente à une incertitude «globale» qui couvre les deux parties, incertitude systématique et incertitude aléatoire.

0.4 **Erreur*, Error, Error**

Différence non intentionnelle: valeur mesurée moins valeur réelle.

0.5 **Instabilité de fréquence, Frequency instability, Inestabilidad de frecuencia**

Exprimée par le changement de fréquence au cours d'un intervalle de temps donné τ . On fait généralement la distinction entre une dérive de fréquence (voir 1.10) et des fluctuations stochastiques de fréquence. On a développé des variances spéciales pour caractériser ces fluctuations.

Le terme «stabilité» est souvent employé à la place du terme «instabilité». Cet usage est acceptable.

0.7 **Reproductibilité, Reproducibility, Reproductibilidad**

- a) En ce qui concerne un ensemble de dispositifs indépendants, mais de même conception, c'est l'écart type des valeurs produites par ces dispositifs.
- b) En ce qui concerne un seul dispositif mis en œuvre de façon répétée, c'est l'écart type des valeurs produites par ce dispositif.

0.8 **Défaut de fidélité⁽¹⁾, Resetability, Reposicionabilidad**

Ecart inévitable entre les valeurs indiquées par un appareil lorsque les paramètres spécifiés sont réglés séparément dans des conditions d'emploi spécifiées.

Note. — Ce défaut est donné par l'estimation des limites de confiance (c'est-à-dire l'incertitude des valeurs observées).

- (¹) Ce terme remplace celui de «répétabilité» considéré comme impropre dans le cas des générateurs de fréquence et comme relevant des méthodes de mesure.

0.9 **Étalonnage*, Calibration, Calibración**

Action d'identifier et de mesurer les erreurs dans les instruments et/ou les méthodes.

Note. — Dans de nombreux cas, par exemple pour un générateur de fréquence, l'étalonnage est lié à la stabilité de l'appareil et, par suite, son résultat est une fonction du temps.

0.10 **Valeur nominale*, Nominal value, Valor nominal**

Valeur que l'on a spécifiée ou que l'on veut obtenir, indépendamment de toute incertitude de réalisation.

Note. — Pour un dispositif qui réalise une grandeur physique, c'est la valeur de cette grandeur, spécifiée par le constructeur. Comme c'est une valeur idéale, elle ne comporte pas de tolérance.

0.11 **Décalage*, Offset, Separación**

Différence intentionnelle entre la valeur réalisée et la valeur nominale. (Voir aussi décalage normé.)

* Ces définitions diffèrent de celles du VEI, mais la Commission d'études 7 est d'avis qu'elles sont plus appropriées pour les services de fréquences étalon et de signaux horaires.

0.12 **Décalage normé**, *Normalized offset, Separación normalizada*

Décalage divisé par la valeur nominale.

Note. — Est aussi appelé souvent «décalage relatif». L'expression «décalage fractionnaire» doit être évitée.

1.1 **Fréquence ***, *Frequency, Frecuencia*

Si T est la période d'un phénomène périodique, la fréquence est $f = 1/T$. En unités SI, la période est exprimée en secondes et la fréquence en hertz.

1.2 **Fréquence porteuse**, *Carrier frequency, Frecuencia portadora*

Fréquence de la porteuse.

Note. — On attire l'attention sur le fait que «porteuse» n'a pas reçu de définition satisfaisante dans le VEI.

1.3 **Fréquence normée**, *Normalized frequency, Frecuencia normalizada*

Rapport entre la valeur réelle de la fréquence et sa valeur nominale.

1.4 **Fréquence étalon**, *Standard frequency, Frecuencia patrón*

Fréquence reliée d'une manière connue à celle d'un étalon de fréquence.

Note. — Le terme fréquence étalon est souvent utilisé pour le signal dont la fréquence est une fréquence étalon.

1.5 **Emission de fréquences étalon**, *Standard frequency emission, Emisión de frecuencias patrón*

Emission qui diffuse une ou plusieurs fréquences étalon à intervalles réguliers, avec une exactitude de fréquence spécifiée par sa moyenne journalière.

Note. — La Recommandation 460 du CCIR recommande un écart normé inférieur à 1×10^{-10} .

1.5A **Emission de signaux horaires**, *Standard time-signal emission, Emisión de señales horarias*

Emission qui diffuse des signaux horaires à intervalles réguliers, avec une exactitude spécifiée.

Note. — Le CCIR recommande, dans la Recommandation 460, que les signaux horaires soient émis à moins de 1 ms par rapport au UTC et qu'ils contiennent l'information DUT1 selon un code spécifié.

1.6 **Station de fréquence étalon et/ou de signaux horaires**, *Standard frequency and/or time-signal station, Estación de frecuencias patrón y/o de señales horarias*

Station dont le but essentiel est d'émettre une fréquence étalon et/ou des signaux horaires.

1.6A **Service des fréquences étalon par satellite**, *Standard frequency satellite service, Servicio de frecuencias patrón por satélite*

Service de radiocommunications faisant usage de stations spatiales situées sur des satellites de la Terre aux mêmes fins que le service des fréquences étalon.

1.6B **Service des signaux horaires par satellite**, *Time-signal satellite service, Servicio de señales horarias por satélite*

Service de radiocommunications faisant usage de stations spatiales situées sur des satellites de la Terre aux mêmes fins que le service des signaux horaires.

1.7 **Ecart de fréquence**, *Frequency departure, Desajuste de frecuencia*

Ecart non intentionnel par rapport à la valeur nominale de la fréquence.

Note. — Le terme «déviations de fréquence» doit être évité, car il est utilisé en modulation de fréquence.

1.8 **Ecart de fréquence normé**, *Normalized frequency departure, Desajuste de frecuencia normalizado*

Ecart de fréquence divisé par la valeur nominale de la fréquence.

Note. — Souvent, est aussi appelé «écart relatif de fréquence». L'expression «écart fractionnaire de fréquence» doit être évitée.

1.9 **Déplacement de fréquence**, *Frequency shift, Desplazamiento de frecuencia*

Changement intentionnel de fréquence utilisé aux fins de modulation, ou non intentionnel, dû à des phénomènes physiques.

Note. — L'expression «déplacement de fréquence» ne s'appliquant, dans d'autres Commissions d'études du CCIR, qu'à des changements de fréquence intentionnels associés à des méthodes de modulation, il est recommandé d'éviter l'emploi de «déplacement de fréquence» quand il s'agit d'un changement non intentionnel.

* Ces définitions diffèrent de celles du VEI, mais la Commission d'études 7 est d'avis qu'elles sont plus appropriées pour les services de fréquences étalon et de signaux horaires.

1.10 Dérive de fréquence *, *Frequency drift, Deriva de frecuencia*

Changement cumulatif indésirable de la fréquence au cours du temps.

1.11 Dérive de fréquence normée, *Normalized frequency drift, Deriva normalizada de frecuencia*

Dérive de fréquence divisée par la valeur nominale de la fréquence.

Note. — Est aussi appelée souvent «dérive de fréquence relative». L'expression «dérive fractionnaire de fréquence» doit être évitée.

1.12 Différence de fréquence, *Frequency difference, Diferencia de frecuencia*

Différence algébrique entre deux fréquences. Les deux fréquences peuvent avoir des valeurs nominales identiques ou différentes.

1.13 Différence de fréquence normée, *Normalized frequency difference, Diferencia de frecuencia normalizada*

Différence algébrique de deux fréquences normées. Les deux valeurs nominales peuvent être identiques ou différentes.

Note. — Est aussi appelée souvent «différence relative de fréquence». L'expression «différence fractionnaire de fréquence» doit être évitée.

1.14 Etalon de fréquence, *Frequency standard, Patrón de frecuencia*

Générateur dont la fréquence du signal de sortie constitue une référence précise de fréquence.

1.15 Etalon primaire de fréquence, *Primary frequency standard, Patrón primario de frecuencia*

Etalon de fréquence dont la fréquence correspond à la définition adoptée pour la seconde, son exactitude spécifiée étant obtenue sans étalonnage par rapport à un autre appareil.

Note. — L'autorité métrologique internationale reconnue est la Conférence générale des poids et mesures. La référence adoptée à l'heure actuelle est une transition particulière de l'atome de césium 133.

1.16 Etalon secondaire de fréquence, *Secondary frequency standard, Patrón secundario de frecuencia*

Etalon de fréquence qui est étalonné par rapport à un étalon primaire de fréquence. Le terme «secondaire» décrit ainsi la position de l'étalon dans une hiérarchie; il n'est pas nécessairement lié à sa qualité.

2.1 Phase, *Phase, Fase*

Dans un phénomène périodique, décrit analytiquement par une fonction du temps (ou de l'espace), la phase désigne généralement tout état possible et distinct du phénomène proprement dit.

La phase peut être identifiée par l'intervalle de temps qui est compris entre son apparition et une référence donnée, cette durée devant être correctement désignée par «temps de phase» (on se contente souvent d'utiliser le mot «phase»). Si ce phénomène est sinusoïdal, la phase peut, en particulier, être spécifiée par l'angle ou par le temps, mesurés à partir d'une référence donnée, selon les dimensions attribuées à la période de référence (notamment 2π ou T).

Dans le service de diffusion des fréquences étalon et des signaux horaires, on étudie principalement les différences de temps de phase, c'est-à-dire les différences de temps entre deux phases données du même phénomène ou de deux phénomènes différents.

2.3 Cohérence de phase, *Coherence of phase, Coherencia de fase*

Etat dans lequel sont deux ondes de fréquences M et N , tel qu'elles retrouvent entre elles la même différence de phase au bout de M périodes de la première et N périodes de la seconde, M/N étant un nombre rationnel qui s'obtient par multiplication et/ou division à partir de la même fondamentale.

2.4 Cohérence de fréquence, *Coherence of frequency, Coherencia de frecuencia*

(même définition que pour «cohérence de phase»).

2.7 Déphasage, *Phase shift, Desplazamiento de fase*

Changement de phase intentionnel ou non.

3.2 Echelle de temps atomique, *Atomic time scale, Escala de tiempo atómico*

Echelle de temps fondée sur les périodicités de phénomènes atomiques ou moléculaires.

* Ces définitions diffèrent de celles du VEI, mais la Commission d'études 7 est d'avis qu'elles sont plus appropriées pour les services de fréquences étalon et de signaux horaires.

3.3 Temps atomique international (TAI), *International Atomic Time, Tiempo Atómico Internacional*

Echelle de temps établie par le Bureau international de l'heure (BIH) sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système international d'unités (SI).

3.4 Temps universel coordonné (UTC), *Coordinated Universal Time, Tiempo Universal Coordinado*

Echelle de temps, maintenue par le BIH, qui constitue la base d'une diffusion coordonnée des fréquences étalon et des signaux horaires. Il a la même marche que le TAI, mais il en diffère par un nombre entier de secondes.

On ajuste l'échelle de UTC par insertion ou omission de secondes (sauts de secondes positifs ou négatifs) pour assurer sa concordance approximative avec l'échelle UT1.

3.5 Echelle de temps coordonnée, *Coordinated time scale, Escala de tiempo coordinada*

Echelle de temps synchronisée dans des limites données par rapport à une échelle de temps de référence.

3.6 Temps-coordonnée, *Coordinate time, Tiempo-coordenada*

Notion de temps correspondant à une trame particulière coordonnée, valable pour une région de l'espace avec potentiel de gravitation variable.

Note. — Une échelle de temps réalisée sur la base de la notion de temps-coordonnée est une «échelle de temps coordonnée».

Exemple:

TAI est une échelle de temps-coordonnée ayant pour référence la surface de la Terre au niveau de la mer.

3.7 Temps propre, *Proper time, Tiempo propio*

Notion de temps liée à un endroit déterminé.

Une échelle de temps réalisée sur la base de cette notion est une «échelle de temps propre».

Exemples:

- a) pour le temps propre: la seconde est définie dans le temps propre de l'atome de césium;
- b) pour l'échelle de temps propre: échelle de temps produite dans un laboratoire et non transmise à l'extérieur de ce laboratoire.

3.9 Temps universel (UT), *Universal time (UT), Tiempo universal (UT)*

Le temps universel (UT) est la désignation générale d'échelles de temps fondées sur la rotation de la Terre.

Dans les applications où l'on ne peut tolérer des erreurs de quelques centièmes de seconde, il est nécessaire de spécifier la forme de UT qui doit être utilisée:

UT0 est le temps solaire moyen du méridien origine, qu'on obtient par l'observation astronomique directe;

UT1 est UT0 corrigé des effets des petits mouvements de la Terre par rapport à son axe de rotation (variation polaire);

UT2 est UT1 corrigé des effets d'une petite fluctuation saisonnière dans la vitesse de rotation de la Terre;

UT1 est le temps utilisé dans le présent document, parce qu'il correspond directement à la position angulaire de la Terre autour de son axe de rotation diurne. (TMG ou GMT peuvent être considérés comme équivalents généraux de UT.)

Les définitions précises des termes ci-dessus et les concepts invoqués sont disponibles dans le glossaire de la publication annuelle «*The Astronomical Almanac*» (US Govt. Printing Office, Washington DC et H.M. Stationery Office, Londres).

3.12 Date, *Date, Fecha*

Synonyme de «lecture d'une échelle de temps» mais se rapportant généralement à un calendrier.

Note. — La date peut être exprimée en années, mois, jours, heures, minutes, secondes et fractions correspondantes.

3.13 Lecture d'une échelle de temps, *Time scale reading, Lectura de una escala de tiempo*

Valeur lue sur une échelle de temps à un instant donné. La lecture d'une échelle de temps doit être suivie de la dénomination de l'échelle de temps, et entre parenthèses, du nom de l'horloge, de la station émettrice, de l'observatoire astronomique ou du laboratoire de métrologie, par exemple: UTC (...).

3.14 **Différence entre échelles de temps, Time scale difference, Diferencia entre escalas de tiempo**

Différence entre les indications lues au même instant sur deux échelles de temps.

Note. — Pour éviter toute confusion de signe, on utilisera des valeurs algébriques en appliquant les conventions suivantes: soit la lecture T d'une échelle de temps de référence, a étant la lecture d'une échelle de temps A et b la lecture d'une échelle de temps B à l'instant daté T ; la différence entre les deux échelles de temps A et B est donnée par la formule:

$$A - B = a - b \text{ à l'instant daté } T.$$

La même convention s'applique au cas où A et B sont des horloges.

3.15 **Repère de temps, Time marker, Marca de tiempo**

Signal de référence, souvent répété périodiquement, permettant d'assigner des valeurs numériques à des événements pour les repérer sur une échelle de temps.

3.16 **Comparaison de temps, Time comparison, Comparación de tiempo**

Détermination de la différence entre échelles de temps.

3.17 **Echelles de temps en synchronisme, Time scales in synchronism, Escalas de tiempo en sincronismo**

Deux échelles de temps sont en synchronisme si elles assignent la même date à un même événement.

Note. — Si des échelles de temps sont produites dans des lieux spatialement distincts, il faut tenir compte du temps de propagation des signaux horaires transmis et des effets de relativité.

3.18 **Unité d'une échelle de temps, Time scale unit, Unidad de escala de tiempo**

Intervalle de temps élémentaire d'une échelle de temps.

3.20 **Saut de temps, Time step, Salto de tiempo**

Discontinuité intentionnellement introduite dans une échelle de temps à une date spécifiée. Un saut de temps est positif (+) si la lecture de l'échelle de temps est augmentée, et négatif (−) si elle est diminuée à la suite du saut.

3.21 **DUT1, DUTI, DUTI**

Valeur de la différence prévue $UT1 - UTC$ diffusée avec les signaux horaires. On peut donc considérer DUT1 comme une correction qu'il convient d'ajouter à l'échelle UTC pour obtenir une meilleure approximation de UT1.

Les valeurs de DUT1 sont données par le BIH sous forme de multiples entiers de 0,1 s.

3.23 **Etalon de temps, Time standard, Patrón de tiempo**

- a) Dispositif servant à la réalisation de l'unité de temps.
- b) Dispositif maintenu en fonctionnement continu servant à la réalisation d'une échelle de temps conformément à la définition de la seconde.

3.23A **Etalon primaire de temps, Primary time standard, Patrón de tiempo primario**

Etalon de temps fonctionnant conformément à la définition adoptée pour la seconde, sans étalonnage du dispositif.

3.23B **Etalon secondaire de temps, Secondary time standard, Patrón de tiempo secundario**

Etalon de temps nécessitant un étalonnage.

3.23C **Horloge, Clock, Reloj**

Appareil servant à la mesure du temps et à l'affichage de l'heure et utilisant généralement un phénomène périodique.

3.25 **Temps, Time, Tiempo**

Voir l'explication au début du § 2, Définitions.

4.1 **Différence entre temps d'horloge, Clock time difference, Diferencia de tiempo de reloj**

Voir «Différence entre échelles de temps».

4.2 **Horloge coordonnée, Coordinate clock, Reloj coordinado**

Horloge faisant partie d'un groupe d'horloges réparties dans l'espace et produisant des échelles de temps synchronisées sur l'échelle de temps d'une horloge de référence installée dans un emplacement déterminé (voir la déf. 3.17).

4.3 Instant, Instant, Instante

Point dans le temps, qui n'est pas nécessairement rapporté à une échelle de temps.

4.4 Seconde intercalaire, Leap second, Segundo intercalar

Saut de temps d'une seconde, servant à ajuster l'échelle UTC pour qu'elle concorde approximativement avec l'échelle UT1.

Une seconde insérée s'appelle seconde intercalaire positive et une seconde omise s'appelle seconde intercalaire négative.

4.8 Code horaire, Time code, Código horario

Code utilisé pour l'émission d'informations de temps.

4.9 Intervalle de temps, Time interval, Intervalo de tiempo

Durée entre deux instants lue sur la même échelle de temps.

4.10 Date julienne (DJ), Julian date (JD), Fecha juliana (FJ)

Numéro de jour julien suivi de la fraction de jour qui s'est écoulée depuis le midi (12 h 00 UT) précédent.

Exemple:

La date 1900 janvier 0,5 d UT correspond à DJ = 2 415 020,0.

4.11 Numéro de jour julien, Julian day number, Número de día juliano

Numéro d'un jour donné, pris dans une suite continue de jours qui a son origine à 12 h 00 UT le 1^{er} janvier de l'an 4713 avant J.-C. du calendrier julien (jour julien zéro).

Exemple:

Le jour s'étendant de 1900 janvier 0,5 d UT à 1900 janvier 1,5 d UT a le numéro 2 415 020.

4.13 Date julienne modifiée (DJM), Modified Julian Date (MJD), Fecha modificada del calendario Juliano (FMCJ)

Date julienne diminuée de 2 400 000,5 jours.

4.15 Synchronisme, Synchronism, Sincronismo

(Voir «Echelles de temps en synchronisme».)

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 7B: SPÉCIFICATIONS POUR LES SERVICES DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

Recommandations et Rapports

RECOMMANDATION 374-3

ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1951-1953-1956-1959-1963-1966-1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications, Genève, 1979, a attribué les fréquences $20 \text{ kHz} \pm 0,05 \text{ kHz}$, $2,5 \text{ MHz} \pm 5 \text{ kHz}$ ($2,5 \text{ MHz} \pm 2 \text{ kHz}$ dans la Région 1), $5 \text{ MHz} \pm 5 \text{ kHz}$, $10 \text{ MHz} \pm 5 \text{ kHz}$, $15 \text{ MHz} \pm 10 \text{ kHz}$, $20 \text{ MHz} \pm 10 \text{ kHz}$ et $25 \text{ MHz} \pm 10 \text{ kHz}$ au service de fréquences étalon et de signaux horaires;
- b) que cette même Conférence a attribué les fréquences suivantes aux services de fréquences étalon et de signaux horaires par satellite:
 - 400,1 MHz $\pm 25 \text{ kHz}$,
 - 4202 MHz $\pm 2 \text{ MHz}$ (espace vers Terre),
 - 6427 MHz $\pm 2 \text{ MHz}$ (Terre vers espace),
 - 13,4 à 14,0 GHz (Terre vers espace),
 - 20,2 à 21,2 GHz (espace vers Terre),
 - 25,25 à 27,0 GHz (Terre vers espace),
 - 30,0 à 31,3 GHz (espace vers Terre);
- c) que des fréquences étalon et des signaux horaires supplémentaires sont émis dans d'autres bandes de fréquences;
- d) que l'on doit tenir compte des dispositions de l'Article 33 du Règlement des radiocommunications;
- e) qu'il est nécessaire de poursuivre une coopération étroite entre la Commission d'études 7, l'Organisation maritime internationale (OMI), l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), le Bureau international de l'heure (BIH) et les Unions intéressées du Conseil international des unions scientifiques (CIUS),

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

- 1. que la Commission d'études 7 poursuive l'étude d'un service mondial de fréquences étalon et de signaux horaires; qu'elle explore à cette fin les possibilités d'application de nouvelles techniques;
- 2. que les services existants de fréquences étalon et de signaux horaires fonctionnent conformément aux indications détaillées des Recommandations du CCIR;
- 3. que l'on intensifie les efforts pour réduire les brouillages mutuels entre les émissions faites sur les fréquences indiquées au point a);
- 4. que toutes les administrations envisagent l'emploi de nouvelles méthodes de diffusion des fréquences étalon et des signaux horaires avant de prévoir de nouvelles émissions dans les bandes 6 et 7.

RECOMMANDATION 375-2

ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES DANS DE NOUVELLES BANDES DE FRÉQUENCES

(Question 2/7)

(1959-1963-1966-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire de réaliser, à de nombreuses fins, une synchronisation mondiale du temps avec une incertitude inférieure à 1 ms;
- b) que des comparaisons précises intercontinentales de la fréquence ont été réalisées grâce à l'utilisation des émissions d'une fréquence stable dans la bande 4;

- c) que des comparaisons de temps avec une incertitude d'environ 1 μ s sont possibles à des distances supérieures à 2000 km en utilisant des signaux à impulsions transmis par l'onde de sol;
- d) que la transmission en visibilité directe dans les bandes 8 et 9 et les signaux transmis principalement par l'onde de sol dans la bande 5 offrent le moyen de distribuer des signaux horaires et des fréquences étalon;
- e) que des comparaisons précises continentale et intercontinentale de la fréquence et du temps ont été réalisées grâce à l'utilisation de satellites;
- f) que de nouvelles méthodes de comparaison du temps et de la fréquence peuvent être mises au point à l'aide de techniques laser,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que l'on fasse connaître les méthodes de mesure et les résultats acquis sur l'instabilité de phase le long du trajet dans les bandes 4 et 5;
2. qu'on utilise les possibilités offertes par les systèmes de navigation à émissions par impulsions propagées par l'onde de sol, en vue d'établir une synchronisation intercontinentale et si possible mondiale du temps;
3. que des stations appropriées existant dans les bandes 5 et 6 soient employées dans toute la mesure du possible, pour diffuser les fréquences étalon, leurs fréquences porteuses étant stabilisées avec une très haute précision;
4. que les stations de radiodiffusion sonore à modulation de fréquence et les stations de télévision actuellement exploitées dans les bandes 8 et 9, soient employées dans toute la mesure du possible pour diffuser des fréquences étalon et des signaux horaires susceptibles d'être ajoutés à la modulation actuelle ou d'utiliser cette dernière, (y compris la modulation de sous-porteuse), sans gêner le programme normal;
5. que les systèmes à satellites, qui ne sont pas essentiellement destinés au service des fréquences étalon et des signaux horaires, soient conçus de façon à donner, chaque fois que cela est possible, des renseignements sur les fréquences étalon et les signaux horaires pour permettre la transmission de signaux horaires.

RECOMMANDATION 376-1

SUPPRESSION DES BROUILLAGES D'ORIGINE EXTÉRIEURE CAUSÉS AUX ÉMISSIONS DU SERVICE DE FRÉQUENCES ÉTALON DANS LES BANDES ATTRIBUÉES A CE SERVICE

(Question 1/7)

(1959-1963-1966)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) l'importance et l'utilisation croissante des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes attribuées à ce service;
- b) que les brouillages réduisent très fortement l'efficacité du service de fréquences étalon et de signaux horaires;
- c) que, malgré les efforts déployés par les administrations et l'IFRB pour libérer les bandes attribuées au service de fréquences étalon, il y subsiste quelques usagers enregistrés ainsi que de nombreuses émissions non notifiées, et que des brouillages continuent d'être causés au service de fréquences étalon,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que les administrations et l'IFRB poursuivent leurs efforts pour libérer les bandes attribuées au service de fréquences étalon afin d'éviter des brouillages d'origine extérieure;
2. que, dans le territoire placé sous sa juridiction, chaque administration fasse tout son possible pour empêcher tous les usagers du spectre radioélectrique d'exploiter d'autres stations, dans les bandes de fréquences étalon, qui seraient susceptibles de provoquer des brouillages nuisibles pour le service de fréquences étalon;
3. que les stations nationales de contrôle recherchent systématiquement les stations extérieures qui provoquent des brouillages dans les bandes de fréquences étalon et fassent tout leur possible pour identifier chaque station brouilleuse, en ayant recours, au besoin, à une coopération internationale;

4. que, dans chaque cas de brouillage d'origine extérieure, les usagers des émissions de fréquences étalon demandent au service de contrôle de leur propre pays d'identifier la station perturbatrice;
5. que, dans les cas où le service des fréquences étalon subit des brouillages d'origine extérieure, les administrations appliquent les dispositions des Articles 18, 19, 21 et 22 du Règlement des radiocommunications, et, au besoin, adressent à l'IFRB une copie de la correspondance échangée à ce sujet;
6. que, si des brouillages sont observés, même si leur origine est incertaine, les représentants des administrations auprès de la Commission d'études 7 échangent des renseignements provenant des usagers des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires, ainsi que du service de contrôle, afin de permettre ultérieurement l'identification de ces brouilleurs.

RECOMMANDATION 457-1

UTILISATION DE LA DATE JULIENNE MODIFIÉE PAR LES SERVICES DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que, pour identifier les dates, il est souhaitable que l'on dispose d'un comptage décimal des jours associé à l'utilisation, en radioélectricité, de signaux horaires et de codes horaires;
- b) qu'un comptage décimal des jours rapporté au temps universel, la «date julienne» (DJ), est établi depuis longtemps pour la fixation de la date en astronomie, en chronologie et dans les sciences connexes;
- c) que l'on a besoin d'un comptage décimal des jours dans lequel le début d'un jour soit fixé à 00h00 et non à 12h00, comme c'est le cas pour la date julienne;
- d) que l'on a besoin d'un comptage décimal des jours, notamment pour l'associer aux échelles de temps UTC et TAI;
- e) qu'il faut éviter une prolifération de systèmes différents d'indication de la date;
- f) qu'un simple passage de la date julienne mentionnée ci-dessus à un système moderne de comptage décimal des jours serait avantageux;
- g) qu'il convient de maintenir sans discontinuité le système de la «date julienne» dans lequel le début du jour est fixé à midi du méridien de Greenwich;
- h) que l'on utilise d'ores et déjà une «date julienne modifiée» (DJM) qui satisfait aux conditions susmentionnées,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. qu'on utilise, chaque fois que cela est nécessaire, pour les besoins modernes en matière de garde du temps et d'indication de la date, un comptage décimal des jours dans lequel le jour civil serait compté à partir de 00h00 TAI, UTC ou UT et serait spécifié au moyen de 5 chiffres décimaux;
2. que cette «date julienne modifiée» (DJM) soit égale à la date julienne diminuée de 2 400 000,5 et, par conséquent, aurait son origine à 00h00 UT le 17 novembre 1858 dans le cas de l'échelle de temps UT.

RECOMMANDATION 458-1

COMPARAISONS INTERNATIONALES D'ÉCHELLES DE TEMPS ATOMIQUE

(Question 1/7)

(1970-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) la nécessité de comparer entre elles les échelles de temps atomique locales indépendantes conservées par les divers laboratoires et observatoires;
- b) la nécessité de communiquer des données claires et précises, et dans un délai minimal, afin de faciliter les travaux du Bureau international de l'heure (BIH) pour la formation du Temps atomique international,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que, lorsqu'un laboratoire ou observatoire «i» conserve à la fois un temps atomique local indépendant et une approximation du temps universel coordonné, désignés ici par TA(i) et UTC(i), le laboratoire ou l'observatoire publie l'expression numérique de la différence TA(i) – UTC(i) pour chaque période de validité;
2. que des repères de temps présentant un écart négligeable par rapport à UTC(i) soient immédiatement accessibles;
3. que les comparaisons de temps publiées soient rapportées à UTC(i);
4. que les comparaisons de phase publiées soient rapportées à UTC(i);
5. que les publications d'instantanés d'émission de signaux horaires, émis conformément au système UTC, soient rapportées à UTC(i):
 - 5.1 dans le cas d'une émission de signaux horaires directement engendrés par le laboratoire ou l'observatoire «i», le retard mesuré entre les signaux horaires et le UTC(i) soit publié;
 - 5.2 dans le cas d'une émission de signaux horaires engendrés par une horloge à la station émettrice, et mesurés au laboratoire ou à l'observatoire «i», on indique explicitement si les temps publiés par rapport à UTC(i) se rapportent à l'émission ou à la réception, et quelles sont les corrections qui ont été appliquées ou qui doivent l'être pour tenir compte du temps de propagation dû au trajet radioélectrique et au récepteur;
6. que tous les laboratoires ou observatoires ne se conformant pas au système UTC, mais désirant prendre part aux comparaisons internationales et à l'élaboration du Temps atomique international, publient des détails compatibles, dans la mesure du possible, avec les principes énoncés dans les § 1 à 5.

RECOMMANDATION 460-4

ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1970-1974-1978-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (Genève, 1979) a attribué aux services des fréquences étalon et des signaux horaires les fréquences suivantes: 20 kHz $\pm$ 0,05 kHz, 2,5 MHz $\pm$ 5 kHz (2,5 MHz $\pm$ 2 kHz dans la Région 1), 5 MHz $\pm$ 5 kHz, 10 MHz $\pm$ 5 kHz, 15 MHz $\pm$ 10 kHz, 20 MHz $\pm$ 10 kHz et 25 MHz $\pm$ 10 kHz;
- b) que des fréquences étalon et des signaux horaires supplémentaires sont émis dans d'autres bandes de fréquences;
- c) qu'il y a lieu de tenir compte des dispositions de l'Article 33 du Règlement des radiocommunications;
- d) qu'une collaboration étroite de la Commission d'études 7 avec l'Organisation maritime internationale (OMI), l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) et le Bureau international de l'heure (BIH), ainsi qu'avec les membres intéressés du Conseil international des unions scientifiques (CIUS) continue d'être nécessaire;
- e) qu'il est souhaitable de maintenir une coordination mondiale des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires;
- f) qu'il est nécessaire de diffuser des fréquences étalon et des signaux horaires, conformément à la définition de la seconde, telle qu'elle a été donnée par la 13^e Conférence générale des poids et mesures (1967);
- g) que le besoin de disposer immédiatement du temps universel (UT) à une précision d'un dixième de seconde continue de se faire sentir,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que toutes les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires soient aussi étroitement que possible conformes au temps universel coordonné (UTC) (voir l'Annexe I); que les signaux horaires ne s'écartent pas de l'UTC de plus d'une milliseconde; que les fréquences étalon ne dévient pas de plus de 1×10^{-10} ; que les signaux horaires émis par chaque station comportent une relation connue avec la phase de l'onde porteuse;
2. que toutes les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires, y compris les autres émissions de signaux horaires destinées à des applications scientifiques (à l'exception des émissions éventuellement destinées à des systèmes spéciaux), contiennent des informations sur la différence entre UT1 et UTC (voir les Annexes I et II);

3. que la présente Recommandation soit transmise par le Directeur du CCIR à toutes les administrations des Membres de l'UIT, ainsi qu'à l'OMI, à l'OACI, à la CGPM, au BIH, à l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), à l'Union radioscientifique internationale (URSI) et à l'Union astronomique internationale (UAI);
4. que les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires satisfassent aux dispositions des § 1 et 2 ci-dessus à partir du 1^{er} janvier 1975.

ANNEXE I

ÉCHELLES DE TEMPS

A. Temps universel (UT)

Le temps universel (UT) est la désignation générale d'échelles de temps fondées sur la rotation de la Terre.

Dans les applications où l'on ne peut tolérer des erreurs de quelques centièmes de seconde, il est nécessaire de spécifier la forme de UT qui doit être utilisée:

- UT0 est le temps solaire moyen du méridien origine, qu'on obtient par l'observation astronomique directe;
- UT1 est UT0 corrigé des effets des petits mouvements de la Terre par rapport à son axe de rotation (variation polaire);
- UT2 est UT1 corrigé des effets d'une petite fluctuation saisonnière dans la vitesse de rotation de la Terre;
- UT1 est le temps utilisé dans le présent document, parce qu'il correspond directement à la position angulaire de la Terre autour de son axe de rotation diurne. (TMG ou GMT peuvent être considérés comme équivalents généraux de UT.)

Les définitions précises des termes ci-dessus et les concepts invoqués sont disponibles dans le glossaire de la publication annuelle «*The Astronomical Almanac*» (US Govt. Printing Office, Washington DC et H.M. Stationery Office, Londres).

B. Temps atomique international (TAI)

L'échelle de temps atomique (TAI) qui sert de référence internationale sur la base de la seconde (SI) au niveau de la mer, est établie par le Bureau international de l'heure à partir de données d'horloge fournies par des établissements coopérants. Elle se présente sous la forme d'une échelle continue, exprimée en jours, heures, minutes et secondes, à partir de son origine, le 1^{er} janvier 1958; elle a été adoptée par la CGPM en 1971.

C. Temps universel coordonné (UTC)

UTC est l'échelle de temps maintenue par le BIH, qui constitue la base d'une diffusion coordonnée des fréquences étalon et des signaux horaires. Il a la même marche que le temps atomique international (TAI), mais il en diffère d'un nombre entier de secondes.

L'échelle de UTC s'ajuste par insertion ou omission de secondes (secondes intercalaires positives ou négatives) dans la mesure nécessaire pour assurer sa concordance approximative avec l'échelle de UT1.

D. DUT1

On représente par DUT1 la valeur de la différence prévue entre les échelles UT1 et UTC telles qu'elles sont diffusées avec les signaux horaires. On a donc: $DUT1 \approx UT1 - UTC$. DUT1 peut être considéré comme une correction qu'il convient d'ajouter à l'échelle UTC pour obtenir une meilleure approximation de UT1.

Les valeurs de DUT1 sont données par le Bureau international de l'heure sous forme de multiples entiers de 0,1 s.

Les règles d'exploitation suivantes sont appliquées:

1. Tolérances

- 1.1 La valeur de DUT1 ne devrait pas dépasser 0,8 s,
- 1.2 l'écart de UTC par rapport à UT1 ne devrait pas dépasser $\pm 0,9$ s (voir la Note),
- 1.3 l'écart de (UTC plus DUT1) par rapport à UT1 ne devrait pas dépasser $\pm 0,1$ s.

Note. — La différence entre la valeur maximale de DUT1 et l'écart maximal de UTC par rapport à UT1 représente l'écart admissible de (UTC + DUT1) par rapport à UT1; elle constitue pour le BIH une protection contre des variations imprévisibles de la vitesse de rotation de la Terre.

2. Secondes intercalaires

2.1 Une seconde intercalaire positive ou négative devrait être la dernière seconde d'un mois de UTC, de préférence en premier lieu à la fin de décembre et de juin et en second lieu à la fin de mars et de septembre.

2.2 Une seconde intercalaire positive commence à 23h 59m 60s et se termine à 0h 0m 0s du premier jour du mois suivant. Dans le cas d'une seconde intercalaire négative, 23h 59m 58s sera suivi, une seconde plus tard, par 0h 0m 0s du premier jour du mois suivant (voir Annexe III).

2.3 Le BIH devrait décider de l'introduction d'une seconde intercalaire et annoncer sa date; une telle annonce devrait être faite au moins 8 semaines à l'avance.

3. Valeur de DUT1

3.1 Le BIH est prié de fixer la valeur de DUT1 ainsi que sa date d'introduction et de diffuser ces renseignements un mois à l'avance. Dans des cas exceptionnels de changement brusque dans la vitesse de rotation de la Terre, le BIH peut publier l'annonce d'une correction au plus tard deux semaines avant sa date d'introduction.

3.2 Les administrations et les organisations sont priées d'utiliser la valeur DUT1 du BIH dans les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires, et de la faire connaître aussi largement que possible par l'intermédiaire de publications périodiques, bulletins, etc.

3.3 Quand DUT1 est diffusé par code, le code (sous réserve du § 3.5 ci-après) doit être conforme aux principes suivants:

- la valeur absolue de DUT1 est fixée par le nombre de repères de seconde marqués et son signe est fixé par la position de ces repères par rapport au repère de minute. L'absence de repère de seconde marqué signifie que $DUT1 = 0$;
- l'information codée doit être émise après chaque minute identifiée si cela est compatible avec le format de l'émission. Dans le cas contraire, l'information codée doit être émise (minimum absolu) après chacune des cinq premières minutes identifiées de chaque heure.

Les détails sur le code sont donnés dans l'Annexe II.

3.4 DUT1 peut encore être indiqué à la voix ou en code morse.

3.5 L'annonce de DUT1 peut être donnée dans un code différent, si elle est essentiellement destinée à un décodeur automatique et utilisée par un tel appareil, mais elle doit de toute façon être émise après chaque minute identifiée si cela est compatible avec le format de l'émission. Dans le cas contraire, l'information codée doit être émise (minimum absolu) après chacune des cinq premières minutes identifiées de chaque heure.

3.6 Toute autre information, éventuellement émise dans la partie de l'émission du signal horaire mentionnée aux § 3.3 et 3.5 et relative à l'information codée sur DUT1, doit avoir un format suffisamment différent de manière à n'être pas confondue avec DUT1.

3.7 De plus, la différence $UT1 - UTC$ peut être fournie au même degré de précision ou à une précision supérieure par d'autres procédés, par exemple en code morse ou à la voix, par messages associés aux bulletins maritimes ou aux prévisions météorologiques, etc.; les annonces des secondes intercalaires à venir peuvent aussi être faites par ces procédés.

3.8 Le BIH est prié de continuer à publier après coup les valeurs définitives des différences $UT1 - UTC$ et $UT2 - UTC$.

ANNEXE II

CODE POUR LA TRANSMISSION DE DUT1

Une valeur positive de DUT1 sera indiquée par le marquage d'un nombre (n) de repères de seconde consécutifs, après le repère de minute, à partir du repère de seconde un jusqu'au repère de seconde n inclus, n étant un nombre entier au plus égal à 8.

$$DUT1 = (n \times 0,1) \text{ s}$$

Une valeur négative de DUT1 sera indiquée par le marquage d'un nombre (m) de repères de seconde consécutifs, après le repère de minute, à partir du repère de seconde neuf jusqu'au repère de seconde $(8 + m)$ inclus, m étant un nombre entier au plus égal à 8.

$$DUT1 = -(m \times 0,1) \text{ s}$$

Une valeur nulle de DUT1 sera indiquée par l'absence de repère de seconde marqué.

Les repères de seconde appropriés seront marqués, par exemple, par l'allongement, le doublement, la division en deux, ou la modulation des repères de seconde normaux.

Exemples :

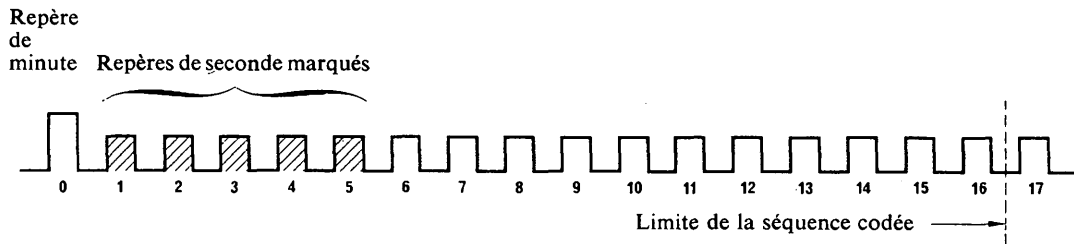


FIGURE 1

$$DUT1 = +0,5 \text{ s}$$

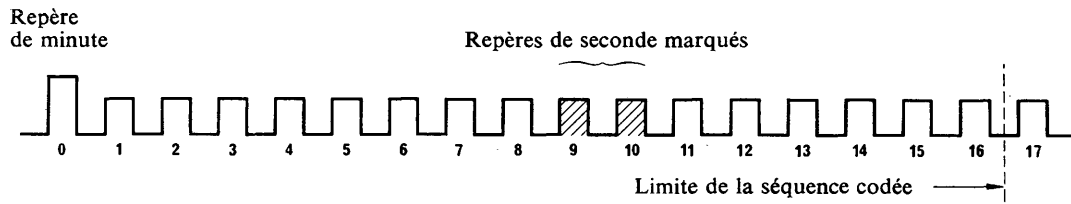


FIGURE 2

$$DUT1 = -0,2 \text{ s}$$

ANNEXE III

ATTRIBUTION DE DATES A DES ÉVÉNEMENTS AU VOISINAGE D'UNE SECONDE INTERCALAIRE

L'attribution de dates aux événements qui se produisent au voisinage d'une seconde intercalaire se fera comme l'indiquent les exemples ci-dessous :

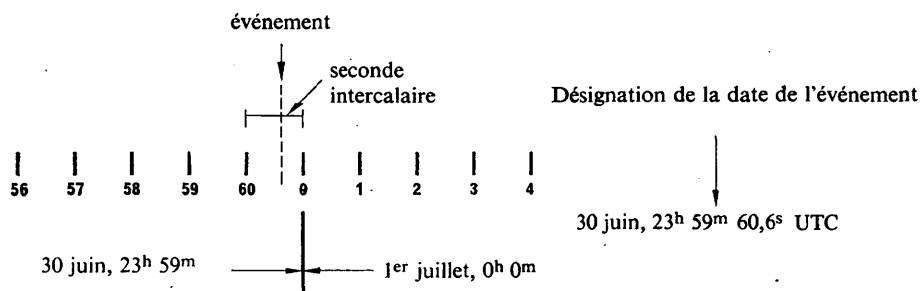


FIGURE 3 – Seconde intercalaire positive

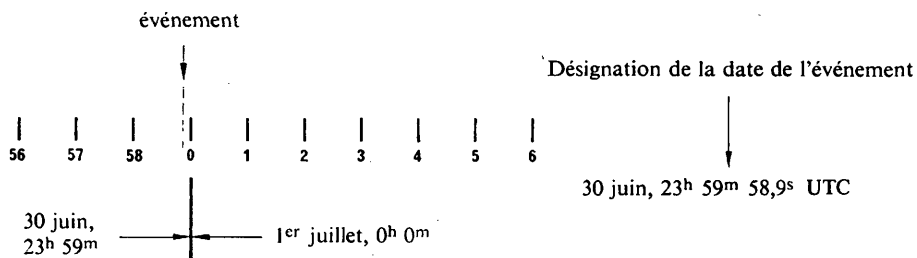


FIGURE 4 – Seconde intercalaire négative

RECOMMANDATION 485-1

UTILISATION D'ÉCHELLES DE TEMPS DANS LES SERVICES DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1974-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que l'échelle de temps atomique international a été définie par la Conférence générale des poids et mesures en 1971;
- b) que, conformément à la Recommandation 460, l'échelle de temps UTC est couramment acceptée depuis 1972;
- c) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (Genève, 1979) a décidé que l'UTC doit être utilisé dans les activités internationales relevant des radiocommunications;
- d) que l'UTC et le TAI sont étroitement liés et ne diffèrent que d'un nombre entier connu de secondes;
- e) que les laboratoires du service des signaux horaires devraient, conformément à la Recommandation 458, rapporter les indications de dates à leur propre échelle UTC(i),

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

que les données relatives au temps soient publiées chaque fois que cela est possible par référence au temps universel coordonné (UTC) ou au temps atomique international (TAI).

RECOMMANDATION 486-1 *

RÉFÉRENCE A L'ÉCHELLE DE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL POUR LES GÉNÉRATEURS ET LES ÉMISSIONS DE FRÉQUENCE COMMANDÉS AVEC PRÉCISION

(Question 3/7)

(1974-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que, pour l'utilisateur, les données concernant l'erreur d'une émission de fréquences étalon et de signaux horaires sont d'une grande importance;
- b) que l'échelle de temps atomique international (TAI) est d'une très grande importance en tant que référence pour les comparaisons de temps et de fréquence;
- c) que, bien souvent, il est techniquement possible de régler le rayonnement d'une fréquence étalon d'une manière telle que les variations de phase par rapport au TAI (ou au temps universel coordonné UTC) restent comprises dans les limites d'une tolérance étroite $\pm \Delta t$, faible par rapport à la période de la fréquence porteuse;
- d) que la fréquence TAI et la fréquence UTC sont identiques;
- e) qu'il existe des appareils capables de recevoir plusieurs émissions presque synchrones, ce qui permet de passer de l'une à l'autre en cas d'interruption d'un émetteur;
- f) qu'il est nécessaire pour les systèmes électroniques de disposer de fréquences de référence universellement acceptées;
- g) qu'il est très nécessaire de disposer de fréquences de plus en plus stables, particulièrement en ce qui concerne les transmissions de données;
- h) que de nombreux nouveaux systèmes électroniques commandés avec précision (par exemple ceux qui sont commandés par des générateurs de fréquence atomiques) entrent maintenant en service;
- j) qu'il est plus facile de coordonner ces systèmes s'ils utilisent une fréquence de référence commune,

* Le Directeur du CCIR est prié de porter la présente Recommandation à l'attention du CCITT.

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que l'on utilise une fréquence liée à l'UTC comme référence pour les émissions de fréquences étalon;
2. que l'on exprime les données concernant la précision de la fréquence étalon par référence à la fréquence liée à l'UTC sous forme de la moyenne de la différence relative de fréquence prise sur 10 jours au moins;
3. que l'intervalle de temps $\pm \Delta t$ dans lequel la phase de fréquence étalon peut varier par rapport au temps UTC soit spécifié pour chaque émission à ondes kilométriques ou myriamétriques, et que les valeurs de Δt soient publiées par les administrations responsables des services de fréquences étalon et de signaux horaires;
4. que la fréquence UTC soit également utilisée comme la référence ultime pour les autres systèmes électroniques.

RECOMMANDATION 535-1 *

EMPLOI DU TERME UTC

(Question 1/7)

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que la Recommandation 460 recommande que les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires soient conformes au temps universel coordonné (UTC);
- b) que l'UTC est disponible depuis 1972 comme référence de temps universelle;
- c) que la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a recommandé en 1975 l'utilisation de l'UTC comme base pour le temps civil;
- d) que d'autres organismes scientifiques, en particulier l'Union astronomique internationale (UAI) et l'Union radioscopique internationale (URSI), ont recommandé l'emploi généralisé de l'UTC;
- e) que l'UTC permet de déterminer l'heure des événements avec une incertitude de 1 μ s;
- f) que selon la Recommandation 536 et la recommandation de la Conférence générale des poids et mesures, l'appellation UTC doit être utilisée dans toutes les langues;
- g) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (Genève, 1979) a décidé que l'UTC doit être utilisé dans les activités internationales relevant des radiocommunications,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

que l'UTC soit appliqué à la désignation de l'heure dans toutes les autres activités internationales relevant des télécommunications et dans tous les documents officiels de l'Union internationale des télécommunications.

RECOMMANDATION 536

NOTATIONS A UTILISER POUR DÉSIGNER LES ÉCHELLES DE TEMPS

(Question 1/7)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il convient, pour désigner les échelles de temps, d'utiliser des notations indépendantes de la langue;
- b) que la XIV^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), qui s'est tenue en octobre 1971, a défini le Temps atomique international avec la désignation TAI;

* Le Directeur du CCIR est prié de porter la présente Recommandation à l'attention du Groupe mixte consultatif de l'Institut de navigation (JAG/ION), de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), de l'Organisation maritime internationale (OMI), de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et de l'Union astronomique internationale (UAI).

c) que la XV^e Conférence générale des poids et mesures, qui s'est tenue en mai 1975, a recommandé l'emploi du Temps universel coordonné avec la désignation UTC,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que, pour toutes les catégories de temps atomique, on utilise dans toutes les langues les notations ci-après, qui sont cohérentes avec TAI:

TAI: Temps atomique international élaboré par le BIH;

TA: temps atomique; désignation générale d'une variable de temps qui peut être réalisée à partir d'une transition atomique ou moléculaire;

TA(i): échelle de temps atomique, réalisée par l'institut «i»;

2. que, pour toutes les catégories de Temps universel, on utilise dans toutes les langues les notations ci-après, qui sont cohérentes avec UTC:

UT: Temps universel;

UTC: Temps universel coordonné; cette échelle de temps est élaborée par le BIH, selon la Recommandation 460;

UTC(i): échelle de temps réalisée par l'institut «i» et maintenue en concordance étroite avec UTC;

DUT1: différence prévue UT1 – UTC, diffusée par les signaux horaires.

Note. — Le Directeur du CCIR est prié de porter cette Recommandation à la connaissance de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), de l'Organisation maritime internationale (OMI), de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) ainsi que de l'Union radio-scientifique internationale (URSI), de l'Union astronomique internationale (UAI), de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), de l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA), du Bureau international de l'heure (BIH), de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et de l'Association Internationale des Instituts de Navigation (IAIN).

ANNEXE I

1. S'il y a risque de confusion, on pourra utiliser la notation UTC (BIH) au lieu de UTC.

2. Les diverses formes de UT sont énumérées dans l'Annexe I à la Recommandation 460.

3. Sauf pour TA, qui est fondé sur un principe et non sur une échelle de temps particulière, les notations peuvent servir également à caractériser des instants et des différences entre échelles de temps.

Exemples:

1) 1975 janvier 1, 0h UTC

2) TAI – UTC = 14 s, 1975 juillet 1, 0h UTC

3) UTC(i) – UTC = 1 μ s, 1976 février 24, 0h UTC

4. TAI et UTC sont évalués à posteriori; on peut les obtenir uniquement par voie de corrections (publiées par le BIH) appliquées à des échelles de temps existantes (réalisées), telles que TA(i) ou UTC(i), y compris par extrapolation.

5. Aux termes de la Recommandation 458, UTC(i) doit être une échelle de temps réalisée.

SECTION 7C: SYSTÈMES POUR LA DISSÉMINATION ET LES COMPARAISONS

Recommandations et Rapports

RAPPORT 267-6

FRÉQUENCES ÉTALON ET SIGNAUX HORAIRES

**Caractéristiques des émissions du service de fréquences étalon et de signaux horaires
dans les bandes attribuées ainsi que les caractéristiques des stations assurant un service régulier
sur des fréquences stabilisées en dehors de ces bandes**

(Question 1/7)

(1956-1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

Les caractéristiques des stations énumérées dans les tableaux ci-après sont valables depuis le 1^{er} novembre 1985. Pour tous renseignements concernant les changements qui auraient pu intervenir, on pourra consulter le Rapport annuel du Bureau international de l'heure (BIH) ou s'adresser directement à l'administration responsable de chaque service, dont le nom figure dans l'Annexe I.

TABLEAU I — Caractéristiques des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes attribuées, valables à partir du 1^{er} novembre 1985

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ⁽¹⁾ ($\pm 10^{-11} \times$)	Méthode d'indication de DUT1
Indicatif	Emplacement	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (MHz)	Modulation (Hz)	Durée de transmission des signaux horaires (min)	Durée de la modulation audible (min)		
ATA	New Delhi, Inde	28° 34' N 77° 19' E	Doublet horizontal replié	8 en crête	3	7	24 ⁽²⁾	5, 10, 15	1, 1000	continue	4/15	± 10	
BPM ⁽³⁾	Pucheng, Chine	35° 00' N 109° 31' E	Equidirectif	10-20	2	7	24 ⁽⁴⁾	2,5, 5, 10, 15	1, 1000	20/30 (UTC) 4/30 (UT1)	néant	± 10	Emission directe du signal horaire UT1
HLA	Taedok Science town, République de Corée	36° 23' N 127° 22' E	Vertical (antenne unipolaire conique)	2	1	5	7	5	1	continue	néant	± 10	Code du CCIR par impulsion double
IAM ⁽⁵⁾	Rome, Italie	41° 47' N 12° 27' E	Vertical $\lambda/4$	1	1	6	2	5	1	continue	néant	± 10	Code du CCIR par impulsion double
IBF ⁽⁵⁾	Turin, Italie	45° 02' N 07° 46' E	Vertical $\lambda/4$	5	1	7	2¼	5	1	continue	néant	± 10	Code du CCIR par impulsion double
JJY ⁽⁵⁾	Sanwa, Sashima, Ibaraki, Japon	36° 11' N 139° 51' E	⁽⁶⁾	2	5	7	24 ⁽⁷⁾	2,5, 5, 8, 10, 15	1 ⁽⁸⁾ 1000 ⁽⁹⁾	continue	30/60	± 10	Code du CCIR par prolongement
LOL ⁽⁵⁾	Buenos Aires, Argentine	34° 37' S 58° 21' W	Doublet horizontal replié à 3 fils	2	3	7	5	5, 10, 15	1, 440, 1000	continue	3/5	± 20	Code du CCIR par prolongement
MSF ⁽⁵⁾	Rugby, Royaume-Uni	52° 22' N 01° 11' W	Doublets quadratiques horizontaux (2,5 MHz: brin vertical)	5	3	7	24	2,5, 5, 10	1	5/10	néant	± 2	Code du CCIR par impulsion double

TABLEAU I (suite)

Station			Type d'antenne	Puis- sance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émis- sions simul- tanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences ($\gamma_1 - 10^{-6} \times$) et des intervalles de temps	Méthode d'indication de DUT1
Indicatif	Emplacement	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (MHz)	Modulation (Hz)	Durée de transmis- sion des signaux horaires (min)	Durée de la modulation audible (min)		
OMA (°)	Prague, R.S. Tchécoslo- vaque	50° 07' N 14° 35' E	T	1	1	7	24	2,5	1, 1000 (10)	15/30	4/15	± 1000	
RCH (°)	Tachkent, URSS	41° 19' N 69° 15' E	Doublet horizontal	1	2	7	21	2,5, 5, 10	1, 10	40/60	néant	± 50	Code du CCIR par impulsion double. Information supplémentaire sur dUT1 (11)
RID (°)	Irkoutsk, URSS	52° 26' N 104° 02' E	Doublet horizontal	1 1 1	3	7	24	5,004 10,004 15,004	1, 10	40/60	néant	± 50	Code du CCIR par impulsion double. Information supplémentaire sur dUT1 (11)
RIM (°)	Tachkent, URSS	41° 19' N 69° 15' E	Doublet horizontal	1	1	7	20½	5, 10	1, 10	39/60	néant	± 50	Code du CCIR par impulsion double. Information supplémentaire sur dUT1
RTA (°)	Novosibirsk, URSS	55° 04' N 82° 58' E	Doublet horizontal	5	1	7	20½	10, 15	1, 10	40/60	néant	± 50	Code du CCIR par impulsion double. Information supplémentaire sur dUT1 (11)
RWM (°)	Moscou, URSS	55° 48' N 38° 18' E	Doublet horizontal	5 5 8	3	7	24	4,996 9,996 14,996	1, 10	40/60	néant	± 50	Code du CCIR par impulsion double. Information supplémentaire sur dUT1 (11)

TABLEAU I (suite)

Station			Type d'antenne	Puis- sance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émis- sions simul- tanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\pm 10^{-12}$) ⁽¹⁾	Méthode d'indication de DUT1
Indicatif	Emplacement	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (MHz)	Modulation (Hz)	Durée de transmis- sion des signaux horaires (min)	Durée de la modulation audible (min)		
WWV ⁽⁵⁾	Fort Collins, Colorado, Etats-Unis d'Amérique	40° 41' N 105° 02' W	Doublets verticaux $\lambda/2$	2,5-10	5	7	24	2,5, 5, 10, 15, 20 ⁽¹²⁾	1, 440, 500, 600	continue ⁽¹³⁾	continue ⁽¹⁴⁾	± 10	Code du CCIR par impulsion double. Information supplémentaire sur les corrections UT1
WWVH ⁽⁶⁾	Kekaha, Kauai, Hawaii, Etats-Unis d'Amérique	21° 59' N 159° 46' W	Rideaux de doublets verticaux $\lambda/2$	2,5-10	4	7	24	2,5, 5, 10, 15 ⁽¹²⁾	1, 440, 500, 600	continue ⁽¹³⁾	continue ⁽¹⁴⁾	± 10	Code du CCIR par impulsion double. Information supplémentaire sur les corrections UT1
ZLFS	Lower Hutt, Nouvelle- Zélande	41° 14' S 174° 55' E		0,3	1	1	3	2,5	néant	néant	néant	± 100	
ZUO ⁽⁵⁾	Olifantsfon- tein, République sudafricaine	24° 58' S 28° 14' E	Antenne unipolaire verticale	4	1	7	24 ⁽¹⁵⁾	2,5, 5	1	continue	néant	± 10	Code du CCIR par prolongement

Notes relatives au Tableau I:

L'horaire des émissions journalières et l'horaire des modulations pour chaque heure sont donnés, le cas échéant, par les Fig. 1 et 2 qui sont complétées par les notes suivantes:

- (¹) Cette valeur est applicable à l'émetteur; pour assurer la valeur d'incertitude indiquée au point de réception, il pourrait se révéler nécessaire d'observer la phase et la fréquence reçues durant une période suffisamment longue pour éliminer les effets dus au bruit et autres phénomènes aléatoires.
- (²) 5 MHz: 1800-0900 h UTC; 10 MHz: 24 heures; 15 MHz: 0900-1800 h UTC.
- (³) Indicatif d'appel en Morse et en langage clair.
- (⁴) 15 MHz: 0000 à 1400 h UTC; 5 MHz: de 1400 à 2400 h UTC; 10 MHz: continue.
- (⁵) Ces stations ont fait savoir qu'elles suivent le système UTC, spécifié dans la Recommandation 460. Depuis le 1^{er} janvier 1972, le décalage de fréquence a été supprimé et les signaux horaires restent dans la limite d'environ 0,8 s de UT1, grâce à des bonds de 1 s, appliqués de temps à autre, conformément aux indications du BIH.
- (⁶) Vertical $\lambda/4$ pour 2,5 MHz; dipôle horizontal $\lambda/2$ pour 5 MHz et 8 MHz et dipôles verticaux $\lambda/2$ pour 10 et 15 MHz.
- (⁷) Avec interruption entre les minutes 35 et 39 de chaque heure.
- (⁸) Une impulsion se compose de 8 cycles de modulation à 1600 Hz. La première impulsion de chaque minute est précédée d'une modulation à 600 Hz pendant 655 ms.
- (⁹) Modulation à 1000 Hz entre les minutes 0 et 5, 10 et 15, 20 et 25, 30 et 35, 40 et 45, 50 et 55; modulation supprimée 40 ms avant et après chaque impulsion de seconde.
- (¹⁰) Dans la période de 1800 h à 0600 h UTC, la modulation à fréquence acoustique est remplacée par des signaux horaires.
- (¹¹) L'information supplémentaire sur la valeur de la différence UT1 – UTC est transmise pour le code dUT1. Elle donne avec plus de précision la valeur de la différence de UT1 – UTC, jusqu'à des multiples de 0,02 s. La valeur totale de la correction est DUT1 + dUT1. Les valeurs positives dUT1 sont transmises par marquage de p impulsions de seconde, dans l'intervalle compris entre la 21^e et la 24^e seconde de la minute, d'où: $dUT1 = + 0,02 \text{ s} \times p$. Les valeurs négatives de dUT1 sont transmises par marquage de q impulsions de seconde, dans l'intervalle compris entre la 31^e et la 34^e seconde de la minute, d'où: $dUT1 = -0,02 \text{ s} \times q$.
- (¹²) Depuis le 1^{er} février 1977, les émissions de WWV sur 25 MHz et celles de WWVH sur 20 MHz ont cessé, mais elles pourraient être reprises à une date ultérieure.
- (¹³) En plus des autres signaux horaires et annonces de l'heure, un code de temps IRIG-H modifié est produit à raison d'une impulsion par seconde; ce code est rayonné en permanence sur une sous-porteuse de 100 Hz, pour toutes les fréquences. Une trame de code complète occupe 1 min. La sous-porteuse de 100 Hz est synchrone avec les impulsions du code, ce qui permet d'obtenir une résolution de 10 ms. Le code contient les valeurs de DUT1 ainsi que l'information de temps UTC en minutes, heures et jours de l'année.
- (¹⁴) Sauf pour la durée des annonces parlées et pendant la période de demi-silence de 5 min., chaque heure.
- (¹⁵) 2,5 MHz: 1800 h à 0400 h UTC; 5 MHz: continue.

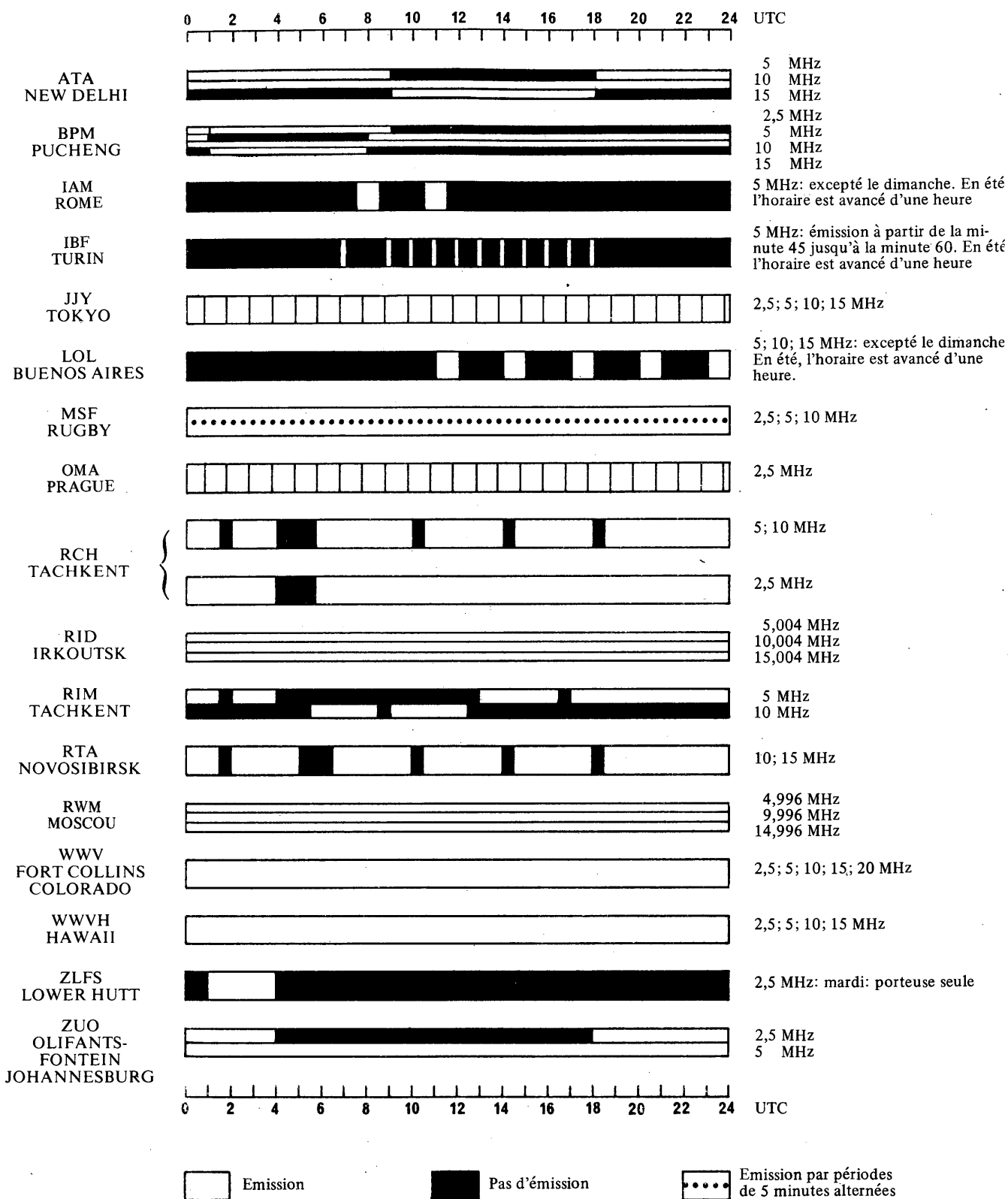
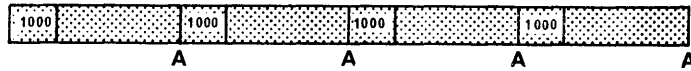


FIGURE 1 – Horaire journalier des émissions

Heure 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 Minutes

Forme des signaux de seconde et de minute : code morse et annonces parlées (A).

ATA



Impulsion de 5 cycles de modulation à 1000 Hz, prolongée jusqu'à 100 ms au début de la minute. Indicatif et temps (UTC) en morse.

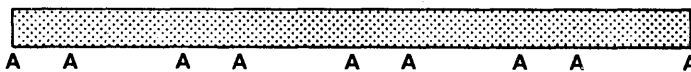
BPM



(1) Impulsion de 10 cycles de 1000 Hz (signal horaire UTC), la première impulsion de chaque minute est une impulsion de 300 ms de modulation à 1000 Hz. Afin d'éviter les brouillages mutuels, les impulsions de seconde du signal horaire UTC de BPM précèdent le signal horaire UTC de BIH de 20 ms.

(2) Impulsion de 100 ms à 1000 Hz du signal horaire UT1, la première impulsion de chaque minute est une impulsion de 300 ms de modulation à 1000 Hz.

IAM



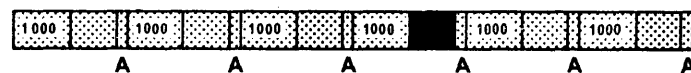
Impulsion de 5 cycles de modulation à 1000 Hz : au début de la minute impulsion de 20 cycles de modulation à 1000 Hz. Indicatif de temps (UTC) en morse et identification par annonce parlée.

IBF



Impulsion de 5 cycles de modulation à 1000 Hz, répétée sept fois au début de la minute. Indicatif et temps (UTC) en code morse ; identification par annonce parlée au début et fin de chaque émission.

JJY



Impulsion de 8 cycles de modulation à 1600 Hz, l'impulsion de minute est précédée par une tonalité de 600 Hz d'une durée de 655 ms. Indicatif et temps (JST) en code morse et par annonce parlée. Avertissements sur la propagation radioélectrique donnés au moyen d'un code de lettres : N (normal), U (instable) et W (perturbé). DUT1 est indiqué par le nombre et la position des impulsions de seconde prolongées (durée 45 ms) au lieu des 5 ms de l'impulsion de seconde normale.

LOL



Impulsion de 5 cycles de modulation à 1000 Hz, la 59^e impulsion étant supprimée. Indicatif en morse ; identification et heure (UTC - 3 heures) par annonce parlée.

MSF



Impulsion de 5 cycles de modulation à 1000 Hz, impulsion de 100 ms au début de la minute. Indicatif en morse et par annonce parlée.

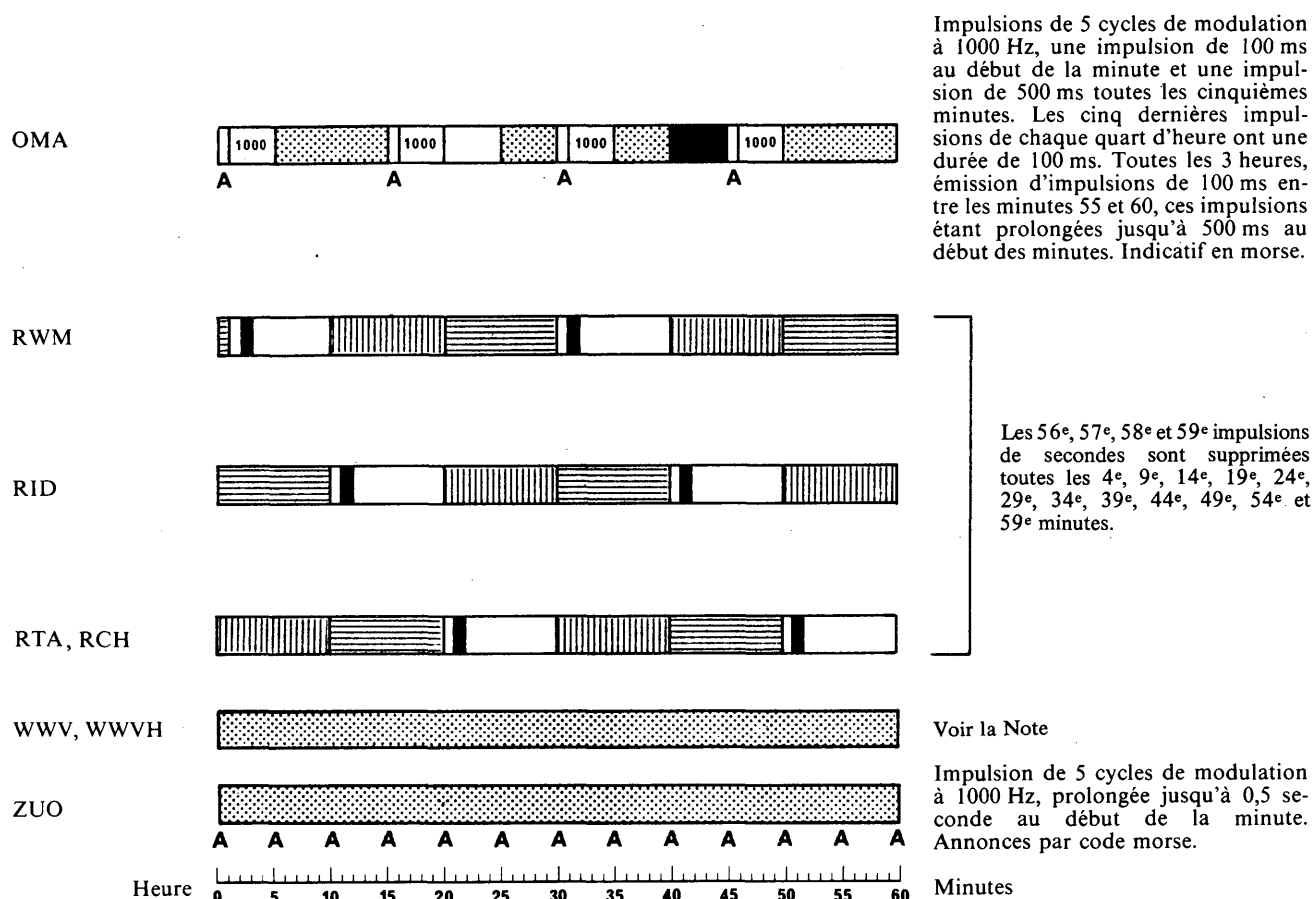


FIGURE 2 — Programme horaire des modulations

Note. — Impulsions de cinq cycles de modulation à 1000 Hz (WWV) ou de six cycles de modulation à 1200 Hz (WWVH), prolongées à 0,8 s au début de chaque minute. Une impulsion de 0,8 s à 1500 Hz marque le début de chaque heure pour les deux stations. Chaque minute, les vingt-neuvième et cinquante-neuvième impulsions sont supprimées. Chaque minute est précédée d'annonces parlées. Chaque minute, 45 secondes de signaux acoustiques, alternant entre 500 et 600 Hz, sauf lorsque des annonces spéciales ou des messages d'identification des stations sont émis. Une tranche de 45 secondes de modulation à 440 Hz est insérée, chaque heure, 1 minute (WWVH) ou 2 minutes (WWV) après l'heure. Un code de temps IRIG-H modifié, donnant le jour, l'heure, la minute et l'information UTI, est diffusé en permanence sur une sous-porteuse de 100 Hz. L'information DUT1 est représentée par le nombre et la position des impulsions de seconde doublées, chaque minute. Toutes les modulations sont interrompues 40 ms de part et d'autre de chaque impulsion de seconde.

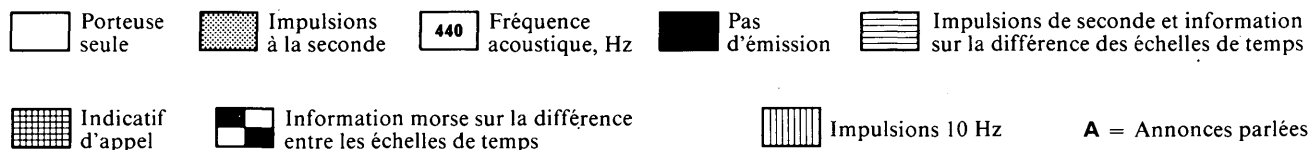


TABLEAU II — Caractéristiques des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes additionnelles, valables à partir du 1^{er} novembre 1985

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾	Méthode d'indication de DUT1
Indicatif	Emplacement	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Modulation (Hz)	Durée de transmission des signaux horaires (min)	Durée de la modulation audible (min)		
	Allouis, France	47° 10' N 02° 12' E	Equidirectif	1000 à 2000	1	7	24	162	1 ⁽²⁾	continue	continue radiodiffusion A3E	± 2	Pas d'émission DUT1
CHU ⁽³⁾	Ottawa, Canada	45° 18' N 75° 45' W	Equidirectif	3, 10, 3	3	7	24	3330, 7335, 14 670	1 ⁽⁴⁾	continue	néant	± 5	Code du CCIR par impulsion dédoublée
	Donebach, R.F. d'Allemagne	49° 34' N 09° 11' E	Equidirectif	250	1	7	24	153	néant	néant	continue radiodiffusion A3E	± 2	
DCF ⁽³⁾	Mainflingen, R.F. d'Allemagne	50° 01' N 09° 00' E	Equidirectif	20 ⁽⁵⁾	1	7	24	77,5	1	continue ⁽⁶⁾	continue ⁽⁷⁾	± 0,5	Pas d'émission DUT1
	Droitwich, Royaume-Uni	52° 16' N 02° 09' W	T	400	1	7	22	200 ⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾	néant	néant	continue radiodiffusion A3E	± 20	
	Westerglen, Royaume-Uni	55° 58' N 03° 50' W	T	50	1	7	22	200 ⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾	néant	néant	continue radiodiffusion A3E	± 20	
	Burghead, Royaume-Uni	57° 42' N 03° 28' W	T	50	1	7	22	200 ⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾	néant	néant	continue radiodiffusion A3E	± 20	
GBR ⁽³⁾ ⁽¹⁰⁾	Rugby, Royaume-Uni	52° 22' N 01° 11' W	Equidirectif	750 60 ⁽⁵⁾	1	7	22 ⁽¹¹⁾	15,95 16,00	1 ⁽¹²⁾	4 × 5 par jour ⁽¹³⁾	néant	± 2	Code du CCIR par impulsion double
HBG ⁽¹⁴⁾	Prangins, Suisse	46° 24' N 06° 15' E	Equidirectif	20	1	7	24	75	1 ⁽¹⁵⁾	continue	néant	± 1	Pas d'émission DUT1

TABLEAU II (suite)

Station			Type d'antenne	Puis- sance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émis- sions simul- tanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\frac{1}{10} - 10 \times \frac{1}{12}$)	Méthode d'indication de DUT1
Indicatif	Emplacement	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Modulation (Hz)	Durée de trans- mission des signaux horaires (min)	Durée de la modulation audible (min)		
JJF-2 ⁽³⁾ JG2AS	Sanwa, Sashima, Ibaraki, Japon	36° 11' N 139° 51' E	Equidirectif	10	1	7	24 ⁽¹⁶⁾	40	1 ⁽¹⁷⁾	continue ⁽¹⁸⁾	néant	± 10	
MSF	Rugby, Royaume-Uni	52° 22' N 01° 11' W	Equidirectif	25 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽¹⁹⁾	60	1 ⁽²⁰⁾	continue	néant	± 2	Code du CCIR par impulsion double.
	Milan, Italie	45° 20' N 09° 12' E	Equidirectif	600	1	7	24	900	néant	néant	continue radiodiffu- sion A3E	± 2	
NAA ⁽³⁾ ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾	Cutler, Maine, Etats-Unis d'Amérique	44° 39' N 67° 17' W	Equidirectif	1000 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²³⁾	24,0 ⁽²⁴⁾	néant	néant	néant	± 10	
NCA ⁽³⁾ ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾	Aguada, Porto Rico	18° 21' N 67° 11' W	Equidirectif	100 ⁽²⁵⁾	1	7	24	28,5	néant	néant	néant	± 10	
NTD ⁽³⁾ ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾	Yosami, Japon	34° 58' N 137° 01' E	Equidirectif	50 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁶⁾	17,4	néant	néant	néant	± 10	
NLK ⁽³⁾ ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾	Jim Creek, Washington, Etats-Unis d'Amérique	48° 12' N 121° 55' W	Equidirectif	125 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁷⁾	24,8	néant	néant	néant	± 10	
NPM ⁽³⁾ ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾	Lualualei, Hawaii, Etats-Unis d'Amérique	21° 25' N 158° 09' W	Equidirectif	600 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁸⁾	23,4	néant	néant	néant	± 10	
NSS ⁽³⁾ ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾	Annapolis, Maryland, Etats-Unis d'Amérique	38° 59' N 76° 27' W	Equidirectif	400 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁹⁾	21,4	néant	néant	néant	± 10	

TABLEAU II (suite)

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps $(\times 10^{-12})$ (1)	Méthode d'indication de DUT1
Indicatif	Emplacement	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Modulation (Hz)	Durée de transmission des signaux horaires (min)	Durée de la modulation audible (min)		
NWC ⁽³⁾ ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾	North West Cape, Australie	21° 49' S 114° 10' E	Equidirectif	1000 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽³⁰⁾	22,3	néant	néant	néant	± 10	
OMA	Podebrady, R.S. Tchèqueoslovaque	50° 08' N 15° 08' E	T	5	1	7	24	50	1 ⁽¹²⁾	23 heures par jour ⁽³¹⁾	néant	± 1000	Pas d'émission DUT1
RBU ⁽³⁾	Moscou, URSS	55° 48' N 38° 18' E	Equidirectif	10	1	7	24	66 ² / ₃	1, 10	6/60 ⁽³²⁾	néant	± 5	Code du CCIR par impulsion double ⁽³³⁾
RTZ ⁽³⁾	Irkoutsk, URSS	52° 26' N 104° 02' E	Equidirectif	10	1	7	23	50	1, 10	6/60	néant	± 5	Code du CCIR par impulsion double ⁽³³⁾
RW-166	Irkoutsk, URSS	52° 18' N 104° 18' E	Equidirectif	40	1	7	23	200		néant	continue radiodiffusion A9E	± 5	
RW-76	Novosibirsk, URSS	55° 04' N 82° 58' E	Equidirectif	150	1	7	22	272		néant	continue radiodiffusion A3E	± 5	
SAJ	Stockholm, Suède	59° 15' N 18° 06' E	Equidirectif	0,02 (PAR)	1	3 ⁽³⁴⁾	2 ⁽³⁵⁾	150 000	néant	10 ⁽³⁶⁾		± 2	
UNW3	Molodetchno, URSS	54° 26' N 26° 48' E	Equidirectif	—	1	7	2	25,5 25,1 25,0 23,0 20,5	1, 10, 40 ⁽³⁷⁾	40 min 2 fois par jour ⁽³⁸⁾	néant	± 10	

TABLEAU II (suite)

Station			Type d'antenne	Puis- sance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émis- sions simul- tanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾	Méthode d'indication de DUT1
Indicatif	Emplacement	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Modulation (Hz)	Durée de trans- mission des signaux horaires (min)	Durée de la modulation audible (min)		
UPD8	Arkhangelsk, URSS	64° 24' N 41° 32' E	Equidirectif	—	1	7	2	25,5 25,1 25,0 23,0 20,5	1, 10, 40 ⁽³⁷⁾	40 min 2 fois par jour ⁽³⁹⁾	néant	± 10	
UQC3	Khabarovsk, URSS	48° 30' N 134° 51' E	Equidirectif	300	1	7	2	25,0 25,1 25,5 23,0 20,5	1, 10, 40 ⁽³⁷⁾	40 min 3 fois par jour ⁽⁴⁰⁾	néant	± 10	
USB2	Frounzé, URSS	43° 04' N 73° 39' E	Equidirectif	—	1	7	3	25,5 25,1 25,0 23,0 20,5	1, 10, 40 ⁽³⁷⁾	40 min 3 fois par jour ⁽⁴¹⁾	néant	± 10	
UTR3	Gorki, URSS	56° 11' N 43° 58' E	Equidirectif	300	1	7	2	25,0 25,1 25,5 23,0 20,5	1, 10, 40 ⁽³⁷⁾	40 min 3 fois par jour ⁽⁴²⁾	néant	± 10	
VNG ⁽³⁾	Lyndhurst, Victoria, Australie	38° 03' S 145° 16' E	Equidirectif	10	2	7	24 ⁽⁴³⁾	4500 7500 12 000	1, 1000 ⁽⁴⁴⁾	continue	néant	± 100	Code du CCIR par 45 cycles de 900 Hz suivant immédiate- ment les repères de secondes normaux
WWVB ⁽³⁾	Fort Collins, Colorado, Etats-Unis d'Amérique	40° 40' N 105° 03' W	Antenne verticale chargée	13 ⁽⁵⁾	1	7	24	60	1 ⁽⁴⁵⁾	continue	néant	± 10	Pas de code du CCIR

TABLEAU II (suite)

Station			Type d'antenne	Puis- sance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émis- sions simul- tanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾	Méthode d'indication de DUT1
Indicatif	Emplacement	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Modulation (Hz)	Durée de transmis- sion des signaux horaires (min)	Durée de la modulation audible (min)		
Y3S	Nauen, République démocratique allemande	52° 39' N 12° 55' E	Equidirectif	5	1	7	24	4525	néant	continue ⁽⁴⁶⁾	continue	⁽⁸⁾	Code du CCIR par impulsion dédoublée
ZUO ⁽⁴⁷⁾	Olifantsfon- tein, République sudafricaine	24° 58' S 28° 14' E	Equidirectif	0,08	1	7	24	100 000	1	continue	néant	± 10	Code du CCIR par prolongation
	Motala, Suède	58° 26' N 14° 59' E	Equidirectif	300	1	7	17	191 ⁽⁹⁾	néant	21 s une fois par jour ⁽⁴⁸⁾	continue radiodiffu- sion A3E	± 50 ⁽⁸⁾	Code du CCIR par modulation à fréquence acous- tique réduite
EBC	San Fernando, Cadix, Espagne	36° 28' N 06° 12' W	Equidirectif	1	1	7	1	12 008 6840	⁽⁴⁹⁾	10	⁽⁵⁰⁾	± 100	Code du CCIR par impulsion double

Notes relatives au Tableau II:

- (¹) Cette valeur est applicable à l'émetteur; pour assurer la valeur d'incertitude indiquée au point de réception, il pourrait se révéler nécessaire d'observer la phase et la fréquence reçues durant une période suffisamment longue pour éliminer les effets dus au bruit et autres phénomènes aléatoires.
- (²) Modulation de la phase de la porteuse de + et - 1 radian en 0,1 s toutes les secondes sauf à la 59^e seconde de chaque minute. Cette modulation est redoublée pour indiquer un «1 binaire». Les numéros de la minute, de l'heure, du jour dans le mois, du jour dans la semaine, du mois et de l'année sont transmis chaque minute à partir de la 21^e seconde jusqu'à la 58^e seconde, conformément à l'échelle de temps légale française. De plus un «1 binaire» à la 17^e seconde indique un écart de 2 heures d'avance de l'heure locale par rapport à l'UTC (heure d'été); un «1 binaire» à la 18^e seconde indique un écart de 1 heure d'avance de l'heure par rapport à l'UTC (heure d'hiver); un «1 binaire» à la 14^e seconde indique que le jour en cours est un jour férié (Noël, fête nationale, etc.).
- (³) Ces stations ont fait savoir qu'elles suivent un des systèmes de la Recommandation 460.
- (⁴) Impulsions de 300 cycles de modulation à 1000 Hz: la première impulsion de chaque minute est prolongée.
- (⁵) Ces valeurs représentent la puissance rayonnée estimée.
- (⁶) Au début de chaque seconde (à l'exception de la 59^e seconde), l'amplitude de la porteuse est réduite à 25% de sa valeur pendant 0,1 ou 0,2 s, correspondant respectivement à «0 binaire» et «1 binaire». Les numéros de la minute, de l'heure, du jour dans le mois, du jour dans la semaine, du mois et de l'année sont transmis en code BCD de la 21^e à la 58^e seconde. Les signaux horaires sont générés par la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), et sont conformes à l'heure légale de la République fédérale d'Allemagne, soit UTC (PTB) + 1 h. (Heure d'Europe centrale CET) ou UTC (PTB) + 2 h. (Heure d'Europe centrale CEST). En outre, CET et CEST sont indiquées par un 1 binaire à la 18^e ou à la 17^e seconde respectivement.
- (⁷) Le signal d'appel est donné par modulation de la porteuse et par une fréquence acoustique de 250 Hz, trois fois par heure, aux 19^e, 39^e et 59^e min, sans interruption de la séquence des signaux horaires.
- (⁸) Sans cohérence entre la fréquence porteuse et les signaux horaires.
- (⁹) La fréquence porteuse de ces stations sera réduite de 2 kHz le 1^{er} février 1988 conformément à la Résolution N° 500 de la Conférence administrative mondiale de radiocommunications, Genève, 1979.
- (¹⁰) On emploie la manipulation par déplacement de fréquence en alternance avec l'émission en ondes entretenues; les fréquences des deux pilotes sont stabilisées.
- (¹¹) Période de maintenance: de 1000 à 1400 h UTC de chaque mardi.
- (¹²) Signaux télégraphiques A1A.
- (¹³) De 0255 à 0300 h, de 0855 à 0900 h, de 1455 à 1500 h et de 2055 à 2100 h UTC.
- (¹⁴) Signaux horaires coordonnés.
- (¹⁵) Suppression de la porteuse pendant 100 ms au début de chaque seconde; impulsion double au début de chaque minute; impulsion triple au début de chaque heure; impulsion quadruple au début de chaque 12 heures.
- (¹⁶) J1F-2: Télégraphie, JG2AS: en l'absence de signaux télégraphiques.
- (¹⁷) Emission de la porteuse, d'une durée de 500 ms, au début de chaque seconde, lorsque la 59^e impulsion est supprimée chaque minute.
- (¹⁸) En l'absence des émissions télégraphiques.
- (¹⁹) L'émission est interrompue pendant la période de maintenance de 1000 à 1400 h UTC le premier mardi de chaque mois.
- (²⁰) Porteuse interrompue pendant 100 ms chaque seconde et pendant 500 ms chaque minute; code horaire rapide; 100 bit/s, BCD NRZ émis pendant les minutes d'interruption donnant le mois, le jour du mois, l'heure et la minute. Code horaire lent, 1 bit/s, BCD PWM émis de la 17^e à la 51^e seconde donnant l'année, le mois, le jour du mois, le jour de la semaine, l'heure et la minute avec un identificateur à 8 bits de la 52^e à la 59^e seconde. Code DUT1 du CCIR par double impulsion.
- (²¹) MDM (modulation par déplacement minimal) utilisée: une porteuse à stabilité de phase peut être rétablie après la multiplication et le mélange appropriés dans le récepteur.
- (²²) La station est d'abord destinée à des fins de communication: bien que ces données soient susceptibles d'être modifiées, toute modification est annoncée par avance aux usagers par l'Observatoire naval des Etats-Unis, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- (²³) De 1200 à 2000 h UTC tous les dimanches pendant l'interruption des émissions de NSS (jusqu'au 15 juillet).
- (²⁴) 2000 h UT à partir du 23 janvier 1984, jusqu'à nouvel avis.
- (²⁵) Devenue opérationnelle le 14 août 1984, 74 kW.
- (²⁶) De 2300 à 9000 h UTC les premiers jeudi-vendredi; de 2300 à 0700 h UTC tous les autres jeudi-vendredis. Puissance réduite de moitié de 2200 à 0200 h UTC, chaque lundi et vendredi.
- (²⁷) Excepté de 1600 à 2400 h UTC, tous les jeudis. Pendant la période d'heure d'été, de 1500 à 2300 h UTC tous les jeudis.

Notes relatives au Tableau II (suite):

- (²⁸) 2,5 MHz: 0000-1000 h UTC; 5 MHz: 0900-0100 h UTC; 10 MHz: continu; 15 MHz: 0100-0900 h UTC.
- (²⁹) N'émet pas jusqu'à 2100 h UTC le 15 juillet, sauf quatorze heures chaque dimanche pendant la durée d'interruption des émissions de NAA.
- (³⁰) De 0000 à 0800 h tous les lundis habituellement.
- (³¹) De 1000 à 1100 h UTC, émissions sans manipulation, sauf pour l'indicatif OMA au début de chaque quart d'heure.
- (³²) Emission expérimentale éventuelle continue de signaux horaires.
- (³³) L'information supplémentaire sur la valeur de la différence UT1 – UTC est transmise pour le code dUT1. Elle donne avec plus de précision la valeur de la différence de UT1 – UTC, jusqu'à des multiples de 0,02 s. La valeur totale de la correction est DUT1 + dUT1. Les valeurs positives dUT1 sont transmises par marquage de p impulsions de seconde, dans l'intervalle compris entre la 21^e et la 24^e seconde de la minute, d'où: $dUT1 = + 0,02 \text{ s} \times p$. Les valeurs négatives de dUT1 sont transmises par marquage de q impulsions de seconde, dans l'intervalle compris entre la 31^e et la 34^e seconde de la minute, d'où: $dUT1 = -0,02 \text{ s} \times q$.
- (³⁴) Chaque lundi, mercredi et vendredi.
- (³⁵) De 0930 à 1130 h UTC. En été, ajouter une heure aux heures indiquées.
- (³⁶) Impulsions à la seconde de 8 cycles de modulation à 1 kHz pendant 5 min, commençant à 1100 h UTC et à 1125 h UTC. En été, ajouter une heure aux heures indiquées.
- (³⁷) Au cours de chaque émission, on émet des signaux de deux types:
- Des signaux A1A avec une fréquence porteuse de 25 kHz, d'une durée de 0,0125; 0,025; 0,1; 1 et 10 s, répétés respectivement toutes les 0,025; 0,1; 1; 10 et 60 s et,
 - Des signaux N0N avec des fréquences porteuses 25,0; 25,1; 25,5; 23,0 et 20,5 kHz. Les phases de ces signaux correspondent aux repères de temps de l'échelle émise.
- (³⁸) De 0736 à 1817 h et de 1936 à 2017 h UTC du 1^{er} octobre au 31 mars.
De 0736 à 1817 h et de 2036 à 2117 h UTC du 1^{er} avril au 30 septembre.
- (³⁹) De 0836 à 0917 h et de 1136 à 1217 h UTC.
- (⁴⁰) De 0036 à 0117 h, de 0636 à 0717 h et de 1736 à 1817 h UTC, du 1^{er} octobre au 31 mars.
De 0136 à 0217 h, de 0536 à 0617 h et de 1736 à 1813 h UTC du 1^{er} avril au 30 septembre.
- (⁴¹) De 0436 à 0517 h, de 0936 à 1017 h et de 2136 à 2217 h UTC du 1^{er} octobre au 31 mars.
De 0436 à 0517 h, de 1036 à 1117 h et de 2236 à 2317 h UTC du 1^{er} avril au 30 septembre.
- (⁴²) De 0536 à 0617 h, de 1336 à 1417 h et de 1836 à 1917 h UTC, du 1^{er} octobre au 31 mars.
De 0636 à 0717 h, de 1336 à 1417 h et de 1837 à 1917 h UTC du 1^{er} avril au 30 septembre.
- (⁴³) 4500 kHz, de 0945 à 2130 h UTC, 12000 kHz, de 2145 à 0930 h UTC, 7500 kHz, service continu, avec une interruption technique de 2230 à 2245 h UTC.
- (⁴⁴) Impulsions de 50 cycles de modulation à 1000 Hz, raccourcies à 5 cycles de la 55^e à la 58^e seconde; la 59^e impulsion est supprimée. Aux minutes 5, 10, 15, etc., les impulsions de la 50^e à la 58^e seconde sont raccourcies à 5 cycles; identification par annonce parlée entre la 20^e et la 50^e impulsion des minutes 15, 30, 45 et 60.
- (⁴⁵) Code de temps utilisé qui réduit la porteuse de 10 dB au début de chaque seconde.
- (⁴⁶) Signaux horaires A1A d'une durée de 0,1 s (repère de minute d'une durée de 0,5 s) suivis d'impulsions codées de 0,25 à 0,3 s donnant l'information DUT1, dUT1 ainsi que l'heure et la minute en UTC.
- (⁴⁷) Emetteur à modulation de phase; signaux horaires et annonces comme pour ZUO 2,5 et 5 MHz (voir Tableau I).
- (⁴⁸) Signaux horaires A3E d'une durée de 0,1 s entre 11 h 58 m 55 s et 11 h 59 m 16 s UTC. Le repère de minute a une durée de 0,5 s. Pendant l'heure d'été, ajouter une heure aux heures indiquées.
- (⁴⁹) Impulsions de seconde, d'une durée de 0,1 s, modulées à 1000 Hz,
Impulsions de minute, d'une durée de 0,5 s, modulées à 1250 Hz.
- (⁵⁰) Minutes 00 à 10, 12 008 kHz, A2A.
15 à 25, 12 008 kHz, J3E.
30 à 40, 6 840 kHz, A2A.
45 à 55, 6 840 kHz, J3E.

Pendant la minute qui précède immédiatement chacune des périodes indiquées, émission de l'indicatif, en Morse lent, deux fois.

TABLEAU III — Caractéristiques de certains systèmes d'aide à la navigation, valables à la date du 1^{er} novembre 1983

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾
Indicatif	Emplacement approximatif	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Période de répétition des impulsions (μ s)	Durée de transmission des signaux horaires	Durée de la modulation audible	
Loran-C ⁽²⁾ (7980-Z, 9960-Y)	Carolina Beach, NC, Etats-Unis d'Amérique	34° 03,8' N 77° 54,8' W	Equidirectif	550 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 600 79 800 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7980-Y)	Jupiter, Florida, Etats-Unis d'Amérique	27° 02,0' N 80° 06,9' W	Equidirectif	275	1	7	24	100	79 800 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (5930-Y, 7930-W)	Cape Race, Terre-Neuve	46° 46,5' N 53° 10,5' W	Equidirectif	1500 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 300 59 300 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (8970-Z)	Gordon Lake, Ontario, Canada	46° 24,5' N 83° 52,0' W	Equidirectif	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	89 700	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (5930-X, 9960-X)	Nantucket Island, Etats-Unis d'Amérique	41° 15,2' N 69° 58,6' W	Equidirectif	275 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 300 ⁽⁴⁾ 99 600	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (8970-M, 9960-Z)	Dana, Indiana, Etats-Unis d'Amérique	39° 51,1' N 87° 29,2' W	Equidirectif	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	89 700 ⁽⁴⁾ 99 600	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (7930-X, 9980-W)	Angissog, Groenland	59° 59,3' N 45° 10,5' W	Equidirectif	760 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 300 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1

TABLEAU III (suite)

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾
Indicatif	Emplacement approximatif	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Période de répétition des impulsions (μ s)	Durée de transmission des signaux horaires	Durée de la modulation audible	
Loran-C ⁽²⁾ (7970-M, 9980-X)	Ejde, Ile Féroé	62° 18,0' N 7° 04,4' W	Equidirectif	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 300 79 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7970-W)	Sylt, R.F. d'Allemagne	54° 48,5' N 8° 17,6' E	Equidirectif	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7970-X)	Boe, Norvège	68° 38,1' N 14° 27,8' E	Equidirectif	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (7970-Y, 7930-W, 9980-M)	Sandur, Islande	64° 54,4' N 23° 55,4' W	Equidirectif	1500 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 300 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7970-Z)	Jan Mayen, Norvège	70° 54,9' N 8° 44,0' W	Equidirectif	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (5930-Z, 7930-M)	Fox Harbour, Canada	52° 22,6' N 55° 42,5' W	Equidirectif	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 300	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7990-M)	Sellia Marina, Italie	38° 52,3' N 16° 43,1' E	Equidirectif	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7990-X)	Lampedusa, Italie	35° 31,3' N 12° 31,5' E	Equidirectif	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7990-Y)	Kargabaran, Turquie	40° 58,3' N 27° 52,0' E	Equidirectif	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1

TABLEAU III (suite)

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾
Indicatif	Emplacement approximatif	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Période de répétition des impulsions (μ s)	Durée de transmission des signaux horaires	Durée de la modulation audible	
Loran-C (7990-Z)	Estartit, Espagne	42° 03,6' N 3° 12,3' E	Equidirectif	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (4990-M)	Ile Johnston	16° 44,7' N 169° 30,5' W	Equidirectif	275 ⁽³⁾	1	7	24	100	49 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (4990-X)	Upolu Point, Hawaii, Etats-Unis d'Amérique	20° 14,8' N 155° 53,1' W	Equidirectif	275 ⁽³⁾	1	7	24	100	49 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (4990-Y)	Kurê, Hawaii, Etats Unis d'Amérique	28° 23,7' N 178° 17,5' W	Equidirectif	275 ⁽³⁾	1	7	24	100	49 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (9970-M)	Iwo Jima, Japon	24° 48,1' N 141° 19,5' E	Equidirectif	1800 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (9970-W)	Iles Marcus, Japon	24° 17,1' N 153° 58,9' E	Equidirectif	1800 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (9970-X)	Hokkaido, Japon	42° 44,6' N 143° 43,2' E	Equidirectif	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (9970-Y)	Gesashi, Okinawa, Japon	26° 36,4' N 128° 08,9' E	Equidirectif	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (9970-Z)	Yap, Ile Caroline	9° 32,8' N 138° 09,9' E	Equidirectif	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1

TABLEAU III (suite)

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾
Indicatif	Emplacement approximatif	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Période de répétition des impulsions (μ s)	Durée de transmission des signaux horaires	Durée de la modulation audible	
Loran-C (9990-M)	Saint-Paul, Ile Pribiloff, Alaska	59° 09,2' N 170° 15,0' W	Equidirectif	275 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (9990-X)	Attu, Alaska	52° 49,7' N 173° 10,8' E	Equidirectif	275 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (9960-M, 8970-X)	Seneca, NY, Etats-Unis d'Amérique	42° 42,8' N 76° 49,6' W	Equidirectif	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 600 ⁽⁴⁾ 89 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (9960-W, 5930-M)	Caribou, ME, Etats-Unis d'Amérique	46° 48,5' N 67° 55,6' W	Equidirectif	350 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 300 ⁽⁴⁾ 99 600 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (8970-W, 7980-M)	Malone, FL, Etats-Unis d'Amérique	30° 59,6' N 85° 10,2' W	Equidirectif	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	89 700 ⁽⁴⁾ 79 800 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (8970-Y)	Baudette, MN, Etats-Unis d'Amérique	48° 36,8' N 94° 33,3' W	Equidirectif	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	89 700 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7980-W)	Grangeville, LA, Etats-Unis d'Amérique	30° 43,6' N 90° 49,7' W	Equidirectif	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 800 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7980-X)	Raymondville, TX, Etats-Unis d'Amérique	26° 31,9' N 97° 50,0' W	Equidirectif	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 800 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1

TABLEAU III (suite)

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾
Indicatif	Emplacement approximatif	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Période de répétition des impulsions (μ s)	Durée de transmission des signaux horaires	Durée de la modulation audible	
Loran-C (9990-Y)	Pt. Clarence, Alaska	65° 14,7' N 166° 53,2' W	Equidirectif	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (9990-Z, 7960-X)	Narrow Cape, Alaska	57° 26,3' N 152° 22,2' W	Equidirectif	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 900 79 600 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (7960-M)	Tok, Alaska	63° 19,7' N 142° 48,5' W	Equidirectif	540 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 600 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (7960-Y, 5990-X)	Shoal Cove, Alaska	55° 26,4' N 131° 15,3' W	Equidirectif	540 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 600 59 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (5990-M)	Williams Lake, BC, Canada	51° 58,0' N 122° 22,0' W	Equidirectif	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 900 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (5990-Y, 9940-W)	George, Washington, Etats-Unis d'Amérique	47° 03,8' N 119° 44,7' W	Equidirectif	1600 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 900 99 400 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (9940-M)	Fallon, Nevada, Etats-Unis d'Amérique	39° 33,1' N 118° 49,9' W	Equidirectif	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 400 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (9940-X)	Middletown, Californie, Etats-Unis d'Amérique	38° 46,9' N 122° 29,7' W	Equidirectif	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 400 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1

TABLEAU III (suite)

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émissions simultanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾
Indicatif	Emplacement approximatif	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Période de répétition des impulsions (μ s)	Durée de transmission des signaux horaires	Durée de la modulation audible	
Loran-C (9940-Y)	Searchlight, Nevada, Etats-Unis d'Amérique	35° 19,3' N 114° 48,3' W	Equidirectif	540 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 400 ⁽⁴⁾	continue ⁽⁵⁾	néant	± 1
Loran-C (5990-Z)	Port Hardy, BC, Canada	50° 36,5' N 127° 21,5' W	Equidirectif	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 900 ⁽⁴⁾	continue	néant	± 1
RNS-E(A)	Briansk, URSS	53° 13' N 34° 24' E	Equidirectif	800 ⁽³⁾	1	7 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁷⁾	100	80 000 ⁽⁸⁾	continue	néant	± 5
RNS-E(D)	Syzran, URSS	53° 11' N 49° 46' E	Equidirectif	800 ⁽³⁾	1	6 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁷⁾	100	80 000 ⁽⁸⁾	⁽⁹⁾	néant	± 5
RNS-W(A)	Aleksandrovsk, Sakhalinsky	50° 56' N 142° 38' E	Equidirectif	400 ⁽³⁾	1	7 ⁽¹⁾	12 ⁽¹⁰⁾	100	50 000 ⁽⁸⁾	continue	néant	± 5
Omega Ω /N	Aldra, Norvège	66° 25' N 13° 08' E	Equidirectif	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-F 10,2-A ⁽¹²⁾ 11½-C 13,6-B	néant	⁽¹²⁾	néant	± 5
Omega Ω /ND	Lamoure, North Dakota, Etats-Unis d'Amérique	46° 22' N 98° 20' W	Equidirectif	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-A 10,2-D ⁽¹²⁾ 11½-F 13,6-E	néant	⁽¹²⁾	néant	± 1

TABLEAU III (suite)

Station			Type d'antenne	Puissance de l'onde porteuse (kW)	Nombre d'émis- sions simul- tanées	Durée de fonctionnement		Fréquences étalon utilisées		Durée de l'émission		Incertitude des fréquences et des intervalles de temps ($\times 10^{-12}$) ⁽¹⁾
Indicatif	Emplacement approximatif	Latitude Longitude				jours par semaine	heures par jour	Porteuse (kHz)	Période de répétition des impulsions (μ s)	Durée de transmission des signaux horaires	Durée de la modulation audible	
Omega Ω /H	Haiku, Hawaii, Etats-Unis d'Amérique	21° 24' N 157° 50' W	Equidirectif	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-H 10,2-C ⁽¹²⁾ 11½-E 13,6-D	néant	⁽¹²⁾	néant	± 1
Omega Ω /J	Ile Tsushima, Japon	34° 37' N 129° 27' E	Equidirectif	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-E 10,2-H ⁽¹²⁾ 11½-B 13,6-A	néant	⁽¹²⁾	néant	± 1
Omega Ω /L	Monrovia, Libéria	06° 18' N 10° 40' W	Equidirectif	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-G 10,2-B ⁽¹²⁾ 11½-D 13,6-C	néant	⁽¹²⁾	néant	± 1
Omega Ω /LR	La Réunion	20° 58' S 55° 17' E	Equidirectif	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-B 10,2-E ⁽¹²⁾ 11½-G 13,6-F	néant	⁽¹²⁾	néant	± 1
Omega Ω /A	Golfo Nuevo, Argentine	43° 03' S 65° 11' W	Equidirectif	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-C 10,2-F ⁽¹²⁾ 11½-H 13,6-G	néant	⁽¹²⁾	néant	± 1

Notes relatives au Tableau III:

- (¹) Pas d'émissions les 20 et 21 de chaque mois
- (²) Stations à double marche.
- (³) Puissance rayonnée de crête.
- (⁴) Les impulsions sont émises en groupes de 9 pour la station primaire (M) et de 8 pour les stations secondaires (W, X, Y, Z).
- (⁵) Maintenus à $\pm 5 \mu\text{s}$ du UTC. Le temps de coïncidence (TOC) avec la seconde UTC change lorsque apparaissent les sauts de seconde; ce temps de coïncidence est indiqué dans des tables TOC qui sont fournies aux intéressés par le US Naval Observatory, Washington DC, Etats-Unis d'Amérique.
- (⁶) Pas d'émissions les 10 et 11 de chaque mois.
- (⁷) De 0400 à 1000 h et de 1400 à 1800h UTC.
- (⁸) Les signaux des stations principales (A) sont marqués par l'émission dans chaque groupe d'une neuvième impulsion supplémentaire. Chaque groupe impulsions coïncidant avec un repère de seconde UTC est marqué par l'émission d'une (dixième) impulsion supplémentaire. En cas de coïncidence avec un repère de minute, les dix groupes suivants sont aussi marqués et en cas de coïncidence avec un repère de 5 min après 12 s, les onze groupes suivants, sont aussi marqués. Les repères de secondes UTC s'accompagnent de points caractéristiques disposés sur les fronts avant des huitièmes impulsions à un niveau 0,6 de la valeur maximale du signal.
- (⁹) Fonctionne habituellement sans repère de seconde. Dans certains cas, fonctionne avec un repère de seconde décalé par rapport à l'UTC.
- (¹⁰) De 2300 à 2400 h et de 0000 à 1100 h UTC.
- (¹¹) Ces valeurs représentent la puissance rayonnée estimée.
- (¹²) Voir le Tableau IV.

TABLEAU IV – Format du signal OMEGA

Segment	A		B		C		D		E		F		G		H	
Durée	0,9		1,0		1,1		1,2		1,1		0,9		1,2		1,0	
kHz:																
10,2	Norvège		Libéria		Hawaii		North Dakota		La Réunion		Argentine		Australie		Japon	
11 1/3	Australie		Japon		Norvège		Libéria		Hawaii		North Dakota		La Réunion		Argentine	
13,6	Japon		Norvège		Libéria		Hawaii		North Dakota		La Réunion		Argentine		Australie	
11,05	North Dakota		La Réunion		Argentine		Australie		Japon		Norvège		Libéria		Hawaii	

Note 1. — Le segment A ne commence pas à 0,0 s UTC. L'époque des segments change avec les sauts de seconde. Le segment A a commencé à la 47^e seconde en janvier 1986.

Note 2. — Les stations OMEGA sont destinées à la navigation générale; bien que ces données soient susceptibles d'être modifiées, toute modification est annoncée par avance aux usagers par le: United States Coast Guard Commandant*.

Note 3. — En plus des fréquences de navigation 10,2 kHz, 13,6 kHz et 11 1/3 kHz émises par toutes les stations, les stations émettent des «fréquences particulières». Ces stations et leurs fréquences/segments sont données dans le Tableau V.

* United States Coast Guard Commandant (G-WAN-3/73), 400 Seventh Street, S.W., Washington, D.C. 20590.

TABLEAU V – *Format de transmission du signal du système de radionavigation Omega*

Station \ Segment	1	2	3	4	5	6	7	8									
Norvège (A)	10,2	13,6	11 1/3	12,1 ⁽¹⁾	12,1 ⁽¹⁾	11,05	12,1 ⁽¹⁾	12,1 ⁽¹⁾									
Libéria (B)	12,0 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3	12,0 ⁽¹⁾	12,0 ⁽¹⁾	11,05	12,0 ⁽¹⁾									
Hawaii (C)	11,8 ⁽¹⁾	11,8 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3	11,8 ⁽¹⁾	11,8 ⁽¹⁾	11,05									
Dakota Nord (D)	11,05	13,1 ⁽¹⁾	13,1 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3	13,1 ⁽¹⁾	13,1 ⁽¹⁾									
La Réunion (E)	12,3 ⁽¹⁾	11,05	12,3 ⁽¹⁾	12,3 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3	12,3 ⁽¹⁾									
Argentine (F)	12,9 ⁽¹⁾	12,9 ⁽¹⁾	11,05	12,9 ⁽¹⁾	12,9 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3									
Australie (G)	11 1/3	13,0 ⁽¹⁾	13,0 ⁽¹⁾	11,05	13,0 ⁽¹⁾	13,0 ⁽¹⁾	10,2	13,6									
Japon (H)	13,6	11 1/3	12,8 ⁽¹⁾	12,8 ⁽¹⁾	11,05	12,8 ⁽¹⁾	12,8 ⁽¹⁾	10,2									
Intervalle de transmission	0,9	0,2	1,0	0,2	1,1	0,2	1,2	0,2	1,1	0,2	0,9	0,2	1,2	0,2	1,0	0,2	10 secondes

Fréquence en kHz.

(¹) Fréquence unique de la station correspondante.

ANNEXE 1

ADMINISTRATIONS RESPONSABLES DES STATIONS ÉNUMÉRÉES
DANS LES TABLEAUX I ET II

<i>Station</i>	<i>Administration</i>
Allouis	Centre National d'Etudes des Télécommunications Département FRE 196, rue de Paris 92220 Bagneux, France
ATA	Time and Frequency Section National Physical Laboratory Hillside Road New Delhi — 110012, Inde
BPM	Time and Frequency Division Shaanxi Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences Lintong, Xian, Chine
CHU	National Research Council Time and Frequency Section Physics Division (m-36) Ottawa K1A 0S1, Ontario, Canada.
DCF77	Physikalisch-Technische Bundesanstalt Laboratorium 1.21 3300 Braunschweig Bundesallee 100, République fédérale d'Allemagne
EBC	Instituto y Observatorio de Marina (Observatoire de la Marine espagnole) San Fernando (Cadiz), Espagne
GBR	National Physical Laboratory Electrical Science Division Teddington, Middlesex TW11 0LW Royaume-Uni
HBG	Service horaire HBG Observatoire cantonal CH-2000 — Neuchâtel, Suisse
HLA	Korea Standards Research Institute P.O. Box 3 Taejon, Ch'ungnam 300-31 République de Corée
IAM	Istituto Superiore Poste e Telecomunicazioni Viale Europa 00100 — Rome, Italie
IBF	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris Corso Massimo d'Azeglio, 42 10125 — Turin, Italie
JJY JG2AS	Standards and Measurements Division The Radio Research Laboratories Ministry of Posts and Telecommunications Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184, Japon
LOL	Director Observatorio Naval Av. Costanera Sur, 2099 Buenos Aires, République argentine
MSF	National Physical Laboratory Electrical Science Division Teddington, Middlesex, TW11 0LW, Royaume-Uni
NAA, NDT, NLK, NPM, NSS, NWC, NMO, NPN	Superintendent US Naval Observatory Washington, DC 20390 Etats-Unis d'Amérique

OMA	1. Time information Astronomický ústav ČSAV, Budečská 6 12023 Praha 2 Vinohrady, République socialiste tchécoslovaque 2. Standard frequency information Ústav radiotechniky a elektroniky ČSAV Lumumbova 1 18088 Praha 8, Kobylišy, République socialiste tchécoslovaque
RAT, RCH, RID, RIM, RWM	Comité d'Etat des Normes Conseil des Ministres de l'URSS Moscou, URSS Leninski prosp., 9
SAJ Motala	Swedish Telecommunications Administration Radio Services S-123 86 Farsta, Suède
VNG	Section Head (Time and Frequency Standards) A.P.O. Research Laboratories 59 Little Collins Street Melbourne, Victoria 3000, Australie
WWV, WWVH WWVB	Time and Frequency Services Group Time and Frequency Division National Bureau of Standards Boulder, Colorado 80303, Etats-Unis d'Amérique
Y3S	Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung Fachgebiet Zeit und Frequenz DDR-1162 Berlin Fürstenwalder Damm 388 République démocratique allemande
ZUO	Time Standards Section Precise Physical Measurements Division National Physical Research Laboratory P.O. Box 395 0001 – Pretoria, République sudafricaine

RAPPORT 270-3

UTILISATION OPTIMALE DU SPECTRE DES FRÉQUENCES POUR LES SIGNAUX HORAIRES DE HAUTE PRÉCISION

(Programme d'études 3A/7)

(1963-1966-1970-1978)

Des applications toujours plus nombreuses requièrent l'emploi d'une référence de haute précision pour la synchronisation des signaux horaires. En vue d'obtenir une plus grande précision, il y a intérêt à utiliser une largeur de bande appropriée, jusqu'aux limites imposées par:

- la bande attribuée,
- les instabilités de la propagation,
- des considérations relatives aux bruits ou aux brouillages.

Il existe aussi des moyens de distribution et de comparaison de temps à l'aide de signaux transmis à d'autres fins, tels que les communications en ondes myriamétriques, la radiodiffusion, la télévision et les aides à la navigation. Quand il est possible d'utiliser ces signaux, on fait à la fois des économies de fréquences et d'équipements; cette utilisation doit donc être encouragée, bien qu'elle ne soit pas traitée plus à fond dans le présent Rapport, sauf si des caractéristiques particulières des émissions permettent de parvenir à des incertitudes de temps sensiblement inférieures aux incertitudes normalement possibles dans la même largeur de bande.

Le système de navigation Loran-C, fonctionnant dans la bande $100 \text{ kHz} \pm 10 \text{ kHz}$, est d'un emploi très répandu et donne des incertitudes de temps inférieures à $1 \mu\text{s}$ sur des distances allant jusqu'à 2000 km. La modulation par impulsions et codage de phase assure une discrimination contre les signaux reçus par l'intermédiaire de l'ionosphère et se prête à des mesures dans lesquelles domine le signal propagé par l'onde de sol. L'emploi de taux de modulation différents autorise le fonctionnement de plusieurs chaînes d'émetteurs distinctes dans la même bande de fréquences [Potts et Wieder, 1972].

Sur les ondes décimétriques, où la transmission à grande distance s'effectue entièrement par la propagation ionosphérique, la précision avec laquelle on peut recevoir les signaux horaires est limitée par les caractéristiques du milieu de propagation. Les largeurs de bande utilisées ont été déterminées principalement à la suite de considérations d'ordre administratif plutôt que technique ou scientifique. Le Rapport 267 permet de constater que beaucoup de stations utilisent comme signal horaire une modulation à fréquence acoustique. Cette modulation a la forme précédemment recommandée par le CCIR et consiste en n cycles d'une modulation à fréquence acoustique sur 200 n Hz, si bien que tous les signaux ont une durée de 5 ms. On peut choisir n *ad libitum* pour permettre de distinguer les diverses émissions.

C'est ainsi que plusieurs stations, dont WWV, ont pris $n = 5$, alors que WWVH émet avec $n = 6$ et que JJY a adopté $n = 8$. L'emploi de cette forme d'impulsion ne permet pas de séparer les diverses composantes d'un signal reçu après propagation par trajets multiples. Toutefois, ce système permet de réaliser une économie de largeur de bande raisonnable. D'autre part, les perturbations de la propagation donnent lieu à des distorsions aisément identifiables de la forme du signal.

On a étudié une méthode de distribution du temps qui n'exige pas l'emploi de largeurs de bande excessives et qui peut être appliquée à la navigation [Casselmann et Tibbals, 1958] et au repérage du temps [Morgan et Baltzer, 1964]. Dans cette méthode, les interférences entre deux porteuses très voisines et de phases cohérentes engendrent une référence grossière. Lorsque cette référence peut être obtenue aux récepteurs avec une stabilité de phase suffisante, elle sert à identifier un cycle particulier des fréquences porteuses précises, et l'observation de la phase précise de ces porteuses permet alors d'obtenir une référence d'intervalle de temps.

Les premières expériences faites sur 19,9 et sur 20 kHz, sur un trajet de 1400 km, s'étaient révélées encourageantes pour ce qui est de l'identification du cycle. On possède maintenant des renseignements sur des études expérimentales plus récentes, notamment sur une méthode qui permet d'obtenir des signaux de temps à l'aide de récepteurs classiques pour ondes myriamétriques, et avec laquelle on a obtenu des résultats sur un trajet de 2400 km pendant une période de plusieurs mois [Fey et Looney, 1966]. On a décrit également d'autres études dans lesquelles on faisait varier l'espacement de fréquence ainsi que la longueur du trajet [Raules et Burgess, 1967]. On a construit un récepteur expérimental à deux fréquences pour détermination de temps, pouvant être utilisé avec les émissions de WWVL sur 20,0 et 19,9 kHz [Chi et Witt, 1966]. Les résultats de ces diverses études conduisent à penser qu'une différence de 100 Hz entre les fréquences porteuses est trop faible pour permettre une identification quotidienne fiable du cycle sur des trajets arbitraires et, au cours d'une nouvelle série d'expériences, on a ajouté une troisième porteuse aux émissions de WWVL pour obtenir des différences de fréquence de 500 et de 600 Hz. Les résultats obtenus dans ces conditions indiquent qu'en procédant à un calcul approprié de la moyenne, on peut arriver à l'identification du cycle sur des distances atteignant 8000 km. Une étude analytique mettant en œuvre des méthodes dérivées de la théorie de l'information a montré qu'un système utilisant plusieurs ondes entretenues a des chances d'être optimal du point de vue de l'économie de spectre [Jespersen, 1967]. On trouvera dans la référence [Morgan, 1967] une bibliographie utile sur l'ensemble de cette question.

Des études théoriques ont été effectuées sur un système analogue, utilisant une très petite largeur de bande dans la gamme des ondes myriamétriques [Egidi, 1969]. Ces études ont porté sur deux méthodes. Dans la première, on considère une forme d'onde particulière qui peut être interprétée comme le produit de deux signaux sinusoïdaux de même amplitude, dont les fréquences sont dans un rapport entier et en relation de phase convenable. Cette méthode tire parti du repère de temps donné par la modulation de phase de la fréquence porteuse [Egidi et Oberto, 1964a et b] (et non de l'enveloppe). La deuxième méthode emploie des inversions périodiques de la phase de la porteuse; les cas où les inversions se produisent aux phases 0 et $\pi/2$ ont été traités en détail [Egidi, 1968]. Dans le même article, on trouve les résultats de calculs qui donnent la relation entre la discrimination dans le temps et la largeur de bande du système.

Un système à porteuses multiples sur ondes myriamétriques a également été proposé [CCIR, 1966-69]; il permet de transmettre à la fois des signaux horaires à 1 s et à 10 ms, sans interruption du service de télécommunication. On trouvera dans les références une description théorique de ce système à trois fréquences ainsi que des dispositifs de réception.

Il y a une limite à la précision de repérage que l'on peut réaliser en utilisant plusieurs signaux très voisins les uns des autres. Cette limitation tient au fait que le temps de propagation de groupe T du signal composite est donné par l'expression:

$$T = (\varphi_2 - \varphi_1)/2\pi(f_2 - f_1)$$

où φ_2 et φ_1 désignent les retards de phase subis par les deux fréquences f_2 et f_1 . On peut considérer que la variation des retards de phase sous l'effet de la propagation tend vers zéro lorsque $(f_2 - f_1)$ tend lui-même vers zéro. Toutefois, les effets du bruit additif sont essentiellement indépendants de l'espacement de fréquence. Dans ces conditions, l'écart type du temps de propagation de groupe, σ_T , est donné par [Morgan et Baltzer, 1964]:

$$\sigma_T = (\sqrt{2}\sigma_\varphi)/2\pi(f_2 - f_1)$$

où $\sigma_\phi = \sigma_{\phi 1} = \sigma_{\phi 2}$ désigne l'écart type des retards de phase imputables au bruit additif. A titre d'exemple, on obtient $\sigma_T = 20\,000\ \mu\text{s}$ si $\sigma_\phi = 1\ \mu\text{s}$, $f_1 = 20\ \text{kHz}$ et $f_2 = 20\,001\ \text{Hz}$; par contre, si $f_2 = 20\,100\ \text{Hz}$, on a $\sigma_T = 200\ \mu\text{s}$. Autrement dit, lorsque l'espacement de fréquence diminue, on observe une augmentation de l'erreur introduite par les fluctuations de phase non corrélées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CASSELMANN, C. J. et TIBBALS, M. L. [1958] The Radux-Omega long range navigation system. Proc. Second National Convention on Military Electronics, 385-389.
- CHI, A. R. et WITT, S. N. [1966] Time synchronization of remote clocks using dual VLF transmission. Telemetry Conference Proceedings.
- EGIDI, C. [mai 1968] Narrow-band time signals. Edition anglaise de *Alta Frequenza*, 37, 459-469.
- EGIDI, C. [1969] Narrow-band time signals for VLF and LF standard transmissions. Mem. Acc. Sci. di Torino, Classe Sc. Trs., Mat. e Nat., série 4, 8.
- EGIDI, C. et OBERTO, P. [1964a] Modulazione d'ampiezza con le tre righe spettrali aventi ampiezza e fasi qualunque (Modulation d'amplitude avec trois raies spectrales d'amplitude et de phase quelconques). *Alta Frequenza*, 334d, 144-156, en particulier Fig. 11.
- EGIDI, C. et OBERTO, P. [1964b] General distorted three spectral lines amplitude modulation. *AEÜ*, 18 H. 9, 525-526, en particulier Fig. 10.
- FEY, R. L. et LOONEY, Jr. C. H. [décembre 1966] A dual frequency VLF timing system. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-15, 190.
- JESPERSEN, J. L. [novembre 1967] Signal design for time dissemination and some aspects. NBS Technical Note 357, Boulder, Co., Etats-Unis d'Amérique.
- MORGAN, A. H. [juin 1967] Distribution of a standard frequency and time signals. *Proc. IEEE*, Vol. 55, 6, 827-836.
- MORGAN, A. H. et BALTZER, O. J. [novembre 1964] A VLF timing experiment. *Radio Sci., J. Res. NBS/USNC-URSI*, 68D, Vol. 2, 11, 1219-1222.
- POTTS, C. E. et WIEDER, B. [mai 1972] Precise time and frequency dissemination via the Loran-C system. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 5, 530-539.
- RAULES, A. T. et BURGESS, B. [novembre 1967] Results of the two-frequency VLF transmission experiments from Criggion GBZ. *Radio Sci.*, Vol. 2, 11, 1295-1301.

Documents du CCIR

[1966-69]: VII/34 (Japon).

RAPPORT 271-7

STABILITÉ ET PRÉCISION DE LA RÉCEPTION DES FRÉQUENCES ÉTALON ÉT DES SIGNAUX HORAIRE EN ONDES MYRIAMÉTRIQUES ET KILOMÉTRIQUES

(Question 3/7)

(1963-1966-1970-1971-1974-1978-1982-1986)

La durée de propagation d'un signal en ondes myriamétriques entre un émetteur et un lieu situé à des milliers de kilomètres varie peu d'un jour à l'autre, mais subit des variations cycliques essentiellement diurnes et annuelles, dues à des modifications de l'ionosphère liées à la distance zénithale du Soleil [Azuma, 1966; Iijima et autres, 1968; Decaux et Gabry, 1964]. Des considérations empiriques et théoriques ont permis de prévoir avec précision des durées de propagation qui tiennent compte non seulement des cycles diurnes et annuels précités, mais encore du nombre des taches solaires et de la conductivité de la face inférieure du guide Terre-ionosphère qui transmet les signaux en ondes myriamétriques. Ces durées de propagation sont de temps en temps altérées par des perturbations ionosphériques à début brusque (PIDB), généralement imprévisibles, dont l'effet se fait sentir pendant habituellement 20 à 30 minutes, et par des phénomènes d'absorption due à la calotte polaire, dont l'effet sur l'ionosphère polaire peut durer jusqu'à une semaine [Pierce, 1955; Reder et autres, 1964; Becker et autres, 1973a].

On a constaté que le déphasage accumulé au cours de 24 heures pouvait, le cas échéant, ne pas être nul, mais $\pm 2\pi$ ou un multiple de 2π . La perte de cycle peut se produire dans des circonstances diverses. Elle peut, par exemple, se produire aux plus grandes distances lorsque le rapport entre l'amplitude du premier mode de propagation du guide d'onde et l'amplitude du mode de second ordre est inférieur à l'unité pendant les heures de nuit et supérieur à l'unité pendant les heures de jour [Walker, 1967]. Elle peut aussi se produire par suite d'une «conversion de mode» excessive au point de réception situé dans la direction du lever du Soleil [Ries, 1967]. De plus, si le récepteur est très éloigné de l'émetteur (distances supérieures à 10 000 km), la réception des signaux peut se faire pendant certaines parties de la journée, après transmission, non pas sur le trajet court dans le plan du grand cercle, mais sur le trajet long [Thompson et autres, 1963]. Si la stabilité de l'étalon local est suffisante, on peut reconnaître cette situation et en tenir compte. De tels effets ont été constatés pour les émissions de GBR, NBA et NPM en Australie, les émissions de NBA et NPM en France, et celles de WWVL en Grande-Bretagne.

Parmi les autres variations constatées, il faut citer des variations cycliques dont les périodes sont de 27 jours, 29,53 jours et 14,765 jours. La période de 27 jours est liée à la durée moyenne de la rotation du Soleil; elle a été observée dans les données ionosphériques [Ratcliff, 1960]. Les périodes de 29,53 et 14,765 jours sont respectivement liées aux marées lunaires synodiques et semi-synodiques et on les a observées dans la basse atmosphère [Appleton et Beynon, 1949; Brady et Crombie, 1963; Rastogi, 1969; Chakravarty et Rastogi, 1970].

Dans les systèmes de repérage, il faut tenir compte de l'influence de la dispersion, qui a pour effet de donner des valeurs différentes aux vitesses de phase et aux vitesses de propagation de groupe des ondes myriamétriques et kilométriques. Dans la bande des ondes kilométriques, l'onde de sol subit une dispersion notable lors de sa propagation au-dessus d'un terrain ayant une conductivité de valeur finie. Dans la bande des ondes myriamétriques, il existe deux causes importantes de dispersion. La première est liée à des effets de coupure dans le guide d'onde Terre-ionosphère [Crombie, 1966]. La seconde source de dispersion [Burgess, 1967], qui est moins facile à prévoir, résulte des interférences nocturnes entre plusieurs modes de propagation du guide d'onde; il en résulte des variations périodiques de la vitesse de groupe dans l'espace.

Le service horaire de l'émetteur HBG (75 kHz) situé près de Genève (voir le Rapport 267, Tableau II) dessert une grande partie de l'Europe centrale. Des expériences ont montré que les signaux horaires de HBG peuvent être reçus au moyen de récepteurs simples, avec une précision supérieure à $\pm 50 \mu\text{s}$ à de moyennes distances (100 à 1000 km). La phase de la porteuse présente des fluctuations types inférieures à $\pm 2 \mu\text{s}$ à la distance de 500 km par réception pendant les heures de jour.

L'émetteur de fréquences étalon et de signaux horaires DCF77, qui émet sur 77,5 kHz le signal horaire et la fréquence étalon officiels de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) en République fédérale d'Allemagne est modulé comme suit: au début de chaque seconde, l'amplitude de la porteuse est réduite à 25% environ de son amplitude normale puis, à la fin des repères de seconde, dont la durée est de 0,1 s ou 0,2 s, l'amplitude de la porteuse reprend sa valeur normale.

Les études entreprises par la PTB et par certains constructeurs qui se sont penchés sur ce problème ont montré que des oscillateurs de type courant (par exemple des oscillateurs simples) peuvent être synchronisés de manière plus sûre avec une porteuse résiduelle qu'avec des coupures complètes de la porteuse pendant la durée des repères de temps.

Grâce à la méthode de modulation employée par la PTB, on peut conserver la raideur de la pente du front décroissant. Cette méthode est la suivante: au début de chaque seconde, la commande de l'émetteur est coupée jusqu'à ce que l'amplitude retombe à 25% de sa valeur maximale. La commande est alors renforcée jusqu'à ce que la porteuse atteigne 25% de l'amplitude maximale pendant le repère de temps.

En plus de la modulation d'amplitude avec repères de seconde, la fréquence porteuse de DCF77 est modulée en phase avec du bruit pseudo-aléatoire depuis 1983 en vue d'obtenir une plus grande précision et une protection améliorée contre les perturbations lors de l'émission des signaux horaires. Le bruit de phase pseudo-aléatoire correspond à une séquence aléatoire binaire synchronisée en phase par rapport à la porteuse et aux repères de seconde. Les premiers résultats [Hetzel, 1984] montrent que, à une distance de 300 km de l'émetteur, les signaux horaires obtenus par corrélation sont moins perturbés que ceux obtenus à partir de la pente des repères de seconde démodulés. Durant l'été, la valeur de la dispersion diurne est inférieure à la moitié de la période de la porteuse (soit $< 6,5 \mu\text{s}$).

Une étude a montré [Becker et autres, 1973b] que la réception de fréquences étalon et de signaux horaires de DCF77, fonctionnant sur 77,5 kHz, se fait dans des bonnes conditions en Europe centrale et en Scandinavie. De jour, la phase de la porteuse reçue à une distance de 300 km de l'émetteur (Mainflingen près de Darmstadt, République fédérale d'Allemagne) ne s'écarte que de quelques dixièmes de microseconde de la moyenne, en raison des conditions variables de la propagation; cela donne, à une distance de 300 km, un écart type journalier moyen de la porteuse de $2,1 \times 10^{-12}$ et un écart hebdomadaire moyen de $0,4 \times 10^{-12}$. Les signaux horaires de DCF77 émis à midi ont été reçus avec une dispersion de $37,5 \mu\text{s}$ (moyenne prise sur trois ans) [Becker, 1972; Becker et Hetzel, 1973].

L'Université Libre de Bruxelles a eu recours à une technique numérique pour étudier la stabilité des signaux horaires de MSF (60 kHz) reçus à une distance de 420 km de l'émetteur. Le profil de l'impulsion reçue est échantillonné en 250 points, la qualité est soumise à des mesures et des valeurs moyennes fondées sur quelque 200 impulsions successives sont obtenues à l'aide d'un mini-ordinateur.

On peut prendre comme temps d'arrivée le moment où l'enveloppe du signal atteint un pourcentage nettement défini de l'amplitude moyenne de la porteuse (A_m). Des travaux théoriques et expérimentaux ont montré que l'erreur minimale se produit en un point caractéristique choisi entre 0,75 A_m et 0,9 A_m [Andrews et autres, 1970]. Dans le cadre des études actuelles, la valeur choisie a été 0,85 A_m . Pour les mesures effectuées au milieu du jour – entre 9h 00 et 13h 00 UTC – l'écart type a généralement été compris entre 5 et 10 μ s. Par ailleurs, les fluctuations observées pendant de longues périodes de temps (plusieurs mois) peuvent atteindre 25 μ s, compte tenu du facteur de correction de forme appliqué [Liévin et autres, 1975].

Des études sur une nouvelle forme de modulation pour la diffusion des signaux horaires ont été menées en URSS afin d'améliorer la fiabilité de la synchronisation des générateurs en utilisant comme référence la fréquence porteuse de la station RBU (66 2/3 kHz).

Par rapport aux signaux précédents, la durée des pauses a été ramenée à 5 ms et leur fréquence de répétition a été portée à 10 Hz. Les impulsions de repère et de codage d'une durée de 80 ms utilisées pour identifier les repères des secondes et des minutes sont obtenues par modulation de phase à bande étroite, avec un indice de modulation de 0,698, de deux sous-porteuses décalées de 100 Hz et 312,5 Hz. La bande de garde [Tchérenkov, 1984a] s'est trouvée portée à 50 Hz, ce qui permet de synchroniser les générateurs avec une bande passante équivalente du circuit de commande automatique de phase de 20 Hz environ. La gigue de phase du signal de sortie du générateur à synchroniser (ou du signal de sortie du récepteur ayant la même bande passante), due à la modulation de phase de la porteuse, ne dépasse pas 20 ns.

L'utilisation de la modulation de phase a permis d'utiliser pleinement la puissance maximale de l'émetteur et d'obtenir des puissances d'émission plus élevées pour les impulsions de repère et d'information, à savoir respectivement 0,735 et 0,215 de la puissance maximale de l'émission non modulée [Tchérenkov, 1984b].

L'utilisation de sous-porteuses pour produire les impulsions d'information et de repère permet d'accroître la capacité d'information transmise en modulant en fréquence ou en phase les sous-porteuses pendant les autres intervalles de 80 ms, qui ne sont actuellement pas utilisés. Le fait d'avoir porté à 10 Hz la fréquence de répétition des repères de temps permet de rendre plus précise la détermination de leur position dans le temps, en effectuant la moyenne d'un plus grand nombre de résultats au cours du même intervalle de mesure.

Le Japon a relaté des expériences sur la propagation de signaux sur ondes kilométriques (40 kHz) à une distance de 400 km. L'écart type de la fluctuation de phase journalière a été de 1 μ s en été et de 2 μ s en hiver; la variation saisonnière de la phase du signal à la réception à midi s'élevait à 3,3 μ s.

L'effet des perturbations ionosphériques à début brusque (PIDB) dans la couche D sur la fréquence de temps et d'étalement du Loran-C a été étudié en Chine par l'Observatoire astronomique de Shaanxi (CSAO). Pendant les perturbations, les signaux transmis par l'onde ionosphérique arrivant en avance et renforcés, et certains étant mêlés aux signaux échantillonnés transmis par l'onde de sol, on a observé des excursions de phase des signaux transmis par l'onde de sol de l'ordre de 0,1-2 μ s [Miao et Yang, 1981].

L'expérience [Noonkester, 1972] montre que la durée de propagation des ondes myriamétriques est soumise à des variations lunaires semi-synodiques susceptibles d'avoir des effets sur la diffusion d'informations de temps et de fréquences faite en ondes myriamétriques. On a trouvé que l'amplitude moyenne de la variation de période semi-synodique lunaire est de 0,18 μ s à midi et de 0,52 μ s à minuit, cela sur un trajet nord-sud et pour la fréquence 10,2 kHz. L'amplitude maximale était de 1,3 μ s au cours des mois d'hiver à minuit. On devrait attirer l'attention de ceux qui utilisent les émissions d'ondes myriamétriques pour des informations de temps et de fréquences sur les composantes périodiques que l'on connaît afin qu'ils puissent prévoir l'ordre de grandeur des erreurs.

Pour ce qui est de l'intégration à long terme de la phase reçue, la précision réalisable dépend, dans une large mesure, de la complexité de l'équipement de réception et des méthodes de mesure. Il a été indiqué [Leschiutta, 1968] que, lorsqu'on utilise des oscillateurs à quartz à la station de réception, l'erreur globale accumulée pour des trajets de 1000 à 5000 km est de 25 à 50 μ s par an pour les émissions faites dans les bandes 4 et 5. Toutefois, quand on compare la phase reçue à un étalon atomique et que l'on utilise un récepteur qui peut être étalonné et qui ne perd pas sa référence de phase [Becker et autres, 1969], on peut obtenir de bien meilleurs résultats. Ainsi, les signaux NSS reçus à une distance de 5000 km et enregistrés durant une période de plus de 450 jours subissent des variations de ± 10 μ s au maximum et, de manière générale, inférieures à ± 3 μ s par rapport à la phase moyenne. Ce dernier chiffre correspond à une incertitude de fréquence d'environ 1×10^{-13} au cours d'une année. On peut obtenir une phase encore plus stable à la réception en combinant linéairement la phase de deux émissions sur des fréquences différentes afin de réduire de façon appréciable une bonne partie de l'influence de l'effet solaire; l'amélioration la plus prononcée est obtenue lorsque les comparaisons sont effectuées simultanément dans les deux sens de transmission sur le même trajet avec des porteuses qui ne sont pas trop espacées dans la bande 4. On peut obtenir une exactitude encore plus satisfaisante dans la référence de phase en recourant à des techniques de lissage fondées sur la nature statistique des fluctuations de phase [Becker et autres, 1969; Guetrot et autres, 1969], mais cette technique n'est efficace que durant des périodes assez courtes lorsque le comportement statistique est censé être représentatif du processus.

Lorsqu'on a pu utiliser le Loran-C pour des comparaisons précises de temps, il est devenu plus facile de mesurer les variations de la durée de propagation, ce qui a aussi facilité les comparaisons de temps faites au moyen de la phase des porteuses en ondes myriamétriques (pour les valeurs de phases de Loran-C, voir United States Naval Observatory (USNO) Time Service Announcements, série 4). Ces mesures ont été effectuées pendant

plusieurs années sur un trajet d'environ 5000 km entre l'Amérique du Nord et l'Europe. On a utilisé trois émissions en ondes myriamétriques (NAA, 17,8 kHz; GBR, 16 kHz; Omega-Trinidad 12,0 kHz). Les résultats types sont donnés dans le Tableau I où $\sigma_{\Delta t}(\tau)$ est la variation moyenne (divisée par $\sqrt{2}$) de la différence de temps Δt , se produisant durant le temps de mesure τ . Cette méthode de traitement statistique est due à Kolmogorov [1941], Malakhov [1966a et b] et Allan [1966]. $\sigma_y(\tau)$ est l'incertitude relative d'une comparaison de fréquence durant le temps de mesure τ .

TABLEAU I — *Fluctuations types du temps de propagations des signaux à ondes myriamétriques, entre l'Amérique du Nord et l'Europe*

τ (jours)	$\sigma_{\Delta t}(\tau)$ (μ s)	$\sigma_y(\tau)$ (10^{-12})
1	1,9	31
10	2,6	4,2
100	3,7	0,61
1000	5,3	0,09

De la même manière, on a mis en évidence des influences saisonnières sur $\sigma_{\Delta t}(\tau)$ ainsi que des corrélations annuelles et semi-annuelles des fluctuations de la propagation. Du fait de la corrélation entre valeurs adjacentes, la possibilité d'améliorer la précision des mesures en prenant des moyennes est restreinte. Dans le cas le plus favorable, l'erreur de mesure est diminuée de moitié (de 2,2 à 1,1 μ s) lorsque, au lieu d'utiliser une seule valeur journalière, on fait la moyenne de 100 valeurs journalières.

Dans les expériences plus récentes effectuées à NPL (Inde), les résultats de l'intégration à long terme de la porteuse GBR ont été comparés, indirectement avec les mesures Loran-C et directement par l'intermédiaire d'une liaison avec un satellite géosynchrone. Sur un an, on est parvenu à une précision en fréquence de quelque 10^{-14} et de 1-2 μ s pour le temps [Sen Gupta et autres, 1980; Mathur et autres, 1980].

Pour le rétablissement d'une relation de phase en ondes myriamétriques, on a mis au point plusieurs méthodes de mesure, ainsi qu'une technique d'étalonnage pour mesurer le retard dû à l'antenne et au récepteur [Becker et autres, 1973a; Becker, 1973]. Cette méthode fait usage d'un signal d'essai contrôlé par une chaîne de division parallèle qui engendre l'échelle de temps. Si l'on utilise cette méthode pour rétablir la relation de phase perduë, on obtient une erreur moyenne de 1,1 μ s si l'interruption est de courte durée, et les valeurs avant et après l'interruption sont corrélées. Si la durée de l'interruption est longue, par exemple plus de 60 jours, les valeurs mesurées avant et après l'interruption ne sont pas corrélées et on peut s'attendre à une erreur moyenne de 4,7 μ s.

On connaît d'autres techniques d'identification du cycle. L'emploi de deux signaux à ondes myriamétriques cohérents pour la transmission du temps a été proposé pour la première fois en 1962 [Morgan, 1962], puis confirmé par les faits en 1966 [Chi et Witt, 1966; Fey et Looney, 1966]. Il s'agit d'une méthode de rétablissement du temps en deux étapes. Les mesures de phase des signaux à ondes myriamétriques servent à déterminer la différence de temps de moins d'un cycle entre les horloges, aux emplacements d'émission et de réception; la différence de phase entre le signal reçu et le signal localement engendré dans le cas de deux signaux émis de façon cohérente sert à déterminer le cycle de porteuse de l'un des signaux reçus (temps brut). La station expérimentale WWVL du National Bureau of Standards (Fort Collins, Colorado) a été utilisée de 1964 à 1968 pour ces essais de faisabilité. Les fréquences émises étaient 19,9 et 20 kHz. On a fait des essais avec des espacements de fréquence plus grands, jusqu'à 700 Hz. On a constaté qu'au-dessus de 500 Hz, l'identification du cycle était moins bonne en raison de ce que l'effet de dispersion de fréquence du milieu de propagation était plus prononcé.

Le système de navigation Omega à ondes myriamétriques fait appel à des émissions d'ondes myriamétriques sur plusieurs fréquences pour diffuser des informations de temps et de fréquences, selon une technique dont les avantages sont bien établis [Swanson et Kugel, 1972]. Ces émissions constituent une source utile et précise de fréquence et de temps et le système Omega doit ainsi contribuer à rehausser le rôle que jouent les ondes myriamétriques dans ces questions. Le système Omega comporte finalement huit stations, assurant une couverture mondiale permanente et redondante. La phase de l'onde émise par chaque station est obtenue à partir d'un ensemble de quatre étalons de fréquence au césium; chaque station émet des fréquences de navigation en partage dans le temps toutes les dix secondes. Les quatre fréquences de navigation sont 10,2, 11,05, 11½ et 13,6 kHz. Chaque station peut, de plus, rayonner sur une fréquence supplémentaire dans la gamme de 11,8 à 13,1 kHz, d'où il est possible d'extraire des informations de temps ou de fréquence. Le Rapport 267 donne, en son Tableau III, la liste de ces émissions supplémentaires.

On a commencé à étudier [Chi et autres, 1972] des récepteurs de signaux de temps précis fonctionnant sur deux fréquences. Des essais de réception effectués en 1973 et 1974 sur les fréquences 13,10 et 12,85 kHz émises par la station Omega du Dakota du Nord, ont abouti à une identification fiable du cycle pour des trajets de longueur atteignant 7000 km [Chi et Wardrip, 1973 et 1974]. D'autres essais, sur des trajets allant jusqu'à 15 000 km, ont été fait à l'aide d'émissions expérimentales des stations Omega du Dakota du Nord et d'Hawaï.

Les émissions d'ondes myriamétriques à grande portée et de phase stable sont une source potentielle de signaux de référence de temps pour la comparaison internationale du temps avec une précision de $\pm 1 \mu\text{s}$.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLAN, D. W. [février 1966] Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 2, 221-230.
- ANDREWS, D. H., CHASLAIN, C. et DE PRINS, J. [1970] Reception of low frequency time signals. *Phase and Frequency Instabilities in Electromagnetic Wave Propagation*. (Ed. by Davies-Technivision Services), 198-218.
- APPLETON, E. V. et BEYNON, W. J. G. [1949] Lunar oscillations in the D-layer of the ionosphere. *Nature*, Vol. 164, 308.
- AZUMA, Y. [janvier 1966] Results of the phase measurement of VLF radio waves received from NPG/NLK. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 13, 13-23.
- BECKER, G. [1972] Aussendung und Empfang des Zeitmarken- und Normal-Frequenzsenders DCF77 (Emission et réception de DCF77). *PTB-Mitt.*, 82, 224.
- BECKER, G. [1973] Längstwellenausbreitung während der Sonnenaktivität im August 1972 (Propagation des ondes myriamétriques en période de grande activité solaire: août 1972). *PTB-Mitt.*, 83, 147.
- BECKER, G., FISCHER, B. et KRAMER, G. [1969] Methoden und Ergebnisse im internationalen Zeitvergleich mit Längswellen (Méthode utilisée et résultats obtenus dans la comparaison internationale du temps au moyen d'ondes très longues). Actes du Colloque international de chronométrie, A-22, Série A, Paris.
- BECKER, G., FISCHER, B. et HETZEL, P. [1973a] Langzeituntersuchungen über die Unsicherheit von Zeit- und Frequenzvergleichen mittels Längswellen (Recherches à long terme sur l'erreur des comparaisons de temps et de fréquences en ondes myriamétriques). *PTB-Mitt.*, 83, 222.
- BECKER, G., FISCHER, B. et HETZEL, P. [1973b] Methoden zum Vergleich und zur Verbreitung von Zeitskalen (Méthodes de comparaison et de dissémination des échelles de temps). *Kleinheubacher Berichte*, 16, 5-38.
- BECKER, G. et HETZEL, P. [1973] PTB-Jahresbericht 1972 (Rapport du PTB pour l'année 1972), 107, Braunschweig.
- BRADY, A. H. et CROMBIE, D. D. [octobre 1963] Studying the lunar tidal variations in the D-region of the ionosphere by means of very low frequency phase variations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68-4, 19, 5437-5442.
- BURGESS, B. [novembre 1967] On the propagation delay of modulated VLF waves transmitted over great distances. IEE Conf. Publ., 36, 164-168.
- CHAKRAVARTY, S. C. et RASTOGI, R. G. [mai 1970] Lunar tide in D-region of the ionosphere near the magnetic equator. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 32, 1, 945-948.
- CHI, A. R., FLETCHER, L. A. et CASSELMANN, C. J. [octobre 1972] Omega time transmissions and receiver design. Proc. National Electronics Conference, Vol. 27, 268-273.
- CHI, A. R. et WARDRIP, S. C. [décembre 1973] Clock synchronization experiments using Omega transmissions. Proc. 5th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md 20771, Etats-Unis d'Amérique), 369-392.
- CHI, A. R. et WARDRIP, S. C. [décembre 1974] Recent field test results using Omega transmissions for lock synchronization. Proc. 6th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting (US Naval Research Laboratory, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique), 187-197.
- CHI, A. R. et WITT, S. M. [avril 1966] Time synchronization of remote clocks using dual VLF transmissions. Proc. 20th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703, avril 1966), 588-611 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- CROMBIE, D. D. [mars 1966] The effect of waveguide dispersion on VLF timing systems. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-15, 322-323.
- DECAUX, B. et GABRY, A. [janvier 1964] Some particular observations on diurnal phase variations of VLF transmissions received in Paris. *Radio Sci. J. Res. NBS/USNC-URSI*, Vol. 68D, 1, 21-25.
- FEY, R. L. et LOONEY, C. H., Jr. [décembre 1966] A dual frequency VLF timing system. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-15, 4, 190-195.
- GUETROT, A., HIGBIE, L. S., LAVANCEAU, J. et ALLAN, D. W. [mai 1969] Proc. of the 23rd Annual Symposium on Frequency Control Atlantic City, NJ, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- HETZEL, P. [1984] Zeitübertragung über den Sender DCF77 durch pseudo-zufälliges Phasenrauschen des Trägers (Emission de signaux horaires par l'émetteur DCF77 au moyen d'une modulation de phase de la porteuse par du bruit pseudo-aléatoire). Proc. 11th International Congress of Chronometry, Besançon, France, 1A, 6.
- IJIMA, S., TORAO, M. et FUJIWARA, K. [1968] Phase variations of VLF waves, GBR and GBZ, as received. *Tokyo Astr. Obs. Ann.*, Vol. 11, 1-28.

- KOLMOGOROV, A. N. [1941] *DAN SSSR*, Vol. 32, 19 et Vol. 30, 299.
- LESCHIUTTA, S. [1968] Conservazione a lungo termine di scale di tempo. (Conservation à long terme des échelles de temps). Proc. Colloquium on problems of time determination, keeping and synchronization, Milan-Brera, 111-132.
- LIEVIN, J. C., GUILLAUME, F. et DE PRINS, J. [1975] Méthode digitale de mesure des signaux horaires à BF et TBF. Laboratoire des Etalons de Fréquence (ULB). Rapport interne N° 64.
- MALAKHOV, A. N. [1966a] Spectral-correlational analysis of signals with non-integrable spectra. *Radiofizika*, Vol. 9, 595.
- MALAKHOV, A. N. [1966b] Shape and width of the spectral line of oscillations in the presence of non-stationary frequency fluctuations. *Radiofizika*, Vol. 9, 625.
- MATHUR, B. S., BANERJEE, P., SOOD, P. C., SAXENA, M., KUMAR, N., et SURI, A. K. [1980] Precise T & F intercomparison between NPL, India and PTB, Federal Republic of Germany via Satellite Symphonie-I. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md, Etats-Unis d'Amérique).
- MIAO, Y. et YANG, K. [1981] The effect of the solar X-ray burst on the timing and calibrating frequency of long wave. Publication de l'Observatoire d'astronomie de Shaanxi, 1, 35-42.
- MORGAN, A. H. [juillet 1962] A new method of time signal modulation and demodulation of VLF carriers. US National Bureau of Standards, Report 7286.
- NOONKESTER, V. R. [novembre 1972] D-region lunar variations deduced from long path 10.2 kilohertz phase measurements. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 33, 6592-6598.
- PIERCE, J. A. [1955] The diurnal carrier phase variations of a 16 kc/s transatlantic signal. *Proc. IRE*, 43, 584-588.
- RASTOGI, R. G. [mai 1969] Lunar tidal oscillations in ionospheric absorption at Colombo. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 31, 759-761.
- RATCLIFF, J. A. [1960] *Physics of the Upper Atmosphere*. Academic Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- REDER, F. H., ABOM, C. J. et WINKLER, G. M. R. [1964] Precise phase and amplitude measurements on VLF signals propagated through the arctic zone. *Radio Sci. J. Res. NBS/USNC-URSI*, Vol. 68D, 3, 275-281.
- RIES, G. [juin 1967] Results concerning the sunrise effects of VLF signals propagated over long paths. *Radio Sci.*, Vol. 2 (nouvelle série), 531-538.
- SEN GUPTA, A., GOEL, G. K. et MATHUR, B. S. [1980] Precise T & F intercomparison via VLF phase measurements. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, NASA (Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md, Etats-Unis d'Amérique).
- SWANSON, E. R. et KUGEL, C. P. [1972] VLF timing: conventional and modern techniques including Omega. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 540-551.
- TCHERENKOV, G. T. [1984a] Kharakteristiki etalonnykh signalov tchastoty i vremeni, peredavaemykh tcherez spetsializirovannye radiostantsii (Caractéristiques des signaux de fréquences étalon et de temps émis par des stations radioélectriques spécialisées). *Izm. Tekhn.*, 1, 22.
- TCHERENKOV, G. T. [1984b] Ispolzovanie fazovoï modoulyatsii dlya peredatchi etalonnykh signalov (Emploi de la modulation de phase pour l'émission de signaux étalon). *Izm. Tekhn.*, 1, 24.
- THOMPSON, A. M., ARCHER, R. W. et HARVEY, I. K. [novembre 1963] Some observations on VLF standard-frequency transmissions as received at Sydney NSW. *Special International Issue of IEEE*, Vol. 51, 11.
- WALKER, D. [novembre 1967] Cycle slipping of VLF signals during sunrise and sunset. IEE Conf. Publ. 36, 169-173.

RAPPORT 363-6

MÉTHODES APPLIQUÉES POUR LE TRANSFERT ET LA DIFFUSION DES FRÉQUENCES ÉTALON ET DES SIGNAUX HORAIRES

(Programme d'études 3C/7)

(1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Dans le transfert et la diffusion des fréquences étalon, et des signaux horaires, on a introduit de nouvelles méthodes spécialement adaptées à la comparaison d'horloges atomiques au sein d'un système international de diffusion de temps coordonné. Toutefois, ces applications dépassent de beaucoup l'usage plus traditionnel d'un service de fréquences étalon et de signaux horaires tel qu'il existait lorsque les premières horloges atomiques ont été mises en service sur une grande échelle. Comparé à une possibilité d'évaluer le temps à la milliseconde près (ce qui correspond aux besoins types de la grande majorité des usagers du service de fréquences étalon et de signaux horaires), l'utilisation d'étalon atomique nécessite que les incertitudes sur les mesures soient aussi faibles que possible. Le meilleur résultat obtenu jusqu'ici dans une comparaison à longue distance a été une incertitude sur la mesure approchant 1 ns.

Le présent Rapport passe en revue les principes généraux utilisés et donne une vue d'ensemble des diverses caractéristiques et des expériences acquises en employant ces méthodes lors d'essais et en exploitation.

2. Situation générale

2.1 *Nécessités pour la diffusion opérationnelle du temps coordonné*

Contrairement aux besoins d'accès immédiat à une source fiable de signaux horaires, comme c'est le cas pour la grande majorité des usagers du service des fréquences étalon et des signaux horaires, les mesures requises pour la diffusion internationale du temps coordonné nécessitent des moyens très précis de transfert des signaux horaires, ces moyens n'étant utilisés qu'occasionnellement. Le coût des appareils n'est pas la préoccupation principale, car l'objectif essentiel est la précision et la reproductibilité des mesures. Pour ces raisons, de nombreuses méthodes ont été utilisées même si on ne pouvait les considérer comme applicables à des systèmes opérationnels au sens courant du terme. A titre d'exemple, on peut citer le Système mondial de positionnement (GPS) qui a été utilisé pour le transfert de signaux horaires bien avant qu'il ne puisse être accepté comme système de navigation opérationnel. Un autre exemple serait l'utilisation de la radio-interférométrie à très longue base (RILB) pour des comparaisons temporelles ou la «visibilité commune», technique applicable à n'importe quelle source de signaux, réglés sur le temps ou non.

2.2 *Corrections dues aux effets relativistes pour le transfert des signaux horaires de très grande précision*

Le Rapport 439 expose les principes et donne des formules pour les corrections relativistes qui doivent être appliquées dans tous les cas où l'exactitude nécessaire est de l'ordre de 100 ns ou mieux.

2.3 *Largeur de bande et rapport signal/bruit dans le transfert des signaux horaires de grande précision*

Des mesures de temps d'arrivée à faible incertitude nécessitent une grande largeur de bande proportionnée à cette précision. Ceci est dû à deux raisons: premièrement, le temps de montée doit être minimisé pour réduire les incertitudes au déclenchement et deuxièmement, les variations du temps de propagation d'une extrémité à l'autre des circuits de mesure doivent également être minimisées. Ces variations représenteront un certain pourcentage du temps de propagation lui-même. C'est pourquoi la largeur de bande avant détection doit être aussi importante que possible. Le rapport signal/bruit disponible fixera seul le temps d'intégration (largeur de bande après détection) nécessaire pour faire une mesure avec une incertitude donnée. En pratique, ceci conduit à accroître l'importance des techniques d'étalement du spectre pour les systèmes de transfert des signaux horaires. On doit faire la distinction entre la largeur de bande nécessaire pour un débit d'informations donné et la largeur de bande équivalente du signal utile. Dans le cas du GPS, la largeur de bande équivalente du code C/A est de 1 MHz tandis que le transfert réel d'informations (le message de navigation) s'écoule au taux modeste de 50 Bd. Toutefois, les mesures de temps sont effectuées en utilisant les transitions rapides de la modulation par étalement du spectre et donc profite de la largeur de bande complète disponible du code. Dans le cas de Loran-C, un système de navigation à B.km largement utilisé pour la diffusion des signaux horaires, la largeur de bande équivalente du signal est de 20 kHz (le signal est à impulsions) et il n'y a pas de transmission d'information. L'incertitude sur le signal horaire est de quelques dixièmes de microseconde (1% de 50 μ s, soit 0,5 μ s, ce qui confirme à nouveau la règle empirique selon laquelle l'incertitude est limitée à environ 1% de l'inverse de la largeur de bande équivalente). Si l'on veut disposer d'un exposé plus général sur les techniques d'étalement du spectre, consulter [Dixon, 1976]. Un autre avantage de l'utilisation des techniques d'étalement du spectre consiste en une réduction notable de la sensibilité au brouillage à la réception en zones urbaines (les harmoniques de télévision peuvent poser des problèmes importants) et en une réduction de la tendance aux variations du temps de propagation du circuit due aux variations de l'occupation de la largeur de bande du signal. Ce dernier effet est la principale source d'erreurs dans la réception des signaux horaires et des fréquences étalon en bande décimétrique. D'autre part, une largeur de bande importante peut également être une source de difficultés si des phénomènes de dispersion ou de trajets multiples apparaissent dans le canal.

2.4 *Comparaison entre le transfert des signaux horaires dans un seul sens et le transfert de signaux horaires dans les deux sens*

La méthode à un seul sens, c'est-à-dire dans le sens de la réception uniquement, peut donner une grande précision, à condition que l'on puisse supposer que le temps de propagation sur le trajet est fixe (dans ce cas, on doit le mesurer une fois pour toutes), ou qu'on puisse le connaître d'une autre manière. Ceci explique la possibilité d'utilisation des systèmes électroniques de navigation pour la diffusion des signaux horaires, en effet, ces systèmes ont été conçus essentiellement pour donner une information de position, c'est-à-dire un temps de propagation. Dans ces systèmes, l'utilisateur n'a pas à émettre ce qui est une nécessité pour les systèmes à deux sens. Au contraire, un échange presque simultané des signaux dans les deux sens permet de déterminer facilement le temps de propagation si l'on suppose la réciprocité. Cependant, on doit vérifier cette hypothèse d'une manière ou d'une autre avant de pouvoir utiliser avec confiance une méthode à deux sens, de transfert des signaux horaires. C'est pourtant, en principe, celle qui permet d'obtenir les plus faibles incertitudes.

2.5 *Conséquences du choix des fréquences (bandes Mm-fréquences optiques)*

Alors que les fréquences relativement basses jusqu'à et y compris la bande décimétrique ont été, dans le passé, l'ossature des transferts de signaux horaires, toutes les méthodes de très hautes précisions nécessitent une influence de l'ionosphère aussi réduite que possible. C'est la raison pour laquelle les bandes métriques et les bandes supérieures sont de plus en plus employées. Il convient cependant de se rappeler qu'avec l'augmentation de la fréquence qui entraîne la diminution de l'influence de l'ionosphère, très vite la troposphère devient un

facteur important. C'est, en particulier, la vapeur d'eau qui se révèle créer plus de difficultés qu'on ne s'y attendait en raison des variations rapides et irrégulières sur la ligne de visibilité de la teneur en vapeur d'eau que l'on a mesurée par différents moyens. Ceci milite intensivement en faveur des fréquences optiques (lasers) pour un transfert de signaux horaires de précision extrêmement élevée. (Pour les détails, voir le Rapport 271.)

2.6 Comparaisons entre liaisons par satellite et liaisons terrestres hyperfréquences

Les liaisons par satellite présentent le grand avantage de disposer d'une largeur de bande importante et de liaisons en visibilité directe aux fréquences pour lesquelles l'influence de l'ionosphère peut être réduite à son minimum. Contrairement aux lignes de liaisons à hyperfréquences terrestres, elles présentent l'inconvénient notable d'avoir un long délai de propagation qu'il faut continuellement déterminer. On peut s'attendre à un développement massif de la technologie des liaisons par fibre optique au cours de la présente décennie, en remplacement des liaisons hyperfréquences. Il reste à voir jusqu'à quel point on pourra obtenir une diffusion des signaux horaires de haute précision par l'intermédiaire de câbles optiques à longue distance. Actuellement, le transfert de signaux horaires de grande précision est entièrement basé sur la technologie des satellites et il utilise des systèmes de télécommunications et de navigation par satellite.

2.7 Mesures de temps commandées par ordinateur en utilisant la visibilité commune et des sources multiples de diffusion des signaux horaires

Le bas prix des mini- et micro-ordinateurs a introduit encore une autre dimension dans les comparaisons réciproques de temps à longue distance et dans leur technique de mesures. On a mis en œuvre des stations de diffusion de signaux horaires entièrement automatiques et commandées à distance qui exécutent des mesures régulières de signaux en visibilité commune ou de tous les signaux horaires disponibles à l'emplacement considéré. Un ordinateur central recueille les données, filtre les mesures et établit leur corrélation avec les mesures provenant d'ailleurs. Le résultat est alors renvoyé à la station pour impression locale et utilisation. Plusieurs de ces systèmes ont fait l'objet de rapports par l'USNO [Wheeler, 1983] et par le NBS [Allan et Weiss, 1980; Stein et autres, 1983]. Un des systèmes NBS utilise un récepteur NBS conçu pour fonctionner avec le GPS tandis qu'un autre a été conçu pour permettre la réception des émissions soit Loran-C, soit WWVB. Le système USNO n'a utilisé que des appareils commerciaux de très bonne qualité comme les récepteurs automatiques Loran-C ou des appareils de transfert de signaux horaires GPS du commerce. Ces systèmes peuvent être adaptés aux impératifs particuliers des emplacements éloignés [Wheeler, 1983]. Dans le cas de l'emploi d'un récepteur GPS dans un emplacement éloigné, on a relevé des incertitudes de l'ordre de 10 ns et une précision de quelques ns [Allan et autres, 1985].

3. Vue d'ensemble des méthodes utilisées pour le transfert des signaux horaires et des fréquences étalon

3.1 Comparaison utilisant des signaux dans les bandes 4 à 7 et par l'intermédiaire d'horloges portatives

Ces méthodes ont été couramment employées pendant vingt ans, mais à présent on doit reconnaître que leur importance va en décroissant, sauf pour les exceptions suivantes:

- bandes Mam: dans les régions reculées, les émissions stabilisées en fréquence du réseau de navigation Omega et également d'un certain nombre de stations de radiocommunications à puissance élevée peuvent servir de références de phase peu coûteuses. Ces émissions sont effectivement utilisées pour la navigation aérienne de petits aéronefs. Les possibilités de diffusion de signaux horaires ont été exposées par J. Guinot [1968 et 1969] (voir aussi le Rapport 271);
- les émissions stabilisées en fréquence dans la bande km telles que WWVB, DCF77, HBG, MSF sont encore utilisées par un grand nombre de récepteurs de code de temps qui sont automatiquement maintenus en synchronisme avec des exactitudes de l'ordre de la milliseconde. La poursuite de phase a pratiquement été abandonnée en raison des difficultés causées par l'ambiguïté de cycle et des brouillages entre quelques-unes de ces stations;
- dans le système Loran-C, l'introduction de récepteurs complètement automatiques a éliminé le problème d'identification de cycle. Le système Loran-C est encore largement disponible et demeure la meilleure méthode courante de comparaison lorsque des incertitudes de quelques dixièmes de microsecondes (dues, entre autres, à des variations saisonnières [De Jong, 1984]), sont acceptables et où la couverture par l'onde de sol est bien assurée (ce qui est le cas de la plus grande partie de l'hémisphère nord), [Potts et Wieder, 1972] (voir également le Rapport 271);
- le service de fréquence étalon et de signaux horaires dans la bande décimétrique demeure la principale source de diffusion des signaux horaires pour les navires, les radioamateurs et autres usagers qui apprécient son coût peu élevé et qui se satisfont d'incertitudes de l'ordre de quelques millisecondes [Ogawa, 1985] (voir également [Iijima et autres, 1978]);
- les horloges portatives qui ont montré à l'occasion d'essais effectués à l'échelle mondiale, leur aptitude à fournir des incertitudes de quelques dixièmes de nanosecondes [Hafele et Keating, 1972], seront probablement moins utilisées à l'avenir en raison de l'apparition de méthodes de haute précision faisant appel à des satellites comme le GPS ou à des liaisons commerciales par satellite à canaux à large bande.

3.2 *Télévision*

La télévision est un système électronique synchronisé et comme tel on peut l'utiliser pour des comparaisons de temps. En raison de l'existence de systèmes différents comme le NTSC, le PAL, le SECAM, etc. ... et des difficultés de détermination du temps de propagation exact pour chacune de ces comparaisons réciproques, en particulier sur de longues distances, la méthode a trouvé ses principales applications dans la réception simultanée d'un émetteur dans sa zone de couverture locale. Une méthode originale et plus prometteuse consiste en la réception de programmes de télévision par satellite à condition que la position du satellite puisse être obtenue par ailleurs et avec une précision suffisante, par exemple, des autorités d'exploitation. D'importants essais ont été effectués entre des stations situées en Autriche, au Pays-Bas, au Royaume-Uni et en République fédérale d'Allemagne [De Jong, 1984]. Aux Etats-Unis d'Amérique, l'utilisation largement répandue de synchroniseurs de trame a mis fin à l'utilisation à longue distance de la télévision pour la diffusion des signaux horaires car ces dispositifs mémorisent une trame complète et la réémettent avec l'horloge locale comme référence de temps. Pour plus de détails à ce sujet, voir les Rapports 1016 et 897.

3.3 *Synchronisation intercontinentale des horloges par radio-interféromètre à très longue base (RILB)*

Les caractéristiques fondamentales des RILB ont été décrites par Klemperer [1972] qui présente une longue liste de références et spécifie la précision et les limitations fondamentales de ces systèmes. Clark [1972] étudie également leurs caractéristiques fondamentales et indique un certain nombre de programmes expérimentaux actuels utilisant ces interféromètres. Il semble possible d'obtenir une précision de 10^{-13} à 10^{-14} pour la comparaison des fréquences et de l'ordre de 1 ns pour la synchronisation des horloges.

Les largeurs de bande de 10 à 100 MHz nécessaires pour la synchronisation des horloges avec une résolution de 1 à 10 ns peuvent être obtenues en appliquant les techniques de synthèse de largeur de bande, décrites par Hinteregger et autres [1972] et Rogers [1970].

En principe, la stabilité du maser à hydrogène n'est pas nécessaire pour la synchronisation des horloges: en fait, on a utilisé des oscillateurs au rubidium lors de démonstrations effectuées avec un système prototype. Une série de trois expériences a été faite entre les stations de la NASA de Madrid (Espagne) et de Goldstone (Californie) [Hurd, 1972]. La mesure a permis d'obtenir une résolution de 50 à 500 ns (1σ), selon la quantité de données utilisées, mais l'exactitude obtenue dans le calcul des écarts entre les horloges n'a pu être vérifiée qu'à 10 μ s près environ.

Si l'on dispose d'un nombre suffisant de données et d'une largeur de bande suffisante (50 MHz), la principale limitation de la méthode de synchronisation RILB est, semble-t-il, la difficulté de déterminer le temps de propagation global du système et notamment le temps de propagation atmosphérique (ionosphérique).

3.4 *Satellites*

On effectue avec succès depuis 1962 des comparaisons expérimentales de temps sur de longs trajets passant par des satellites artificiels. On a appliqué des techniques unidirectionnelles et bidirectionnelles, qui présentent chacune certains avantages. En mode unidirectionnel, un usager reçoit simplement le signal horaire, qui provient soit d'une horloge de bord, soit d'un autre endroit à la surface de la Terre et qui est alors transmis par un répéteur de satellite. L'usager, qui n'a pas à émettre de signaux, peut donc utiliser un équipement simple; beaucoup d'utilisateurs peuvent donc être desservis simultanément en mode de radiodiffusion. Toutefois, étant donné que le temps de propagation sur le trajet doit être déterminé par calcul ou étalonnage, au moyen d'une autre technique, les transferts unidirectionnels de signaux horaires se caractérisent généralement par des incertitudes plus grandes que ce n'est le cas avec les méthodes bidirectionnelles. Selon la méthode et le coût, on peut obtenir une précision de l'ordre de quelques μ s à quelques ns.

Les techniques aller-retour comportent l'échange de signaux horaires entre deux emplacements à la surface de la Terre, un répéteur de satellite transmettant des signaux presque simultanément dans un sens et dans l'autre. Il faut alors disposer d'un équipement plus complexe, car l'utilisateur doit pouvoir émettre lui aussi, mais on obtient généralement des incertitudes moindres dans le transfert de signaux horaires, étant donné qu'il est possible de mesurer directement, et par conséquent de compenser, le temps de propagation sur le trajet. Les techniques bidirectionnelles permettent le transfert de signaux horaires, dans les meilleures conditions actuellement possibles à de petits nombres d'utilisateurs disposant d'un équipement complexe et qui ont besoin de cette précision supérieure. On en trouve un exemple dans les nombreuses expériences effectuées avec le satellite Symphonie.

On trouvera des descriptions, des comparaisons et des références plus complètes relatives à ces techniques ou systèmes d'utilisation de satellites et à d'autres dans le Rapport 518.

3.5 *Autres méthodes*

On peut combiner plusieurs méthodes de comparaison des échelles de temps. En République fédérale d'Allemagne, on a utilisé des impulsions de télévision en liaison avec la fréquence étalon à ondes kilométriques et les signaux horaires diffusés par l'émetteur DCF77. Le repère de seconde sur ondes kilométriques permet d'identifier une impulsion de télévision qui permet, à son tour, d'identifier un cycle de porteuse, de DCF77 [Becker et autres, 1973]. De même, on peut utiliser des signaux à ondes kilométriques et myriamétriques, si ceux-ci sont émis en synchronisme.

On a proposé d'utiliser des lignes de transport d'énergie pour la synchronisation. Les essais effectués au Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) et en Italie ont montré que la précision est généralement de 0,25 à 0,5 ms sur une distance de 200 km, avec possibilité de déphasage en raison de la commutation des lignes [Becker et Enslin, 1973; Angelotti et Cordare, 1974]. Des résultats analogues ont été obtenus aux Etats-Unis, même sur des trajets de plus de 2000 km [Allan et autres, 1972].

Des expériences ont été effectuées [Norton et autres, 1962] sur l'instabilité introduite par la propagation par liaison hertzienne en visibilité directe sur un trajet de 50 km. La dégradation de la stabilité de phase de l'onde transmise, due à la propagation, est en général plus faible que les fluctuations inhérentes au signal dues au bruit de l'oscillateur. Pour un temps de mesure de 1 s, l'instabilité due à la propagation peut se représenter par une erreur type de 3×10^{-12} , qui se réduit à 1×10^{-14} pour un temps de mesure de 10^6 s.

En URSS, des expériences de synchronisation bidirectionnelle ont été effectuées sur un trajet de 750 km, de Moscou à Kharkov, et l'on a observé des signaux à 72 MHz réfléchis par des trainées de météores [Dudnik et autres, 1971; 1973]. Avec une puissance d'émission de 40 kW, on a pu procéder à 5620 mesures réussies de synchronisation. Après compensation du temps de propagation sur le trajet, la précision de synchronisation obtenue était de l'ordre de 0,1 à 0,2 μ s. Des inégalités éventuelles de temps de propagation dues à l'équipement sur les voies aller et retour sont considérées comme étant les principales sources d'erreur actuellement.

Des expériences ont été effectuées en France en 1974 pour déterminer jusqu'à quel point deux horloges espacées de 6 km pouvaient être synchronisées par une méthode d'échange bidirectionnel d'impulsions de laser permettant de compenser le temps de propagation. Au cours d'une série d'expériences, l'écart entre les deux horloges a été déterminé avec une incertitude de 4 ns. En utilisant des détecteurs laser de meilleure qualité sur un trajet de 300 m, l'incertitude a été ramenée à moins de 1 ns [Sannier, 1974; Besson, 1974; Besson et Parcelier, 1974]. De nouvelles améliorations ont été apportées à l'équipement de commande de l'impulsion de synchronisation, ce qui permet d'obtenir une résolution de 100 ps pour un système d'émission et de réception [Moreau, 1977].

Une expérience commune a été effectuée en 1977 entre la France et l'Espagne; il s'agissait d'établir une comparaison entre les échelles de temps des Observatoires de Paris (OP) et de San Fernando (OMSF) grâce au survol des deux observatoires par un avion muni d'un rétro réflecteur, d'un émetteur à laser et de l'équipement chronométrique nécessaire. La différence UTC(OP) – UTC(OMSF) a été déterminée avec une précision de 20 ns [Benavente et autres, 1979].

TABLEAU I – Comparaison de méthodes de transfert de signaux horaires
(Situation en 1985)

Système/Méthode	Couverture	Coût de l'équipement (en milliers de \$US)	Caractéristiques	Notes
Oméga (B.Mam)	Mondiale	5-25	2 μ s/jour	Référence de fréquence
Loran-C (B.km)	Régionale, hémisphère nord	3 1 10	1 μ s 100 ns-2 μ s ⁽¹⁾ 100 ns ⁽¹⁾	Automatique, code horaire Manuel Automatique
Signaux horaires (B.dam)	Mondiale	0,2	1 ms	Entraînement des opérateurs
GOES	Amérique	4	50 μ s	Automatique, code
TRANSIT	Mondiale	14	10-25 μ s	Automatique, code
GPS	Mondiale	25	10 ns	Automatique code
Satellite de télécommunications	Point à point	100	1 ns	Deux sens, émission/réception

(¹) Compte non tenu des trajets à propagation ionosphérique et terrestres.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLAN, D. W., DAVIS, D. D., WEISS, M., CLEMENTS, A., GUINOT, B., GRANVEAUD, M., DORENWENDT, K., FISCHER, B., HETZEL, P., AOKI, S., FUJIMOTO, M. K., CHARRON, L. et ASHBY, N. [juin 1985] Accuracy of international time and frequency comparisons via global positioning system satellites in common-view. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 118-125.
- ALLAN, D. W., MACHLAN, H. E. et MARSHALL, J. [6-8 juin 1972] Time transfer using nearly simultaneous reception times of a common transmission. Proc. 26th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 309-316 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- ALLAN, D. W. et WEISS, M. A. [mai 1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphie, PA, Etats-Unis d'Amérique (NJ 07703) 334-347 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006).
- ANGELOTTI, E. et CORDARE, F. [1974] IEN time and frequency dissemination. Proc. Time Determination, Instrumentation and Synchronization, Cagliari, 207-233.
- BECKER, G. et ENSLIN, H. [1973] Zeitübertragung mit dem Wechsellkomnetz (transmission de temps par l'intermédiaire du réseau électrique à courant alternatif), *PTB Jahresbericht*, 135.
- BECKER, G., FISCHER, B. et HETZEL, P. [1973] Methoden zum Vergleich und zur Verbreitung von Zeitskalen (Méthodes de comparaison et de diffusion d'échelles de temps). *Kleinheubacher Berichte*, 16, 5.
- BENAVENTE, J., BESSON, J. et PARCELIER, P. [1979] Clock comparison by laser in the nanosecond range. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 701-706.
- BESSON, J. [1974] Synchronisation d'horloges à quelques nanosecondes par l'ONERA. *C.R. Acad. Sci.*, (Paris), Vol. 279B., 147-150.
- BESSON, J. et PARCELIER, P. [16-20 septembre 1974] Synchronisation dans le domaine de la nanoseconde d'horloges éloignées. IX^e Congrès International de Chronométrie, Stuttgart, République fédérale d'Allemagne. Edition provisoire, TP ONERA No. 1397.
- CLARK, T. A. [14-16 novembre 1972] Precision timing and very long baseline interferometry (VLBI) Proc. 4th Annual NASA and Dept. of Defense Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting, GSFC Rep. X-814-73-72, 74-89, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, Etats-Unis d'Amérique.
- DE JONG, G. [1984] Results of several years of comparison of European time scales by means of receive only satellite methods. CPEM Digest. Delft Library of Congress, Card No. 75-23855, et IEEE Cat. No. 84, ch 2057-8.
- DIXON, R. C. [1976] *Spread Spectrum Systems*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- DUDNIK, B. S., KASHCHEYEV, B. L., LEYKIN, A. Y., SMIRNOV, A. N. et SOPELNIKOV, M. D. [1971] Ispolzovanie meteoronogo rasprostraneniya radiovoln dlya privyazki chasov punktov sloujby vremeni i tchastoty (Utilisation de la propagation météorique des ondes radioélectriques pour la synchronisation des horloges en des points de mesure des services de signaux horaires et de fréquences étalon). *Izm. Tekhn.*, 12.
- DUDNIK, B. S., KASHCHEYEV, B. L. et SMIRNOV, A. N. [1973] Ispolzovanie otrajennykh radiovoln dlya kalibrovki kanalov privyazki chkal vremeni (Utilisation d'ondes radioélectriques réfléchies par l'étalonnage des voies de synchronisation de l'échelle des temps). *Izm. Tekhn.*, 6.
- GUINOT, B. [1968] Bureau international de l'heure, Rapport annuel.
- GUINOT, B. [1969] An application of statistical smoothing techniques on VLF signals for comparison of time between USNO and NBS. Formation de l'échelle de temps coordonnée par le Bureau international de l'heure (Formation of the coordinate time scale by the Bureau international de l'heure). Actes du Colloque international de chronométrie, Série A.
- HAFELE, J. C. et KEATING, R. E. [juillet 1972] Around the world atomic clocks: observed relativistic time gains. *Science*, Vol. 177, 166-170.
- HINTEREGGER, H. F., SHAPIRO, I. I., ROBERTSON, D. S., KNIGHT, C. A., ERGAS, R. A., WHITNEY, A. R., ROGERS, A. E. E., MORAN, J. M., CLARK, T. A. et BURKE, B. F. [27 octobre 1972] Precision geodesy via radio interferometry. *Science*, Vol. 178, 396-398.
- HURD, W. J. [14-16 novembre, 1972] An analysis and demonstration of clock synchronization by VLBI. Proc. 4th Annual NASA and Dept. of Defense Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting, GSFC Rep. X-814-73-72, 100-122. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, Etats-Unis d'Amérique.
- IJIMA, S., SHIBUTANI, G. et SAKAI, T. [1978] Travel time and accuracy of reception of remote time signals on short waves, WWV and WWVH as received in Tokyo. *Tokyo Astron. Bull.*, 2^e Série, Vol. 253, 2917-2923.
- KLEMPERER, W. K. [mai 1972] Long-baseline radio interferometry with independent frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 602-609.
- MOREAU, J. P. [1977] Mesure de décalages entre horloges éloignées à haut pouvoir de résolution. *Mesures*, 1977.
- NORTON, K. A., BARROWS, E., THOMPSON, Jr. M. C. et JAMES, H. B. [décembre 1962] Variance of radio frequency caused by turbulence on line-of-sight transmissions. *IRE Trans. P.G.I.*
- OGAWA, T. [décembre 1958] Frequency variations in short-wave propagation. *Proc. IRE*, Vol. 46, 12, 1934-1939.

- POTTS, C. E. et WIEDER, B. [mai 1972] Precise time and frequency dissemination via the LORAN-C system. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 5, 530-539.
- ROGERS, A. E. E. [octobre 1970] Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase delay measurements. *Radio Sci.*, Vol. 5, 1239-1248.
- SANNIER, P. [1974] Synchronisation d'oscillateurs ultrastables au moyen d'un faisceau laser. Note technique ONERA No. 226.
- STEIN, S. R., KAMAS, G. et ALLAN, D. W. [décembre, 1983] New time and frequency services at the National Bureau of Standards. Proc. 15th Annual Precise Time and Time interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats Unis d'Amérique, 17-29.
- WHEELER [1983] Automation of precise time reference stations (PTRS). Proc. 15th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 41-52.

BIBLIOGRAPHIE

- BAKER, D. M. et DAVIES, K. [janvier 1968] Waves in the ionosphere produced by nuclear explosions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 448.
- BARNES, J. A. [juin 1967] The development of an international atomic time scale. *Proc. IEEE*, Vol. 55, 822-826.
- BECKER, G., FISCHER, B. et KRAMER, G. [1969] Methoden und Ergebnisse im internationalen Zeitvergleich mit Längswellen (Méthodes et résultats de la comparaison internationale du temps à l'aide d'ondes très longues). Actes du Colloque International de Chronométrie, Série A.
- BEEHLER, R. E., MOCKLER, R. C. et RICHARDSON, J. M. [juillet 1965] Caesium beam atomic frequency standards. *Metrologia*, Vol. 1, 114-131.
- BESSON, J. et CUMER, J. [1969] Synchronisation précise de base par simple survol. Actes du Colloque international de chronométrie, Série D.
- BLAIR, B. E. [avril 1973] Time and frequency dissemination: an overview of principles and techniques. US National Bureau of Standards Monograph 140, Chapitre 10, 223-313, Springfield, VA., Etats-Unis d'Amérique.
- BLAIR, B. E., CROW, E. L. et MORGAN, A. H. [juin 1967] Five years of VLF worldwide comparison of atomic frequency standards. *Radio Sci.*, Vol. 2 (nouvelles séries), 627-636.
- BONANOMI, J., KARTASCHOFF, P., NEWMAN, J., BARNES, J. A. et ATKINSON, W. R. [avril 1964] A comparison of TAI and NBS-A atomic time scales. *Proc. IEEE*, Vol. 42, 4, 439.
- CHAN, K. L., KANELAKOS, D. P. et VILLARD, O. G., Jr. [mai 1962] Correlation of short-period fluctuations of the earth's magnetic field and instantaneous frequency measurements. *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, 1975.
- DAVIES, K. et BAKER, D. M. [1965] Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earth quake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 2251.
- DAVIES, K., WATTS, J. M. et ZACHARISEN, D. H. [1962] A study of F₂-layer effects as observed with a Doppler technique. *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, 601.
- FUJIMOTO, M. K. et FUJIWARA, K. [1981] Measurements on phase delay of a LORAN-C antenna. *Tokyo Astron. Bull.*, 2^e série, 265, 3015-3020.
- GEORGES, T. M. [1968] HF Doppler studies of travelling ionospheric disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 30, 735.
- GUETROT, A., HIGBIE, L. S., LAVANCEAU, J. et ALLAN, D. W. [mai 1969] Proc. 23rd Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, N.J., USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, JJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC, 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- HELLWIG, H. et WAINWRIGHT, A. E. [décembre 1975] A portable rubidium clock for precision time transport. Proc. 7th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 143-159.
- ICHINOSE, T. et OGAWA, T. [mai 1976] Internal gravity waves deduced from the HF Doppler data during the April 19, 1958, solar eclipse. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, 2401.
- KALAU, M. [1980] The GDR atomic time scale. Conf. Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Braunschweig, République fédérale d'Allemagne, IEEE Catalogue N° 80CH1497-71M, 11-14.
- KOBAYASHI, S., SATOH, T. et TANAKA, M. [juillet 1977] Accuracy of time comparison by the reception of JJY signals propagating via E region. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 24, 114.
- LESCHIUTTA, S., ORLANDO, A. et PORRECA, A. [1968] Sincronizzazione di orologi campione tramite segnali di tempo radiodiffusi. (Synchronisation des horloges maîtres au moyen de signaux horaires radiodiffusés). Proc. Colloquium on the Problems of the Time Determination, Keeping and Synchronization, Milan, 321-329.
- MORGAN, A. H., CROW, E. L. et BLAIR, B. E. [juillet 1965] International comparison of atomic frequency standards via VLF radio signals. *Radio Sci. J. Res. NBS/USNC-URSI*, Vol. 69D, 7, 905-914.
- MUNGALL, A., DAAMS, H. et BAILEY, R. [juillet 1969] Note on atomic time-keeping at the National Research Council. *Metrologia*, Vol. 5, 3, 73-76.
- OGAWA, T. [1960] Ionosphere observations by Doppler effect. *Rep. Ion. and Space Res. Japan*, Vol. 14, 133.
- TSUTSUI, M. et OGAWA, T. [1973] HF Doppler observation of ionospheric effects due to typhoons. *Ion. Space Res.* (Japon), Vol. 27, 121.

WINKLER, G. M. R. [1972] Recent experiments with flying atomic clocks, LORAN-C etc. for clock synchronization. Rapport de la XVII^e Assemblée générale de l'URSI, Varsovie, République populaire de Pologne.

YASUDA, Y., OKAZAWA, H., AKATSUKA, K. and MATSUURA, T. [1977] International time and frequency comparison for long term via VLF and LORAN-C. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., Etats-Unis d'Amérique.

Documents du CCIR

[1974-78]: 7/137 (Chine (République populaire de)); 7/125 (Suisse); 7/106 (Royaume-Uni).

[1978-82]: 7/91 (Japon).

RECOMMANDATION 582

**DIFFUSION ET COORDINATION DE SIGNAUX DE RÉFÉRENCE DE TEMPS
ET DE FRÉQUENCE PAR SATELLITE**

(Question 2/7)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que l'application des signaux de référence de temps et de fréquence à des domaines tels que la navigation, les télécommunications et l'exploration de l'espace nécessite l'amélioration des services diffusant de tels signaux quant à leur couverture, à leur exactitude et à la fiabilité de la réception de leurs signaux;
- b) qu'il est souvent impossible d'améliorer substantiellement les services de diffusion et de coordination de signaux de référence de temps et de fréquence en exploitation de Terre, pour des raisons pratiques d'ordre technique ou économique;
- c) que de telles limitations entraînent l'élimination de certains de ces services qui fonctionnent sur ondes décimétriques;
- d) que des essais ont prouvé, par les résultats obtenus dès maintenant, qu'en utilisant une technique par satellite pour diffuser et synchroniser les signaux de référence de temps et de fréquence, on peut améliorer très sensiblement l'exactitude, la précision, la couverture, la fiabilité et la commodité d'exploitation de ces services;
- e) que les systèmes à satellites et les véhicules qu'on pourrait employer pour transmettre les signaux de référence de temps et de fréquence sont de plus en plus nombreux;
- f) qu'au cours des prochaines années on pourra mettre à l'épreuve, avec de nombreuses occasions de participation pour des laboratoires de temps et de fréquence, des systèmes à satellites ou d'autres moyens spatiaux intéressants pour la diffusion et la coordination de signaux de référence de temps et de fréquence, notamment le LASSO, des satellites de télévision, des satellites de télécommunication, des satellites météorologiques, le système mondial de positionnement (GPS) et le TRANSIT;
- g) que de nombreuses expériences de transmission de signaux de référence de temps et de fréquence par satellite ont déjà montré qu'il est avantageux d'équiper d'une station terrienne réceptrice propre chacun des laboratoires de temps et de fréquence, afin d'éliminer les causes d'incertitude inhérentes aux liaisons auxiliaires de transfert du temps,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

- 1. que les organismes de diffusion et de coordination, et les organismes utilisateurs de signaux de référence de temps et de fréquence participent dans la mesure du possible aux expériences menées pour évaluer les améliorations relatives apportées par les diverses techniques à satellite à la transmission de ces signaux;
 - 2. que les laboratoires de temps et de fréquence s'équipent, dans la mesure du possible, de leurs propres stations terriennes réceptrices (et, le cas échéant, émettrices);
 - 3. que l'organisateur de tout nouveau service de diffusion ou de coordination de signaux de référence de temps et de fréquence envisage sérieusement d'utiliser une technique par satellite.
-

RAPPORT 518-4

DIFFUSION ET COORDINATION PAR SATELLITE DE L'INFORMATION TEMPS/FRÉQUENCE

(Question 2/7)

(1971-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

A l'heure actuelle, les usagers de l'information temps/fréquence (T/F) ont accès à cette information grâce à toute une gamme de services et de techniques de diffusion, au nombre desquels on compte les services classiques d'émission en ondes décamétriques, kilométriques ou myriamétriques, exploités dans le monde entier par de nombreuses administrations, l'emploi d'horloges portatives, l'utilisation d'émissions télévisuelles et de signaux de radionavigation en tant que normes de transfert T/F, la diffusion par le service téléphonique et les techniques spatiales. Les précisions peuvent aller d'une milliseconde à moins d'une microseconde selon des facteurs tels que la technique utilisée, les emplacements géographiques, les conditions de propagation, etc. (Rapports 267, 271 et 363).

Bien que les services disponibles puissent répondre à nombre des besoins actuels des usagers de l'information T/F, de nouvelles applications de mesures T/F voient sans cesse le jour et demandent, ou pourraient bénéficier, de signaux de référence T/F encore plus précis, avec une amélioration de la couverture et de la fiabilité. Par exemple, les rapides progrès de certaines applications, telles que les systèmes très exacts de radionavigation/radiolocalisation, les communications numériques, le contrôle des données scientifiques et les applications spatiales, ont entraîné le besoin de synchronisation et de comparaison des signaux horaires entre de grandes zones géographiques, avec une précision d'au moins une nanoseconde. En outre, une analyse rétrospective à long terme des possibilités de garde-temps et des applications connexes montre nettement que, dans les 20 années à venir, la diffusion du temps devra souvent être beaucoup plus précise.

S'il est évident que les services T/F existants sont encore susceptibles de quelque amélioration, l'expérience déjà acquise indique que ce sont les techniques spatiales qui se prêtent le mieux à une amélioration notable, dans l'avenir, de la qualité des services de diffusion et de coordination. On peut prendre en considération un certain nombre de techniques et de systèmes spatiaux, chacun d'entre eux ayant ses avantages et ses inconvénients pour des besoins et des applications donnés.

On trouvera dans le § 2 du présent Rapport un examen des besoins actuels et nouveaux d'amélioration des services de diffusion et de coordination. Le § 3 contient un exposé de quelques-uns des avantages généraux que revêt l'utilisation des techniques spatiales. Dans le § 4, seront examinées les techniques spatiales les plus prometteuses, on comparera ensuite les méthodes d'utilisation, l'état actuel, la couverture, la précision possible, les coûts pour l'utilisateur, la possibilité d'utilisation sur place, le stade opérationnel ou expérimental et, enfin, les avantages et inconvénients les plus importants. En outre, on trouvera un résumé de l'expérience acquise à ce jour et certaines indications des plans futurs concernant chaque technique ou système.

2. Applications qui peuvent bénéficier d'une amélioration des services de diffusion de l'information T/F

Des laboratoires du monde entier ont déjà mis au point des étalons de fréquence atomiques ayant des niveaux d'incertitude, confirmés dans de nombreux travaux, d'environ 1×10^{-13} et des stabilités à long terme meilleures que 1×10^{-14} (Rapport 364). Des échelles atomiques de temps fondées sur ces étalons présentent des écarts journaliers inférieurs à 10 ns. Pour tirer le meilleur parti possible de ces précisions en ce qui concerne les applications généralisées de l'information T/F, il faut mettre en œuvre des techniques permettant de comparer entre elles les échelles de temps avec une précision meilleure que la nanoseconde et diffuser à la communauté des usagers les signaux de référence correspondants.

Un autre bénéficiaire de l'amélioration de l'information T/F pourrait être la télécommunication numérique. On constate une nette tendance à l'établissement de réseaux synchronisés entièrement numériques qui, dans certains cas, feraient probablement appel à de nombreux étalons de fréquence atomiques pour obtenir les stabilités temporelles nécessaires au maintien de la synchronisation des bits dans tous les réseaux de télécommunications. Par exemple, pour un réseau fonctionnant à 1,5 Mbit/s et maintenant la synchronisation des bits à 1 bit par jour près, la stabilité des étalons devrait être de 1×10^{-11} . Plus les débits binaires types s'accroîtront et plus les besoins de référence T/F deviendront stricts. D'autres systèmes utilisent des liaisons par satellite établies selon le mode de l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT); ils exigent une synchronisation de temps atteignant 10 ns.

Dans le domaine général des transports, et notamment les applications de radionavigation/radiolocalisation, on voit déjà se manifester le besoin d'une précision du temps de l'ordre de 10 ns et parfois meilleure que la nanoseconde. Par exemple, des systèmes étendus de radionavigation par satellite permettant de déterminer les positions à quelques mètres près au moyen d'étalons de fréquence atomiques avec une stabilité de 1×10^{-13} et une précision de 10 ns, sont à un stade avancé de planification. Pour les futures sondes interplanétaires, les systèmes de radionavigation demanderont une précision meilleure que 1 ns. Diverses applications maritimes spécialisées demandent une radiolocalisation précise: dragage, pose des conduites ou des câbles, sauvetage, forages pétroliers, géophysique, hydrographie, etc; la précision voulue peut parfois atteindre 1 ns. Une meilleure diffusion de l'information T/F semble de plus en plus nécessaire à mesure que sont mis au point des systèmes et des techniques de contrôle temporel de la circulation aérienne. D'autres systèmes sont susceptibles d'employer des liaisons numériques de données air-sol pour la navigation aérienne intégrée, les communications, la protection et la régulation du trafic aérien.

Les applications spatiales [Cooper et Chi, 1979] donnent naissance à un accroissement des besoins en diffusion T/F, tandis que l'on met au point et que l'on applique de nouvelles techniques de poursuite des satellites et de mesures géodésiques par satellite. Dans le monde entier, on peut déjà suivre les satellites avec une incertitude globale ne dépassant pas quelques mètres. La technique du laser permet de mesurer les distances avec une incertitude de quelques centimètres; on pourrait donc obtenir un pouvoir séparateur dans le temps inférieur à la nanoseconde.

Pour certaines des applications les plus exigeantes, dont on attend le développement au cours des années 1980 dans le domaine de la géodésie par satellite, la précision devra être de l'ordre de 0,1 à 1 ns.

Diverses applications scientifiques peuvent bénéficier d'une meilleure information T/F. En ce qui concerne la théorie de la relativité, des expériences poussées peuvent demander pendant des heures une stabilité de 1×10^{-16} des fréquences de référence, tandis que la radio-interférométrie à très longue base (VLBI) serait facilitée par une stabilité de fréquence meilleure que 1×10^{-14} pendant toute une journée. De même, pour mesurer les tensions terrestres et la dérive des continents, il faut une stabilité de temps de 1 ps sur 1000 s. A titre de dernier exemple, des signaux de référence T/F plus précis permettraient d'établir des modèles plus satisfaisants de la troposphère et de l'ionosphère, ce qui aurait des conséquences favorables dans de nombreuses autres applications où les résultats sont limités par les incertitudes dues aux effets de la propagation.

De nombreuses autres applications qui n'exigeront pas forcément la meilleure précision actuellement possible peuvent néanmoins bénéficier d'améliorations d'autres éléments des services de diffusion T/F: couverture plus étendue, réception plus fiable, brouillages réduits, utilisation plus facile pour des non-spécialistes, moindre coût, etc. Deux exemples sont les systèmes de contrôle des données scientifiques, où les données doivent être corrélées à partir de divers emplacements dispersés, et les réseaux d'énergie électrique qui ont besoin de références T/F pour coordonner et commander le flux d'énergie dans le réseau, pour la synchronisation des événements ainsi que pour la localisation et l'analyse des dérangements.

Nombre des besoins spécifiques mentionnés ici sont des besoins opérationnels de temps et de fréquence pour lesquels on choisit des précisions telles que l'incertitude ne soit pas le facteur limitatif de la marge globale d'erreur du système. Notons encore qu'il est généralement souhaitable d'obtenir de la technique de diffusion T/F une précision dix fois plus grande que ne l'exigent les besoins de l'exploitation.

3. Avantages généraux des techniques spatiales

Il ne semble pas que les méthodes aujourd'hui suivies pour diffuser l'information T/F à la grande majorité de ses usagers puissent répondre aux besoins ci-dessus mentionnés. Les services en ondes décimétriques, kilométriques et myriamétriques sont limités par les effets de la propagation, l'expérience accumulée en la matière pendant de nombreuses années montre que l'on ne saurait raisonnablement attendre de ces services un transfert du temps beaucoup plus précis qu'à l'heure actuelle. Des transferts du temps par signaux de télévision ont été effectués avec une précision de 10 ns, mais uniquement dans des zones locales, dans des conditions de visibilité directe entre deux stations de signaux horaires toutes deux situées dans la même zone de réception d'une même station de télévision. Des comparaisons à plus grande distance au moyen de réseaux de télévision interconnectés montrent une sensible dégradation (jusqu'à quelques microsecondes) due aux incertitudes supplémentaires du trajet de propagation. Comme pour le transfert de temps par télévision dans des zones locales, le recours à des horloges portatives peut donner de bien meilleurs résultats (50 ns) si l'on prend certaines précautions mais, encore une fois, il ne semble pas que ce soit la solution des problèmes de caractère général.

Les méthodes de transfert T/F par satellite semblent par contre pouvoir répondre aux besoins futurs d'une plus grande précision et offrir les autres améliorations mentionnées plus haut. Les incertitudes introduites par le trajet de propagation des signaux sont considérablement réduites, dans la plupart des techniques spatiales, étant donné que les trajets Terre-satellite et/ou satellite-Terre sont surtout en espace libre avec un minimum de perturbations provoquées par l'ionosphère et la troposphère. L'utilisation de fréquences plus élevées, par exemple supérieures à 1 GHz, courante dans de nombreux systèmes à satellite, réduit également les incertitudes

ionosphériques dans le temps total de propagation. Dans le cas de techniques de transfert du temps par satellite dans les deux sens, dans lesquelles deux emplacements échangent simultanément (ou presque) des signaux horaires par l'intermédiaire du satellite, il est en principe inutile de déterminer le temps de propagation, puisqu'il ne contribue pas directement à l'incertitude du transfert du temps.

Les satellites offrent également des avantages intéressants en matière de couverture, du fait de leur éloignement de la Terre. Ainsi, un seul satellite placé sur l'orbite des satellites géostationnaires peut diffuser ou relayer en permanence un signal horaire en direction d'environ un tiers de la surface terrestre. De même, un seul satellite placé sur orbite polaire à basse altitude peut assurer une couverture mondiale totale, même si ce n'est pas en permanence en un point donné de la Terre. En général, la fiabilité de la réception de signaux émis par des satellites est très élevée en tout point de la zone de couverture, étant donné que les perturbations causées par le milieu de propagation sont très réduites par rapport au cas des signaux T/F émis par des services de Terre.

En se fondant sur une grande variété d'expériences et d'évaluations des techniques spatiales effectuées à l'aide de différents systèmes à satellites, on peut mettre au point un équipement de réception relativement peu coûteux, en grande partie automatisé et de manipulation facile pour des non-spécialistes. Pour obtenir la plus grande précision possible, il peut toutefois être nécessaire d'utiliser un équipement plus onéreux et plus complexe, supposant une plus grande compétence des opérateurs.

Depuis 1962, dans le monde entier, un certain nombre d'organismes se sont livrés avec succès à des expériences de transfert du temps par satellite. Bien que l'on ne dispose actuellement d'aucun satellite spécialisé exclusivement dans les applications T/F, et qu'il n'y en aura probablement aucun à l'avenir, les expérimentateurs ont pu utiliser efficacement des systèmes à satellites initialement conçus pour d'autres fonctions; il s'agit de systèmes de navigation, de communications, de télévision, de météorologie, de recherche scientifique et d'expérimentation. On trouvera à l'Annexe I un tableau rappelant certaines de ces expériences, réalisées avec des satellites depuis 1962.

Sachant pourquoi il est nécessaire d'améliorer les services et connaissant les possibilités qu'offrent pour ce faire les techniques spatiales, la Conférence administrative mondiale des radiocommunications de 1979 (Genève) a attribué les bandes de fréquences ci-après pour la diffusion T/F par satellites:

- 400,1 $\pm$ 0,025 MHz;
- 4202 $\pm$ 2 MHz (espace-Terre);
- 6427 $\pm$ 2 MHz (Terre-espace);
- 13,4 à 14 GHz (Terre-espace);
- 20,2 à 21,2 GHz (espace-Terre);
- 25,25 à 27 GHz (Terre-espace);
- 30 à 31,3 GHz (espace-Terre).

4. Diverses techniques spatiales permettant d'améliorer les services de diffusion et de coordination T/F

Lorsqu'on examinera les diverses techniques spatiales qui pourraient être utiles pour améliorer à l'avenir le transfert T/F de manière opérationnelle, on parlera souvent de l'exploitation dans un seul sens et de l'exploitation dans les deux sens. Dans le présent Rapport, on entend par «exploitation dans un seul sens» le cas où l'utilisateur utilise seulement un équipement de réception pour recevoir une émission émise ou relayée par un satellite, généralement en radiodiffusion pour desservir un grand nombre d'utilisateurs. Ce type d'exploitation présente les caractéristiques suivantes: zones de service très étendues, bonne précision temporelle, la méthode de reconstitution du temps et le fonctionnement de l'équipement sont simples, le coût de l'équipement pour l'utilisateur est modéré. On entend par «exploitation dans les deux sens» le cas où l'utilisateur utilise un équipement d'émission et un équipement de réception, les communications se faisant normalement entre points fixes. Ce type d'exploitation offre en général de grandes possibilités de précision car elle est relativement indépendante du trajet de propagation qui relie les emplacements où se trouvent les utilisateurs.

Pour plus de commodité, on a réparti les diverses techniques spatiales possibles en trois groupes:

- celles dont l'application essentielle est le transfert de temps de haute précision;
- celles qui semblent les plus utiles pour une diffusion générale T/F à destination d'un grand nombre d'utilisateurs; et
- les systèmes/techniques qui permettent une diffusion et un transfert T/F de haute précision améliorés.

Pour chaque possibilité envisagée, on donnera d'abord des renseignements d'ordre général, pour décrire le système ou la technique et son état actuel. On trouvera ensuite un résumé, au Tableau I, qui donne des renseignements comparatifs sur chaque système ou technique: couverture, précision possible, coût par les utilisateurs, possibilité d'utilisation sur place, et stade expérimental ou opérationnel. Le Tableau II récapitule certains des principaux avantages et inconvénients de chacune des possibilités envisagées. Pour chacune d'entre elles, on trouvera également un résumé des résultats expérimentaux ou opérationnels à ce jour ainsi qu'une indication des projets éventuels.

TABLEAU I – Comparaison de divers renseignements relatifs aux possibilités de diffusion par satellite

Possibilité	Couverture	Précision	Coût estimé pour l'utilisateur (dollars des Etats-Unis, 1981)	Possibilité d'utilisation sur place	Système à satellites – Stade opérationnel ou expérimental
1. Satellites de télécommunication	Régionale ou mondiale (réseaux)	< 10 ns	25 000-100 000 \$ pour un terminal sur place + coût du temps d'utilisation du répéteur	Dépend du système à satellites et de l'emplacement	Stade opérationnel
2. GPS: Mode normal	Mondiale; continue	Eventuellement ≈ 100 ns, si non détériorée	Récepteur actuel des signaux horaires plus de 25 000 \$. Le prix devrait diminuer à mesure des progrès	Oui	6 satellites actuellement en orbite. Mise en œuvre totale après 1987
Mode visibilité commune	Intercontinentale	Dépend de la géométrie spécifique de la liaison. Eventuellement ≈ 10 ns, si non détériorée	> 25 000 \$	Oui	Voir ci-dessus
3. LASSO	Europe et Afrique. Dépend de la position du satellite	Précision prévue: < 1 ns	Très coûteux; stations entièrement au laser de l'ordre d'un million de dollars. Suppose en général des liaisons horaires auxiliaires à destination des équipements à laser	Généralement pas. Nécessite une station avec équipement laser	Peut-être en 1986 (METEOSAT-P2). Un équipement supplémentaire opérationnel pourrait être mis au point ultérieurement avec une résolution interne < 10 ps
4. Expérience de navette spatiale	Dépend du vol considéré. Pourrait couvrir $\pm 57^\circ$ de latitude	Valeur prévue: < 1 ns (temps) et 1×10^{-14} (fréquence)	Suppose une installation sol à hyperfréquences à 3 fréquences; liaison dans les deux sens avec la navette. Coûteux	Possible, moyennant mise au point d'un nouvel équipement pour utilisation opérationnelle ultérieure	Expérience proposée; aucun plan de système opérationnel
5. Utilisation de nouvelles attributions entre 13 et 31 GHz	Dépend du système à satellites utilisé	Précision: < 1 ns Précision: limitée par les incertitudes dues au temps de propagation	Coûteux en attendant amélioration	Probablement	A ce jour, pas de plans d'utilisation opérationnelle ou expérimentale
6. Réception simultanée de signaux de mesure des distances	Régionale	10 ns	Moins de 30 000 \$	Oui	Les satellites GOES, GMS et Meteosat sont en exploitation

TABLEAU I (suite)

Possibilité	Couverture	Précision	Coût estimé pour l'utilisateur (dollars des Etats-Unis, 1981)	Possibilité d'utilisation sur place	Système à satellites – Stade opérationnel ou expérimental
7. Satellites météorologiques	Dépend du système. Hémisphérique pour le code horaire GOES des Etats-Unis. Extension possible à l'Europe et au Japon	± 16 ms (non corrigée) $\pm 0,5$ ms (corrigée du temps moyen de propagation) ± 50 μ s (entièrement corrigée)	3500 \$ (précision de 1 ms) 4500 \$ (précision de 50 μ s) antennes comprises	Oui	Le système à satellites GOES est opérationnel. Code horaire sur les satellites des Etats-Unis depuis 1975
8. Utilisation de l'attribution de la fréquence 400,1 MHz	Dépend du système à satellites utilisé	Niveau de base: ≈ 1 ms. Pourrait peut-être atteindre < 1 μ s au moyen d'un code PRN	Niveau de base: < 500 \$ Code PRN: < 3000 \$	Oui	L'attribution existe mais aucun plan d'utilisation n'est connu
9. Répéteur à ondes métriques ou canal de 10 kHz réservé sur un satellite de télécommunication	Régionale	≈ 1 μ s possible. Pourrait aussi diffuser des codes ou des annonces parlées, mais avec précision moins grande	Devrait être relativement bas	Oui	L'Inde a prévu l'utilisation d'un canal de 10 kHz sur INSAT en 1984 environ
10. TRANSIT Système opérationnel	Mondiale, y compris les latitudes élevées, de manière intermittente	≈ 30 μ s (un seul satellite) ≈ 10 μ s (l'ensemble des satellites)	Environ 12 000 \$ pour un récepteur entièrement automatique et une antenne équidirective	Oui	Stade opérationnel
TRANSIT amélioré (Nova)	Même que ci-dessus, mais deux satellites seulement sont actuellement en orbite	< 100 ns	15 000 à 50 000 \$ après mise au point initiale du récepteur	Oui	Stade expérimental
11. TDRS: Dans les deux sens	Presque mondiale, à l'exception des 30° à 120° de longitude est	Probablement ≈ 10 ns	Non déterminé mais probablement plus de 25 000 \$	Oui	Opérationnel depuis 1984
Dans un seul sens	Même que ci-dessus	$\approx 1-10$ μ s	Non déterminé mais relativement peu coûteux	Oui, dans la plupart des cas	Comme ci-dessus
12. Satellite de télévision: Haute précision	Régionale (OTS-2) ou mondiale	Dépend de la qualité des données des éphémérides. 300 ns et peut-être < 50 ns	Actuellement environ 3300 \$. Devrait être réduit sensiblement selon les quantités produites	Oui. Des antennes de 1 m sont utilisables	Stade expérimental actuellement mais de nombreux satellites opérationnels sont prévus
Diffusion générale	Comme ci-dessus	Dépend de la possibilité de correction du trajet. Code horaire éventuel à usage général	Comme ci-dessus. Moins d'exigences imposées aux usagers pour le calcul du temps de propagation	Oui	Comme ci-dessus

TABLEAU II — Principaux avantages et inconvénients des possibilités de diffusion par satellite

Possibilité	Principaux avantages	Principaux inconvénients
1. Satellites de télécommunication	La technologie et les systèmes opérationnels sont déjà disponibles. Longue expérience acquise. Continuité à long terme assurée. L'exploitation dans les deux sens assure une grande précision. Les coûts et la dimension requise de l'antenne diminuent. Couverture internationale et régionale très fiable. Exploitation sur place possible dans certains cas. Une grande largeur de bande peut être disponible. De nombreux gouvernements participent déjà directement à l'exploitation de certains systèmes	Les coûts actuels, bien que décroissants, sont relativement élevés. De grandes antennes sont nécessaires dans certains cas, notamment pour les liaisons d'INTELSAT. L'utilisateur doit disposer d'un équipement d'émission. Dans certains cas, des liaisons auxiliaires sont nécessaires entre les installations de satellite et les laboratoires de métrologie. Une très haute précision exige un étalonnage difficile des temps de propagation des stations au sol. Forte demande actuelle de canaux
2. GPS: Mode normal	Très haute précision. Couverture mondiale en permanence. Redondance ample et système bien soutenu. Exploitation dans un seul sens. Continuité à long terme du système. Gros effort de mise au point de récepteurs probable si l'accès et la précision ne sont pas indûment restreints. Petites antennes possibles. Exploitation sur place	Pour les usagers civils, la précision peut être limitée à 250 ns (deux sigma). Coût actuel des récepteurs > 25 000 \$. Format des signaux complexe. L'exploitation dans un seul sens suppose que les usagers calculent le temps de propagation
Mode à visibilité commune	Le coût des récepteurs risque d'être moindre. Haute précision de synchronisation pour des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Exploitation commode sur place. Les erreurs d'éphémérides sont partiellement compensées. Ne suppose qu'une connaissance de la <i>différence</i> du temps de propagation	Utilisable pour les distances régionales et intercontinentales. Eventuellement restrictions à l'accès de la précision pour les usagers civils. Suppose une certaine coordination et programmation entre les laboratoires
3. LASSO	Sans doute l'une des solutions qui offrent la plus grande précision. Peut permettre un transfert de temps < 1 ns. La synchronisation ne prend que quelques minutes. Des groupes LASSO standards pourraient être ajoutés à d'autres satellites à l'avenir	Coût de l'équipement élevé pour l'utilisateur. La plupart des emplacements laser ne sont pas situés au même endroit que les laboratoires de métrologie. Les opérations laser dépendent des conditions météorologiques. Pas de projets opérationnels. Manque d'expérience du laser
4. Expérience de navette spatiale	Sans doute l'une des solutions qui offrent la plus grande précision. L'utilisation de fréquences multiples réduit les incertitudes. Insensible au temps. Utilisation de masers H pour la stabilité. Permet des comparaisons directes de fréquences	Il ne s'agit pour le moment que d'une proposition; aucun plan d'exploitation. Equipement coûteux et complexe nécessaire. L'utilisation de la navette pour l'expérience limite le temps d'observation pendant chaque passage
5. Utilisation de nouvelles attributions entre 13 et 31 GHz	Les fréquences sont attribuées au plan international à l'utilisation T/F. De grandes largeurs de bande devraient permettre des précisions de mesure < 100 ps. Non limitée à un système à satellites particulier	La technologie dans cette gamme de fréquences doit être encore développée et les coûts réduits. Les attributions sont à titre <i>secondaire</i> et en partage. Sans doute impossible avant 5 à 10 ans

TABLEAU II (suite)

Possibilité	Principaux avantages	Principaux inconvénients
6. Réception simultanée de signaux de mesure des distances	Certains satellites appropriés sont opérationnels. Grande précision possible. Possibilité d'utilisation pour coordination mondiale. L'équipement relativement peu coûteux peut être utilisé sur place. Informations d'éphémérides précises simultanément avec le transfert du temps. Exploitation commode dans un seul sens	Accès obligatoire aux informations des éphémérides du satellite. Exige plusieurs emplacements de contrôle spéciaux pour relier les systèmes régionaux pour le transfert de temps mondial. L'équipement de l'utilisateur reste à mettre au point
7. Satellites météorologiques	Coût modéré pour l'utilisateur. Certains récepteurs commerciaux sont déjà disponibles. Les satellites géostationnaires assurent un service permanent. Le code horaire est déjà opérationnel sur les satellites GOES. Le code horaire GOES contient des informations complètes sur le moment de l'année rapporté à l'UTC. Continuité à long terme relativement sûre pour la principale mission du satellite. Utilisation sur place	La couverture du code horaire GOES actuel se limite à l'hémisphère ouest. Excursions temporelles occasionnelles > 100 μ s possibles avec GOES. La fréquence de 468 MHz utilisée n'est pas une attribution spécifique à la diffusion T/F. Compte tenu du statut secondaire de l'attribution, des brouillages risquent d'être causés par le service mobile terrestre dans certaines régions. Coopération d'organisations non T/F nécessaire
8. Utilisation de l'attribution de la fréquence 400,1 MHz	La fréquence est déjà attribuée au plan international pour l'utilisation T/F à titre <i>primaire</i> (à quelques exceptions près dans certaines régions). Compatible avec un équipement d'utilisateur très bon marché. La largeur de bande utilisable pourrait permettre un service à deux niveaux. Compatible avec les répéteurs de satellite déjà fabriqués. Pourrait utiliser un répéteur à 400,1 MHz comme complément à tout satellite disponible. Les coûts d'exploitation en service seraient nettement inférieurs à ceux des services à ondes décimétriques actuels. Pourrait résoudre les problèmes de brouillage des services à ondes décimétriques. Souplesse de conception des signaux. Pourrait aisément assurer une couverture mondiale, ou tout au moins internationale, avec plusieurs langues possibles. Utilisation sur place	Aucun plan de mise en œuvre opérationnelle n'est connu à ce jour. Nécessité d'identifier des satellites appropriés et de conclure des arrangements de coopération. Il risque d'être difficile de convaincre de grands nombres d'utilisateurs de passer au service par satellite même s'il est techniquement supérieur. En tant que remplacement des services à ondes décimétriques, une longue période de chevauchement des deux services serait nécessaire pour permettre l'amortissement des équipements et la formation des usagers
9. Répéteur à ondes métriques ou voie de 10 kHz réservée sur un satellite de télécommunications	Des répéteurs à ondes métriques sont utilisés surtout pendant la mise sur orbite et peuvent être utilisés ultérieurement pour le transfert T/F. Fréquences commodes. Continuité à long terme de la principale mission du satellite. Pourrait être de coût modéré. La voie de 10 kHz permet la diffusion d'une information de temps complète. L'Inde peut mettre cette possibilité en exploitation avec INSAT. Utilisation sur place	Disponibilité des répéteurs incertaine. Suppose des accords et une coopération active avec des organisations non météorologiques. Les voies réservées ne seront probablement pas généralement disponibles pour les organisations météorologiques, sauf dans des cas particuliers. Précision possible limitée avec une voie de 10 kHz

TABLEAU II (suite)

Possibilité	Principaux avantages	Principaux inconvénients
10. TRANSIT Système opérationnel	Entièrement opérationnel, bien soutenu par cinq satellites. Couverture mondiale. Récepteurs commerciaux disponibles. Signaux horaires rapportés à l'UTC. Utilisation sur place. Des récepteurs automatiques peuvent faire une moyenne des passages et choisir des satellites précis pour améliorer la précision. Exploitation TRANSIT à long terme possible	Les orbites étant polaires, les signaux horaires ne sont disponibles que périodiquement en un emplacement donné. Les informations horaires présentent une ambiguïté de 30 min. Les récepteurs doivent tenir compte des décalages Doppler
TRANSIT amélioré (Nova)	Haute précision possible avec exploitation dans un seul sens. Couverture mondiale, y compris les régions de latitude élevée. Antennes simples; exploitations sur place. Doit pouvoir assurer une meilleure qualité avec les récepteurs actuels. Deux satellites Nova sont en orbite	Les améliorations apportées par le système NOVA au transfert du temps n'en sont qu'au stade expérimental. Les signaux horaires ne sont disponibles que de manière intermittente. La disponibilité d'informations plus précises sur les éphémérides pour les usagers généraux risque d'être limitée
11. TDRS: Exploitation dans les deux sens	Couverture de pratiquement tous les principaux centres de métrologie via deux satellites géostationnaires. Haute précision possible (≈ 10 ns). Le système est entièrement approuvé. Durée de vie prévue: au moins 10 ans. Place sur l'orbite	L'exploitation dans les deux sens exige un étalonnage soigneux de l'équipement au sol. Coût pour l'utilisateur relativement élevé. L'accès au TDRS supposerait l'autorisation de la NASA. Deux laboratoires ne peuvent comparer le temps qu'indirectement, par l'intermédiaire d'une troisième station
Exploitation dans un seul sens	L'accès au TDRS est beaucoup plus facile dans un seul sens. Equipement plus simple et moins onéreux. Vaste couverture. Peut comprendre un code horaire	La disponibilité pour les usagers non NASA est inconnue. La précision possible est limitée. Coût pour les usagers incertain pour le moment
12. Satellite de télévision: Haute précision	Certains équipements d'utilisateurs pour la mesure du temps par télévision sont déjà mis au point. De nombreux satellites de télévision sont prévus dans le monde. L'équipement d'utilisateur peut être assez simple, avec de petites antennes. La précision peut être excellente si la position du satellite est déterminée par le biais de mesures auxiliaires, en certains emplacements choisis. Rapports signal/bruit élevés et grandes largeurs de bande disponibles. Exploitation sur place. Continuité à long terme assurée par la principale mission du satellite	Suppose des installations et des techniques auxiliaires pour déterminer la position du satellite et diffuser ces données aux utilisateurs aux fins de correction des trajets. Couverture généralement limitée à certaines régions ou, dans certains cas, à certains pays
Diffusion générale	L'équipement utilisant les impulsions de synchronisation de télévision est déjà au point. Le code horaire pourrait être ajouté à l'intervalle vertical. De petites antennes, des récepteurs simples et des techniques de mesure simples sont possibles. A long terme, de nombreux systèmes à satellites de télévision seront sans doute en exploitation. Réception sur place. Rapport S/N élevé et grande largeur de bande	Il faut connaître les temps de propagation. La couverture est surtout régionale ou nationale. Suppose une coopération d'organisations non météorologiques pour l'adjonction du code horaire dans l'intervalle vertical

4.1 *Techniques dont l'application essentielle est le transfert T/F de haute précision*

4.1.1 *Satellites de télécommunications*

La disponibilité et l'utilisation de voies de communication fournies par des systèmes à satellites de télécommunications exploités par un grand nombre d'entreprises, de nations ou de groupes régionaux de nations augmentent considérablement. Pour des comparaisons de haute précision entre échelles de temps, effectuées entre points fixes, deux stations peuvent par exemple s'organiser pour échanger simultanément des signaux horaires appropriés par l'intermédiaire de la liaison par satellite. A chaque emplacement, on mesure les différences entre les repères de temps émis et reçus. En admettant que le temps de propagation des signaux dans le milieu de propagation, le répéteur de satellite et l'équipement de réception et d'émission soient symétriques, il est simple de calculer la différence horaire entre les deux emplacements d'après les différences horaires mesurées à chaque emplacement sans connaître la position du satellite ou de l'utilisateur. En général, les mesures sont effectuées pendant des périodes de 10 à 60 min seulement, une à deux fois par semaine. Cette technique peut-être appliquée autrement, sans nécessiter l'échange simultané de signaux. Les satellites de communication actuellement disponibles fonctionnent dans les bandes attribuées des 4/6 GHz ou 11/12/14 GHz. L'utilisateur dispose d'une grande souplesse de choix de la conception des signaux et, dans certains cas, de la largeur de bande du canal. Avec certains systèmes, des canaux de répéteur de 36 MHz de largeur doivent être loués entièrement; dans d'autres, chaque canal peut être subdivisé. Dans certains systèmes numériques, des débits binaires de 56 kbit/s sont souvent disponibles tant que voie «type» mais des débits binaires de 1,5 Mbit/s ou plus sont également possibles.

Dans certains cas (aux Etats-Unis, par exemple), la comparaison internationale au moyen de satellites de communications peut nécessiter une liaison à deux bonds, d'une part, entre le laboratoire de métrologie et une station terminale d'INTELSAT via un satellite national et, d'autre part, entre la station terminale d'INTELSAT et l'autre pays via le système INTELSAT. Etant donné que beaucoup de systèmes à satellites de fabrication commerciale sont maintenant en service et que leur technique est éprouvée, la mise en œuvre de liaisons opérationnelles de transfert de temps entre de grands laboratoires pourrait être relativement facile.

L'expérience de l'utilisation des satellites de télécommunications pour le transfert précis du temps remonte à 1962 lorsque des horloges du «Naval Observatory» des Etats-Unis d'Amérique (USNO) ainsi que du «National Physical Laboratory» (NPL) et du «Royal Greenwich Observatory» (RGO) du Royaume-Uni ont été comparées jusqu'à une précision de $\pm 1 \mu\text{s}$ grâce à l'échange dans les deux sens d'impulsions de $5 \mu\text{s}$ répétées à la cadence de 10 Hz. Le satellite de télécommunications expérimental Telstar a été utilisé [Steele et autres, 1964]. Presque trois années plus tard, le satellite Relay a servi à des transferts de temps analogues entre l'USNO et le «Radio Research Laboratories» (RRL) du Japon, atteignant une précision annoncée de $0,1 \mu\text{s}$ [Markowitz et autres, 1966]. Au cours de ces premières expériences, les fréquences sur le trajet montant et sur le trajet descendant étaient situées entre 1,7 et 6,4 GHz.

En 1974 et 1975, plusieurs organisations ont employé le satellite expérimental de communication des Etats-Unis d'Amérique, ATS-1, pour faire des expériences de transfert de temps dans les deux sens avec des signaux, plus complexes, en code de bruit pseudoaléatoire (PRN). La détection de corrélation de ces émissions de signaux codés PRN a donné des transferts de temps d'une très grande précision. Au cours de la première série d'expériences, dont le but était de synchroniser une station maîtresse située dans l'ouest des Etats-Unis et une station asservie située dans l'est, l'organisation américaine NASA a pu démontrer une précision de 50 ns et un pouvoir séparateur supérieur à 1 ns [Chi et Byron, 1975]. Egalement en 1975, des transferts de temps analogues ont été effectués à l'aide d'un système de télécommunications complexe, avec étalement du spectre et accès aléatoire, sur des distances intercontinentales, entre le RRL, au Japon, et l'USNO et la NASA, aux Etats-Unis, avec une précision d'environ 10 ns après application de corrections de relativité [Saburi et autres, 1976]. Toutes les expériences faites avec le satellite ATS-1 utilisaient la bande des 4/6 GHz. Depuis 1970, on a effectué sur une base opérationnelle des transferts semblables de temps avec une précision de 100 ns dans plus de vingt stations, en utilisant les satellites du Defense Communications System des Etats-Unis. Les transferts de temps utilisent des signaux en code de bruit pseudoaléatoires (PRN) à faible niveau, qui ne brouillent pas la fonction normale de communication [Easton et autres, 1976].

D'autres transferts du temps dans les deux sens ont été effectués entre 1976 et 1982 dans la bande des 4/6 GHz avec la série expérimentale de satellites européens Symphonie. De tels transferts ont été réalisés avec succès avec une précision d'au moins 50 ns et des précisions de mesure de quelques nanosecondes entre les Laboratoires suivants: Raisting (République fédérale d'Allemagne) et Pleumeur-Boudou (France) [Brunet, 1979]; NRC (Canada), Pleumeur-Boudou (France) et LPTF (France) [Costain et autres, 1979]; NRC (Canada) et PTB (République fédérale d'Allemagne) via Raisting; Shanghai, Beijing et Nanjing (Chine); l'Institut chinois de métrologie (Nanjing) et PTB (République fédérale d'Allemagne); les Observatoires de Shanghai et de Shaanxi (Chine) et LPTF (France); NPL (Inde) et PTB (République fédérale d'Allemagne) [Mathur et autres, 1980].

Les comparaisons réalisées entre les Laboratoires NRC-LPTF sur des transferts réguliers de temps se sont poursuivies quatre ans, de juin 1978 à juillet 1982. En février 1980, le PTB a pris part à ces comparaisons périodiques effectuées par l'intermédiaire du satellite Symphonie. Le BIH a utilisé ces liaisons transatlantiques de temps plutôt que les liaisons Loran-C. Au cours de la plupart de ces transferts de temps, on a utilisé des signaux relativement simples, à 1 impulsion par seconde. Les principales contributions aux incertitudes globales du transfert de temps se rapportaient en général aux difficultés de détermination des temps de propagation exacts à travers l'équipement de la station terminale au sol et aux incertitudes associées aux liaisons horaires nécessaires entre les installations de réception des émissions du satellite et des laboratoires de métrologie. L'introduction d'une nouvelle technique de modulation de 1 MHz (modems conçus par le NRC) a permis de réduire à quelques dixièmes de nanosecondes l'incertitude aléatoire associée à la liaison spatiale. Le PTB étant venu se joindre aux comparaisons, il a été possible de mener trois séries de mesures à la fois et l'erreur de fermeture Δ qui en résulte était évaluée comme indication de l'incertitude. Avec une modulation de 1 Hz seulement on obtient $\Delta = -42 \pm 8$ ns tandis qu'avec le système à 1 MHz on obtient $\Delta = -8 \pm 6$ ns.

En 1978-79, le satellite CTS/Hermès commun aux Etats-Unis et au Canada a permis à l'USNO et au NBS des Etats-Unis ainsi qu'au NRC du Canada de faire des expériences avec certaines variantes des transferts dans les deux sens utilisés précédemment [Costain et autres, 1979]. Premièrement, on a utilisé avec succès des fréquences plus élevées, situées dans la bande des 12/14 GHz pour le trajet montant et pour le trajet descendant. Deuxièmement, comme dans la technique susmentionnée, des signaux de 1 MHz ont été échangés au cours d'une partie de l'expérience, en plus du signal habituel à 1 impulsion par seconde. D'où une plus grande précision de mesure, d'environ 0,2 ns (1σ), et des comparaisons de temps précises avec seulement quelques minutes ou même quelques secondes de temps de mesure effectif. Troisièmement, de petites stations de réception sur place avec des antennes paraboliques de 2,4 m seulement de diamètre ont pu être utilisées une partie du temps en deux des trois emplacements. Les échelles de temps UTC ont été comparées avec une incertitude d'environ 1×10^{-14} . Quatrièmement, il a été possible, à plusieurs occasions, de relier le Laboratoire NBS avec Pleumeur-Boudou (France) par une liaison à deux bonds, en reliant NBS et NRC via CTS/Hermès puis NRC et la France via Symphonie. Les précisions de mesure pour la liaison à deux bonds ont été inférieures à 10 ns (1σ).

Le laboratoire de l'Istituto Elettrotecnico Nazionale (IEN) en Italie a utilisé le satellite expérimental de communications Sirio-1 dans la bande des 12/17 GHz pour évaluer encore une autre variante de la technique de transfert du temps dans les deux sens [Detoma et Leschiutta, 1980]. Dans ce cas, le déplacement du satellite est compensé en permanence, de sorte qu'une seule liaison de communication est utilisée en partage de temps entre les deux stations. L'effet du déplacement du satellite sur la précision du transfert du temps n'est que de quelques nanosecondes pour des temps de mesure allant jusqu'à 20 s. Les précisions de mesure sont de 1 à 5 ns.

Le NRC a effectué à Ottawa des expériences de transfert de temps dans les deux sens par l'intermédiaire de satellites géostationnaires à 6/4 GHz en exploitation commerciale, au moyen de couples de signaux à ondes entretenues de faible puissance. Deux stations terriennes expérimentales, dotées d'antennes de 3 m et disposant d'une puissance de 1 W, ont été installées au niveau du sol, à 100 m du laboratoire de mesure des signaux horaires, avec une liaison directe par câbles triaxiaux [Costain et autres, 1982].

En 1983, on a transmis des signaux de $f_0 \pm 0,5$ MHz par l'intermédiaire du satellite Anik-A3 et on recueillait directement la fréquence 1 MHz [Costain et autres, 1983]. L'écart quadratique moyen des mesures était de 0,4 ns. Ces expériences ont montré que le transfert du temps par signaux à onde entretenue ou avec code pseudo-aléatoire est possible avec des stations terriennes de prix modique.

On a transformé l'un des terminaux de 3 m du NRC fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz de manière qu'il fonctionne dans celles des 14/12 GHz et l'on a acheté le modem pour code pseudo-aléatoire recommandé par le GTI 7/4. Un réseau expérimental utilisant un satellite géostationnaire 14/12 GHz pour le transfert bilatéral de signaux horaires est en cours de mise en place entre le NRC, le USNO et le NBS. Il devrait en résulter une vérification fort utile du transfert de temps actuellement effectué par le satellite GPS.

Au Japon, les Radio Research Laboratories (RRL) mettent actuellement au point un système national précis de comparaison du temps utilisant le satellite de télécommunication géostationnaire CS du Japon (satellite expérimental de télécommunication de capacité moyenne), des équipements SSRA (accès aléatoire par étalement du spectre) et des stations terriennes à 30/20 GHz, telles que la station principale de Kashima et deux petites stations mobiles. Des expériences de transfert bidirectionnel du temps ont été faites en 1981 et 1982 entre la station principale et une petite station située au siège des RRL et entre deux petites stations situées au même emplacement. Dans chaque cas, on a obtenu pour la fluctuation du temps une valeur efficace d'environ 1 ns et une stabilité de fréquence meilleure que 1×10^{-13} , la moyenne ayant été effectuée pendant une durée de 100 à 200 min. La précision de mesure a été estimée à environ 13 ns pour la comparaison du temps effectuée entre la station principale et la station du siège, par rapport à un transfert bidirectionnel de temps sur liaison hyperfréquences de Terre et à environ 0,74 ns pour la

comparaison avec les deux petites stations terriennes, effectuée selon la méthode de transfert bidirectionnel au même emplacement avec une horloge commune. Le temps de propagation de chaque station a été mesuré en injectant un signal à modulation par impulsions dans chaque liaison montante et chaque liaison descendante de la station et en détectant ce signal à l'autre extrémité du trajet, aux fins de comparaison avec l'impulsion d'entrée. Pour la station principale, le temps de propagation a été calculé avec une précision (capacité du système) d'environ 7,7 ns et pour les petites stations, il a été mesuré avec une précision d'environ 3,6 ns [IMAE et autres, 1983] (voir le Tableau III).

TABLEAU III – Résultats des mesures du temps de propagation dans les deux petites stations

	Temps de propagation (ns)
Temps de propagation sur la liaison montante de la station avec antenne de 1 m (U_1)	329,6
Temps de propagation sur la liaison descendante de la station avec antenne de 1 m (D_1)	372,0
Temps de propagation sur la liaison montante de la station avec antenne de 2 m (U_2)	361,3
Temps de propagation sur la liaison descendante de la station avec antenne de 2 m (D_2)	401,0
$K = (U_1 - D_1) - (U_2 - D_2)$ (K_1)	-2,7
K déterminé à l'aide de la méthode de l'horloge commune (K_2)	-6,3
$K_1 - K_2$	3,6

Au cours de l'été 1983, l'USNO, la COMSAT, l'Université technique de Berlin et la DFVLR (République fédérale d'Allemagne) ont fait des expériences intercontinentales de transfert de temps en utilisant des canaux de télécommunication du satellite Intelsat-V entre des stations situées à Washington aux Etats-Unis d'Amérique, et à Oberpfaffenhofen en République fédérale d'Allemagne.

Le signal horaire a été introduit, à la station terrienne, sous la forme d'une séquence de bruit pseudo-aléatoire avec un débit d'éléments de 2 MHz à L'interface de fréquence intermédiaire (FI), puis retransmis à l'extrémité de réception. La précision de transfert de temps est mesurée par détection de corrélation de la séquence pseudo-aléatoire d'origine avec sa réplique reçue.

En utilisant des stations terriennes au rapport G/T de 20 et de 26 dB(K⁻¹) (correspondant à des diamètres d'antenne de 2,2 et 4,5 m) et des puissances d'émetteur aussi peu élevées que 170 et 80 mW, respectivement, des expériences fiables de transfert de temps ont permis d'obtenir une valeur quadratique moyenne de gigue du signal horaire inférieure à 1 ns. Avec les caractéristiques qui ont été choisies pour la liaison, le signal de transfert de temps qui est émis sur une largeur de bande de 2 MHz est reçu avec un rapport signal/bruit de -9 dB, bien en dessous du niveau de bruit thermique.

4.1.2 GPS (Système mondial de positionnement)

Le GPS (aussi connu sous le nom de NAVSTAR), a été mis au point par le Département américain de la Défense, est un système de radionavigation/radiolocalisation de haute précision disponible en permanence [Milliken et Zoller, 1978]. Le système doit comprendre un total de 18 satellites en exploitation répartis sur 6 plans orbitaux. Les 18 satellites étant placés sur des orbites de 12 heures, plusieurs d'entre eux sont, à tout moment, vus en même temps d'un emplacement précis quelconque. Chaque satellite contient des horloges atomiques (des dispositifs au césium, au rubidium et à l'hydrogène ont été étudiés) qui produisent des signaux horaires extrêmement bien définis et faisant partie du message de navigation. Le système est soutenu par un vaste réseau de stations de contrôle et de stations de commande qui

apportent aux horloges atomiques installées à bord des corrections de rythme remises à jour. Bien que le temps du système GPS ne poursuive pas forcément l'UTC avec précision, sa relation avec l'UTC est connue à tout moment avec exactitude. Le signal complexe du GPS est émis aux usagers sur des fréquences de 1575 et 1228 MHz et peut être reçu au moyen de petites antennes équidirectives. Il comporte des renseignements codés: corrections d'horloge, corrections ionosphériques et données des éphémérides du satellite pour calculer le temps de propagation dans un sens. Le signal du GPS est conçu de manière que ses possibilités de navigation et de transfert de temps puissent être mises à disposition à deux niveaux de précision différents.

En 1985, le Département de la défense des Etats-Unis a annoncé que le code GPS C/A, avec les données relatives à l'heure et aux positions des satellites, continuerait à être offert aux usagers civils sans donner lieu à perception de taxes. De plus, il a été précisé que les imprécisions de deux sigma sur l'heure et les positions disponibles pour les usagers civils ne dépasseraient pas 250 ns (temps GPS relatif), 100 m (position horizontale) et 156 m (position verticale).

Six satellites GPS, actuellement en orbite, sont en cours d'évaluation. Tous transportent des étalons au rubidium et certains des étalons au césium. L'ensemble du système (18 satellites) doit être mis en place à la fin de la décennie 1980-1990. Diverses nouveautés en matière de navigation GPS et de récepteurs de temps, visant diverses applications, sont en cours d'élaboration.

On pourra peut-être utiliser les signaux horaires du GPS de plusieurs manières pour effectuer des transferts et des comparaisons de temps de haute précision. Dans le mode «normal», les signaux émis sont reçus à l'emplacement de l'utilisateur, décodés, corrigés des erreurs d'horloge du GPS, des effets ionosphériques et des éphémérides du satellite à l'aide de données codées dans l'émission; enfin ils sont comparés avec les données d'horloges locales. La précision possible dépendra fortement des données spécifiques de correction mises à la disposition des usagers.

Dans le mode d'utilisation à «visibilité commune», le même signal de GPS est reçu simultanément en deux emplacements (ou plus) [Allan et Weiss, 1980]. Etant donné que toutes les erreurs d'horloge et certaines des incertitudes dues aux éphémérides et à la correction du trajet sont communes aux observations de chaque emplacement, ces incertitudes se compensent dans une certaine mesure et une précision de synchronisation relativement bonne est possible. A présent, des comparaisons faites sur une grande échelle de temps et de fréquences GPS poursuivies par un grand nombre de laboratoires sur le plan mondial ont indiqué qu'on peut obtenir des comparaisons de temps avec des précisions meilleures que 10 ns et des comparaisons de fréquence avec des incertitudes inférieures à 1×10^{-14} dans des conditions d'exploitation normale [Allan et autres, 1985]. Une variante de cette technique, à savoir l'observation *séquentielle* du même satellite avec un décalage de temps peut aussi se révéler utile pour des transferts de temps intercontinentaux, du fait du comportement extrêmement stable des horloges des satellites GPS sur de nombreuses heures.

Etant donné que les comparaisons GPS se sont révélées 10 à 100 fois meilleures que les données correspondantes du Loran-C, certaines incohérences et erreurs aussi importantes que 1 μ s ont été détectées et éliminées dans le processus de formulation du TAI et de l'UTC. Les résultats du GPS ont été comparés avec les données des horloges portatives dans un certain nombre de cas et la conformité a été réalisée normalement à quelques dizaines de nanosecondes près dues aux combinaisons d'incertitudes propres aux techniques utilisées. Dans le cas des étalons primaires au césium de laboratoire tels que ceux qui sont exploités par NBS, NRC et PTB, les comparaisons de visibilité commune GPS permettent à présent de comparer ces dispositifs avec des contributions d'incertitude inférieurs à 1×10^{-14} provenant de la méthode de comparaison elle-même. Un certain nombre de comparaisons particulières d'échelles de temps et d'étalons primaires de fréquence utilisant le GPS sont citées dans [Allan et autres, 1985; USNO, 1985].

Plusieurs laboratoires ont fait connaître l'expérience qu'ils avaient pu obtenir de l'emploi de la technique GPS. Certains des résultats obtenus sont résumés ci-dessous.

En utilisant un récepteur GPS du commerce, le US Naval Observatory (USNO) a contrôlé les émissions GPS depuis novembre 1979. Les données GPS obtenues par cet observatoire sont disponibles depuis le 10 octobre 1980 (DJM = 44 522) sous une forme lisible par ordinateur. Les données les plus récentes peuvent être obtenues en temps réel auprès du service de données automatisé de l'USNO et elles sont publiées dans la brochure «Time Service Announcement» de l'USNO, série 4. Depuis le 1^{er} décembre 1982, l'heure du système GPS est maintenue à $\pm 1 \mu$ s de l'UTC (USNO) et les corrections transmises permettront une synchronisation à ± 100 ns de l'UTC (USNO).

Le National Bureau of Standards des Etats-Unis d'Amérique (NBS) a mis au point sa propre version d'un récepteur de signaux horaires GPS, conçu essentiellement pour être utilisé dans le mode de réception «visibilité commune». Les stabilités du récepteur interne sont de l'ordre de 1 ns et les stabilités du signal de satellite observées régulièrement sont de l'ordre de 5 ns pour des moyennes établies sur 15 s [Davis et autres, 1981a].

Les comparaisons de temps régulières effectuées à l'USNO et au NBS pendant de nombreux mois à l'aide de ces récepteurs de conception différente ont montré que le GPS est capable d'opérer des transferts de temps avec une précision meilleure que 100 ns [Putkovich, 1980; Davis et autres, 1981b]. Une série de comparaisons effectuées dans ces deux laboratoires pendant une période de 14 jours a permis de comparer leurs deux échelles de temps UTC avec une précision d'environ 2×10^{-15} .

Une comparaison des fréquences effectuée à l'échelle intercontinentale entre l'Agence spatiale de la République fédérale d'Allemagne (DFVLR) et l'USNO à Washington, DC, à l'aide d'un récepteur expérimental, a montré que la précision était de 2×10^{-14} au cours d'une période de mesure de 12 jours [Starker et autres, 1982].

Il a été possible, en utilisant un récepteur de signaux horaires GPS expérimental du Naval Research Laboratory (NRL), de comparer des masers à hydrogène situés aux Etats-Unis d'Amérique et en France [Wardrip et autres, 1983]. La «Jet Propulsion Lab» aux Etats-Unis d'Amérique utilise le GPS pour coordonner le temps et la fréquence entre trois horloges à maser à hydrogène situées à des distances approximativement égales les unes des autres autour de la Terre. En utilisant des récepteurs de signaux horaires GPS, les horloges à maser à hydrogène peuvent avoir des caractéristiques en temps quasi réel de moins de 50 ns en décalage temporel et de 10^{-15} en décalage fréquentiel [Clements et autres, 1984].

Le système de transfert de temps GPS est utilisé à l'Observatoire astronomique de Tokyo (TAO) depuis 1982 [Fujimoto et autres, 1983]. Des mesures régulières y sont effectuées, en collaboration avec plusieurs pays du monde entier. La liaison en visibilité commune à travers le Pacifique entre le TAO et le USNO [Allan et Weiss, 1980; Klepszynski, 1982; Allan et autres, 1985] a été vérifiée à l'aide d'expériences au moyen de trois horloges transportables; deux techniques ont donné des résultats concordants aux erreurs expérimentales près [Aoki et autres, 1984]. La précision du transfert de temps GPS sur cette liaison a été évaluée à 4×10^{-13} et à 3×10^{-14} , les moyennes ayant été effectuées pendant une durée de 1 et 10 jours respectivement.

Les RRL ont procédé, depuis le mois d'août 1984, à des comparaisons internationales de temps au moyen de deux récepteurs GPS de transfert de temps, réalisés indépendamment l'un de l'autre, l'un par les RRL, l'autre par une entreprise japonaise. Ces récepteurs ont, aux fins de ces comparaisons, une précision de 6 à 20 ns; le temps de propagation des récepteurs ont été mesurée avec une précision de 15 ns à l'aide d'un simulateur de signaux GPS [Yoshimura et autres, 1986; Imae et autres, 1985].

Le National Bureau of Standards (NBS) a établi en 1983 un nouveau service d'étalonnage fondé sur la technique de visibilité commune du GPS. Le NBS fournit à chaque emplacement d'utilisateur un système de réception GPS, clés en main, complètement automatique, comprenant un récepteur, un dispositif de commande du système, une mémoire et des possibilités d'analyse, un accès téléphonique ainsi qu'une formation du personnel et un appui au système. Le récepteur qui est situé chez l'utilisateur communique automatiquement ses données à un ordinateur NBS qui mémorise les données brutes, détermine quels sont les éléments de données qui conviennent pour les calculs de transfert de temps et donne une valeur optimalement filtrée pour le temps et la fréquence de l'horloge de l'utilisateur par rapport aux échelles de temps atomique du NBS. L'utilisateur a accès à l'un des ordinateurs NBS qui peut lui fournir aussi bien les données brutes que les résultats de l'analyse de NBS.

L'utilisation croissante de la technique de visibilité commune du GPS a profité de plusieurs améliorations. Beaucoup de laboratoires font connaître les résultats de leur comparaison du GPS en les enregistrant dans le système d'information GE Mark 3. Cet échange de données s'est trouvé simplifié grâce à un accord sur l'utilisation d'un format de données «normalisé». De plus, pour aider les laboratoires à fixer le moment convenable pour effectuer des mesures GPS qui soient simultanées avec celles d'autres laboratoires déterminés, le NBS produit et diffuse régulièrement des informations de programme basées sur un certain nombre de régions géographiques. Le nombre de sources d'approvisionnement de récepteurs de signaux horaires GPS semble augmenter sensiblement. Tandis que quelques laboratoires continuent à développer leurs propres versions, un certain nombre de produits sont apparus dans le commerce.

4.1.3 LASSO (*synchronisation par laser à partir de l'orbite des satellites géostationnaires*)

Ce système, proposé à l'Agence spatiale européenne (ASE) par le Bureau international de l'heure (BIH), utilise un rétro réflecteur à laser installé à bord d'un satellite géostationnaire approprié et des stations au sol équipées de télescope à laser qui doivent être synchronisées [Serene et Albertinoli, 1979]. Chaque station au sol émet des impulsions-laser vers l'engin spatial, détecte les impulsions renvoyées et mesure le temps de propagation aller-retour. Sur l'engin spatial, les impulsions provenant des stations au sol sont aussi détectées et leur instant d'arrivée est mesuré au moyen d'une horloge placée à bord, de manière que puisse être calculée la différence entre les instants d'arrivée. Les valeurs obtenues pour l'engin spatial sont alors combinées avec les temps de propagation mesurés pour chaque station au sol et avec la relation temporelle connue entre les impulsions laser émises et l'horloge locale de chaque station pour donner les différences de temps entre les horloges des stations au sol. Par la suite, les données temporelles de l'engin spatial peuvent être envoyées aux stations au sol sur des voies de télémesure normales et les stations au sol peuvent échanger leurs données par téléimprimeur ou autres liaisons de Terre.

Bien que le système LASSO n'ait pas encore été expérimenté, on prévoit de lancer sur l'engin spatial METEOSAT-P2 un bloc d'équipement LASSO en 1986. On prévoit qu'un bloc d'équipement LASSO normalisé pourra être ajouté assez facilement et à peu de frais à de futurs satellites qui s'y prêteront.

4.1.4 *Expérience de transfert T/F au moyen de la navette spatiale américaine*

L'organisation NASA des Etats-Unis se propose de réaliser une expérience de transfert de temps à l'aide de l'une des navettes spatiales, dans l'intention de démontrer la possibilité de transfert de temps à 1 ns et de comparaisons de fréquences à 1×10^{-14} au niveau mondial [Decher et autres, 1980]. La technique comprendrait l'emploi de systèmes d'horloge avec masers à hydrogène à bord de l'engin spatial et au sol, l'utilisation de trois signaux à onde entretenue à hyperfréquence distincts (liaisons dans les deux sens et dans un seul sens) pour annulation de l'effet Doppler et transfert T/F et d'une liaison-laser pour étalonnage des liaisons à hyperfréquences et comparaisons entre les diverses techniques.

La première expérience proposée devrait se dérouler au cours de l'un des vols sur orbite à basse altitude de la navette spatiale mais elle n'a pas encore été entièrement approuvée. Si le procédé est démontré avec succès avec la navette spatiale, on pourra alors adapter la technique et l'équipement de base à des missions opérationnelles ultérieures, qui pourraient utiliser des orbites plus élevées, de manière à ce que le temps d'observation au cours de chaque passage au-dessus d'une station au sol participant à l'expérience soit plus long.

La République fédérale d'Allemagne prévoit de procéder à une expérience de transfert de temps, sur une navette spatiale des Etats-Unis d'Amérique, avec utilisation de liaisons à hyperfréquence à deux fréquences et d'horloges atomiques installées à bord [Starker et Rother, 1979].

4.1.5 *Utilisation des attributions faites par la CAMR-79 entre 13 et 31 GHz*

La Conférence administrative mondiale des radiocommunications de 1979 a fait les attributions additionnelles suivantes au transfert T/F par satellite:

- 13,4-14,0 GHz (Terre-espace)
- 20,2-21,2 GHz (espace-Terre)
- 25,25-27,0 GHz (Terre-espace) et
- 30,0-31,3 GHz (espace-Terre).

Dans tous les cas les attributions au transfert T/F sont des attributions à titre secondaire, si bien qu'il faudrait un grand nombre d'arrangements de coordination et de partage avec les services primaires et d'autres services secondaires pour s'assurer que des brouillages nuisibles ne sont pas causés aux autres services. Toutefois, compte tenu de la grande largeur de bande disponible, cet effort mérite d'être fait, surtout en prévision de l'avenir, lorsque des précisions de transfert de temps extrêmes (< 1 ns) seront nécessaires et techniquement possibles.

Jusqu'à présent, ces fréquences n'ont pas été utilisées pour le transfert T/F et aucune expérience n'en est au stade définitif de la planification. Avant qu'elles puissent être employées de manière rentable, il faudra que la technologie nécessaire dans cette gamme de fréquences soit encore améliorée.

4.1.6 *Réception simultanée de signaux de mesure des distances*

La technique proposée consiste dans la réception simultanée en deux emplacements ou plus, de signaux de mesure des distances provenant de systèmes à satellites appropriés et dans la comparaison de la phase reçue avec les données d'horloges locales. Si ces mesures sont effectuées au moment où les signaux de mesure des distances sont utilisés pour déterminer avec précision la position du satellite, les incertitudes différentielles du trajet de propagation peuvent être très faibles, d'où des comparaisons de temps très précises entre les deux horloges.

Le système mondial de météorologie par satellite, qui comprend les satellites américains GOES, les satellites européens METEOSAT et les satellites japonais GMS, offre quelques possibilités d'utilisation de cette technique aux fins de comparaisons régionales du temps. Alors que le système GOES ne comporte pas actuellement de signaux de mesure de distance appropriés, les systèmes METEOSAT et GMS emploient, quant à eux, une méthode de détermination de la distance par trilatération qui comporte l'émission, plusieurs fois par jour, de signaux hyperfréquences de mesure de distance. Il se peut que, aujourd'hui ou plus tard, on dispose d'autres systèmes à satellites qui conviennent bien à cette méthode de transfert de l'information temps.

Une autre expérience en vue d'évaluer cette technique a été réalisée en 1970 par NBS/USA, qui a utilisé les signaux de mesure des distances avec les satellites américains LES-6 et Tacsat pour synchroniser les horloges d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud [Hanson et Hamilton, 1971]. Bien que le faible pouvoir séparateur des mesures des distances soit limité à quelques dixièmes de microsecondes, les précisions de synchronisation obtenues, l'applicabilité fondamentale de la technique a été établie. Des études de cette technique, faites en République fédérale d'Allemagne, montrent que l'utilisation d'antennes paraboliques de 2 m de diamètre avec des signaux de mesure des distances provenant du satellite Meteosat, qui sont disponibles toutes les trois heures, permettraient de parvenir à des précisions de synchronisation du temps de 30 ns [Nottarp et autres, 1979].

4.2 Solutions visant surtout la diffusion générale T/F

4.2.1 Signaux horaires provenant de satellites météorologiques

Quatre satellites géostationnaires, actuellement en exploitation, observent les conditions météorologiques au niveau mondial: les deux satellites américains GOES situés au-dessus du territoire américain, à 75° et 135° de longitude ouest, le satellite européen Meteosat situé à 0° de longitude et le satellite japonais GMS situé à 140° de longitude est. Les deux satellites GOES sont les seuls à être équipés du système de code horaire décrit ci-après mais, compte tenu de leur similarité avec les deux autres, il sera peut-être possible, à l'avenir, d'en équiper les engins spatiaux européens et japonais. Le fonctionnement normal du système GOES est le suivant: un message d'interrogation de données de 100 bit/s est émis en permanence par la station de commande maîtresse GOES, située à Wallops Island, Virginie, par l'intermédiaire des deux satellites américains en exploitation et à destination de nombreuses plates-formes de collecte de données. Ce message d'interrogation de données est relié aux plates-formes sur deux fréquences voisines de 468 MHz et contient un code horaire entrelacé, fourni par le US National Bureau of Standards et rapporté à lui [Hanson et autres, 1979]. Le code horaire contient des informations sur le jour de l'année, l'heure, la minute et la seconde ainsi que sur la position du satellite, qui sont remises à jour toutes les quatre minutes. Il existe un équipement de réception de fabrication commerciale: soit il décode simplement et affiche l'information de date avec une précision de ± 10 ms (± 1 ms si l'utilisateur corrige les données reçues en fonction de son emplacement sur la Terre), soit il décode aussi les données relatives à la position du satellite, calcule automatiquement le temps de propagation du signal et règle le signal de sortie à 1 impulsion par seconde de manière qu'il soit «à l'heure» à environ 50 μ s près. Les signaux horaires provenant des satellites sont issus des étalons de fréquence atomiques entretenus par le NBS et installés de l'île de Wallops [Beehler et autres, 1979].

Le code horaire décrit est émis via les deux satellites américains GOES depuis 1975. Des satellites de remplacement étant ajoutés au système, on prévoit que les futurs satellites américains GOES continueront tous à émettre ce code. L'expérience acquise au cours de cette période indique:

- que le code horaire, tel qu'il est transmis, peut être maintenu indéfiniment à ± 10 μ s de l'UTC (NBS) et
- que le code horaire, tel qu'il est reçu (après correction en fonction du temps de propagation), présente généralement des variations de quelques dixièmes de microseconde au cours d'une journée et des variations inférieures à 100 μ s au cours de toutes les périodes plus longues, abstraction faite de variations occasionnelles plus grandes dues aux éléments orbitaux de qualité médiocre utilisés à bord des satellites, pour générer les prévisions de position [Beehler, 1982].

Le code horaire du GOES est très largement utilisé dans l'hémisphère occidentale pour la surveillance et le contrôle d'événements se produisant dans des réseaux d'énergie électrique, la corrélation des observations enregistrées dans les réseaux de contrôle des données scientifiques, sismiques ou autres, la synchronisation des systèmes de communication, les mesures de phase dans les réseaux d'énergie électrique et les étalonnages d'horloge en général.

4.2.2 Utilisation de répéteurs à 400,1 MHz sur des satellites disponibles

La Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales de 1971 (Genève) a attribué la fréquence de 400,1 $\pm$ 0,05 MHz à l'usage exclusif de la diffusion T/F par satellite. De nombreux besoins généraux de temps à des niveaux de précision modestes pourraient être efficacement satisfaits par des émissions de signaux horaires dans un seul sens via un répéteur à 400,1 MHz ajouté à un ou plusieurs satellites disponibles. Avec la largeur de bande utilisable attribuée de ± 25 kHz, on disposerait d'une souplesse considérable pour concevoir le signal horaire. On pourrait bien entendu ajouter des annonces parlées, des tops horaires, des tonalités et des codes horaires comme on le fait actuellement dans les services qui fonctionnent sur ondes décimétriques. Par ailleurs, on pourrait aussi ajouter un type de code PRN de bas niveau, que l'utilisateur aurait la faculté de décoder, moyennant un coût plus élevé, afin d'obtenir une précision plus grande, peut-être meilleure que la microseconde. Etant donné que le signal horaire du satellite est international par nature, on pourrait aussi envisager de n'émettre qu'un code horaire simple via le répéteur de satellite, code qui pourrait alors aisément être interfacé, dans le récepteur de l'utilisateur, à des «micro-plaquettes parlantes» à état solide avec stockage numérique de la voix pour créer localement l'annonce horaire parlée dans la langue désirée. L'élaboration et la mise en place de ces services permettraient l'élimination progressive de nombre des services actuels de transfert de signaux horaires fonctionnant sur ondes décimétriques et la solution éventuelle des problèmes actuels de brouillage dans les ondes décimétriques.

Bien qu'aucune expérience de diffusion de signaux horaires à l'aide de cette fréquence particulière n'ait eu lieu, la possibilité de fournir un tel service par satellite aux usagers T/F généraux a déjà été démontrée. En août 1973, le National Bureau of Standards (NBS) a achevé une expérience de deux ans qui avait consisté à diffuser, dans un seul sens, des signaux du même genre que ceux de WWV au moyen du satellite ATS-3 [Hanson et Hamilton, 1974]. Même avec la fréquence relativement basse de 135 MHz sur le

trajet espace-Terre, on a obtenu une précision de transfert du temps de 25 μ s en exploitation dans un seul sens. Pour calculer les temps de propagation avec ce degré de précision, une simple règle à calcul établie à cet effet a suffi. Cette expérience a permis de démontrer que de tels résultats peuvent être obtenus régulièrement par un personnel sans grande qualification après un apprentissage de quelques heures. On a pu constater que, par rapport aux émissions sur ondes décimétriques, la réception de signaux de satellite était bien plus fiable et ne demandait que des techniques et un équipement de réception simples, d'un coût et d'une complexité comparables. Les signaux horaires d'ATS-3 n'avaient qu'un caractère expérimental et n'étaient émis que deux fois par jour dans des périodes de 15 min; malgré cela, le NBS a reçu des milliers de demandes de renseignements qui prouvent l'intérêt suscité par cette technique.

On ne connaît à ce jour aucun plan d'utilisation de l'attribution de la fréquence 400,1 MHz.

4.2.3 Possibilités particulières avec les satellites de télécommunications

La méthode directe qui consiste à utiliser des voies louées sur des satellites de communication pour émettre des signaux horaires a déjà été examinée dans le cadre des possibilités de transfert de haute précision entre points fixes, dans lesquelles la grande largeur de bande disponible est une nécessité si l'on veut obtenir de très bons résultats. Toutefois, dans certains cas particuliers, il peut exister d'autres manières de viabiliser ces satellites polyvalents pour la diffusion T/F générale. Il a été proposé d'utiliser les répéteurs à ondes métriques sur ces satellites pour la diffusion de signaux horaires. Ces répéteurs servent surtout pendant les premières manœuvres de mise sur orbite et peuvent donc être affectés à d'autres applications secondaires une fois que le satellite est bien placé sur son orbite d'exploitation.

L'Istituto Elettrotecnico Nazionale (IEN) a utilisé, sur le satellite expérimental de télécommunications Sirio-1, l'un de ces répéteurs fonctionnant en ondes métriques à 136 MHz [Detoma et autres, 1981]. L'expérience portait également sur l'utilisation du répéteur en ondes centimétriques fonctionnant à 17 GHz sur la liaison montante et à 14 GHz sur la liaison descendante. On a utilisé, pour les essais, un signal horaire codé [Detoma et autres, 1983]. La largeur de bande disponible dans les deux cas (ondes métriques et ondes centimétriques) était de quelques kHz. L'écart type était de 1,5 ms pour l'expérience en ondes métriques et de 30 μ s pour l'expérience en ondes centimétriques.

Entre 1977 et 1979, l'Inde a été en mesure de tirer parti de la disponibilité du satellite Symphonie-1 pour procéder à des expériences de diffusion des signaux horaires. Les expériences effectuées et les écarts type mesurés étaient les suivants:

- diffusion en ondes décimétriques avec un format typique semblable à ATA, 50 ns;
- diffusion d'un code horaire; et
- diffusion de signaux horaires par des émissions directes de télévision, 70 ns. Dans ce dernier cas, une précision de 0,25 μ s a été confirmée.

Dans un cas particulier (celui de l'Inde), des dispositions ont été prises pour donner accès au NLP à une portion du spectre utilisé par les télécommunications par le satellite national indien de télécommunications Insat aux fins spécifiques de diffusion de signaux horaires en mode opérationnel. Un canal de 10 kHz a été mis à disposition dans le canal de fréquence de la bande S (environ 2 GHz) et on prévoit actuellement la fourniture d'un signal horaire complet, comprenant des renseignements sur la position du satellite pour la correction par les usagers du temps de propagation dans un sens.

4.3 Possibilités pour la diffusion générale et la diffusion de haute précision à la fois

4.3.1 Système de navigation TRANSIT

Le système de navigation TRANSIT des Etats-Unis d'Amérique emploie actuellement cinq satellites opérationnels placés sur orbite polaire qui émettent sans interruption des signaux horaires et des signaux de navigation sur les deux fréquences 150 et 400 MHz. L'heure rapportée à l'observatoire de la Marine (USNO) peut être extraite de repères de temps émis toutes les deux minutes, avec détermination du temps de propagation sur le trajet d'après les renseignements des éphémérides des satellites compris dans le format du signal TRANSIT. Le temps est calculé sur le satellite à partir d'oscillateurs à quartz qui sont corrigés, si besoin est, par les stations de contrôle au sol pour que le temps reçu demeure à $\pm 100 \mu$ s de l'UTC (USNO). Il existe des récepteurs commerciaux capables d'établir automatiquement une moyenne entre des satellites Transit choisis ou au nombre choisi de passages de satellite. Moyennant un emploi judicieux de la sélection des satellites et de la moyenne des passages des satellites en un emplacement donné, les usagers généraux peuvent avoir accès à une référence de temps qui demeure normalement à $\pm 10 \mu$ s de l'UTC (USNO).

Le système TRANSIT est entièrement opérationnel avec cinq satellites et doit continuer à assurer le service pendant de nombreuses années encore. Il est soutenu par la Marine américaine qui publie également des corrections, mettant en rapport le temps de chaque satellite Transit et l'UTC (USNO).

Il ressort d'expériences de comparaison du temps menées avec un satellite expérimental amélioré Transit (Nova) que des précisions supérieures à 100 ns sont possibles [Rueger et Bates, 1978]. Cette amélioration de la qualité, par rapport aux résultats d'*exploitation* TRANSIT, tient surtout à l'utilisation de signaux de satellite à spectre étalé et à codage par bruit pseudo-aléatoire (PRN) et à l'emploi de récepteurs perfectionnés. Deux satellites TRANSIT (Nova) améliorés sont actuellement en orbite.

Etant donné que le système TRANSIT fonctionne depuis 1965, une longue expérience a été acquise. On a montré que la réception dans un seul sens des signaux TRANSIT donne une référence de temps qui demeure généralement à $\pm 20 \mu\text{s}$ de l'UTC (USNO), soit une ressource T/F très utile pour les besoins généraux de diffusion [Laidet, 1972; Beehler et autres, 1979].

De plus, les améliorations apportées à la nouvelle série Nova de satellites Transit permettront peut-être de parvenir à l'avenir à une précision meilleure que la microseconde. Avec un premier satellite expérimental Nova, le Laboratoire de physique appliquée de l'Université Johns Hopkins (Etats-Unis d'Amérique) a procédé à de vastes essais de temps [Taylor, 1974]. Ce satellite transporte une horloge à quartz et produit un signal de bruit pseudo-aléatoire (PRN) avec un débit binaire de 1,67 Mbit/s sur une porteuse à 400 MHz. On utilise également une porteuse à 150 MHz pour corriger les effets de la réfraction ionosphérique. Deux types d'expériences ont été effectués. Dans le premier (synchronisation (régionale), les émissions du satellite ont été observées simultanément en deux emplacements, ce qui a permis de synchroniser les horloges locales avec une précision de $\pm 50 \text{ ns}$. Dans le second (synchronisation mondiale), on s'est proposé de synchroniser des horloges situées sur différents continents. Dans une opération de ce genre, on prévoit que les possibilités de transfert du temps seront principalement limitées par l'incertitude sur la position du satellite et par l'instabilité de son oscillateur. Les expériences ont consisté à repérer l'instant d'arrivée des signaux horaires PRN lors d'un passage du satellite et à se servir de ces données pour prévoir l'instant d'arrivée au passage suivant, puis à comparer les résultats des prévisions avec les mesures. On a abouti à la conclusion que les erreurs de synchronisation à l'échelle mondiale sont inférieures à 75 ns pour des prévisions de 100 min. On a estimé qu'en utilisant les deux porteuses pour déterminer les corrections ionosphériques, l'erreur due à cette source devrait être inférieure à 30 ns.

Il n'existe actuellement aucune condition opérationnelle approuvée pour ajouter le code PRN au système opérationnel TRANSIT et il est encore incertain que ces signaux améliorés (pour le temps) seront disponibles à long terme.

4.3.2 TDRS (*système de poursuite et de relais de données par satellite*)

Le système TDRS est mis en œuvre pour assurer dans les années 80, le relais dans les deux sens de la poursuite et d'autres types de données entre les installations au sol de la NASA et des satellites placés sur orbite à faible altitude [Chi, 1979]. Le système comprendra deux satellites géostationnaires opérationnels situés à 41° et 171° de longitude ouest et un satellite de réserve en orbite, avec le centre de commande de White Sands, Nouveau Mexique. Avec ces emplacements, le système TDRS pourrait assurer des liaisons de transfert de temps à destination de laboratoires situés entre le Japon et l'Australie via l'Amérique du Nord et comprenant la totalité de l'Europe. Le système TDRS vise surtout à communiquer avec des engins spatiaux en orbite, mais certaines stations de poursuite de la NASA en feront aussi partie. Certains organismes de métrologie pourront aussi participer, en qualité d'usagers. Dans un mode éventuel de haute précision et dans les deux sens, chaque usager des signaux horaires pourrait avoir un répéteur dans la bande S (environ 2 GHz) avec des systèmes auxiliaires appropriés sur place. Un signal horaire, composé d'un point identifié dans une séquence de code PRN, pourrait être émis sur la bande K (18-26 GHz) par la station maîtresse de commande à destination du satellite TDRS puis d'un usager des signaux horaires dans la bande S. Cet usager pourrait alors mesurer l'instant d'arrivée par rapport à son horloge locale, coder toute information sur le signal TDRS, puis renvoyer encore une fois le signal à la station de commande par le satellite. L'usager pourrait aussi émettre un signal horaire local à destination de la station de commande. Les temps de propagation peuvent être déterminés avec précision et des précisions de transfert du temps d'environ 10 ns doivent être possibles. Aux fins d'exploitation, on pourrait envisager une séquence périodique de mesures comparant tour à tour chaque laboratoire de métrologie avec l'horloge maîtresse de référence du Nouveau Mexique. Ces comparaisons régulières pourraient être programmées et coordonnées par la NASA, le BIH ou une autre organisation intéressée.

Des usagers situés en un emplacement fixe sur Terre pourraient aussi avoir la faculté d'utiliser les signaux TDRS selon un mode de moindre précision et à un seul sens en faisant des calculs appropriés et en apportant les corrections voulues pour le temps de propagation. Il est possible qu'un code horaire du jour puisse être ajouté aux informations TDRS.

Le système TDRS sera bientôt complètement opérationnel, mais on n'a encore fait aucune expérience visant à évaluer ses capacités pour le transfert du temps. On ignore encore quel accès au système TDRS (s'il doit y avoir accès) les usagers des informations T/F pourront avoir dans l'avenir.

4.3.3 Satellites de télévision

Des comparaisons de temps par moyen terrestre, dans des régions locales ou sur de grandes distances, sont effectuées régulièrement dans de nombreux pays, deux emplacements observant simultanément une impulsion de synchronisation désignée dans le format normal d'émission de télévision. Lorsque deux emplacements sont visibles en même temps d'un seul émetteur de télévision, les différences de temps d'horloge peuvent être mesurées jusqu'à des précisions d'environ 100 ns ou meilleures, en admettant que la différence de temps de propagation puisse aussi être déterminée. La méthode est aussi utile sur de plus grandes distances lorsque l'on peut observer deux émetteurs de télévision différents, reliés dans un réseau de télévision. Avec la tendance actuelle qui est de développer les services de télévision à partir de satellites spécialisés, on pourra peut-être appliquer les mêmes méthodes de synchronisation du temps par télévision de Terre au cas des satellites de télévision [Kovačević et autres, 1979 et 1981]. Les impulsions de télévision par satellite peuvent certainement être reçues sur de plus grandes régions et comparées aux horloges locales avec un grand pouvoir séparateur (quelques nanosecondes). Toutefois, la précision avec laquelle deux horloges peuvent être comparées est plus ou moins grande selon que l'on connaît ou non la différence entre les temps de propagation. Une idée intéressante consiste à mesurer avec précision le satellite de télévision à l'aide de quelques stations de mesure au laser puis d'utiliser ces informations pour calculer les temps de propagation. Une autre variante, suggérée par le BIH, consisterait à utiliser la technique LASSO pour étalonner l'instant d'émission de l'impulsion de télévision par satellite qui pourrait alors être utilisé pour transférer le temps à destination des usagers individuels par réception dans un seul sens de l'impulsion. Une troisième possibilité consisterait à déterminer la position du satellite avec une très grande précision, grâce à une méthode bidirectionnelle appliquée, au minimum, par trois stations émettrices au sol [Kovačević et autres, 1981; Hartl et autres, 1983]. Une autre variante consisterait, l'accent étant cette fois mis plutôt sur la diffusion générale de signaux horaires, dans le codage de l'information temps dans l'intervalle vertical de suppression du signal de télévision. Cette information peut alors être reçue et décodée sur de vastes régions de réception avec une précision modeste mais suffisante pour satisfaire de nombreux besoins de garde-temps.

Un certain nombre de satellites de télévision expérimentaux sont en cours d'évaluation et, dans quelques cas, ont déjà été utilisés pour effectuer des études de diffusion T/F. Au Japon, des expériences préliminaires de diffusion de fréquences ont été conduites à l'aide du satellite expérimental de radiodiffusion de capacité moyenne (BSE), lequel fonctionne dans la bande des 12 GHz sur le trajet descendant et dans celle des 14 GHz sur le trajet montant. La stabilité de fréquence à court terme de la sous-porteuse de télévision reçue était, d'après les mesures, aussi bonne qu'en radiodiffusion (télévisuelle) de Terre. On avait par exemple $\sigma_y(10\text{ s}) = 3 \times 10^{-11}$. Afin de mettre au point une méthode d'annulation du décalage Doppler, des essais ont été effectués avec une servocommande de phase (incluse dans la liaison par satellite) et une commande de fréquence avec précompensation utilisant les valeurs mesurées des données orbitales du satellite. Les deux premières de ces méthodes permettant de réduire à une valeur au plus égale à 1×10^{-12} le décalage Doppler résiduel à la station de commande; la méthode faisant appel aux données orbitales devrait donner une valeur de l'ordre de quelque 10^{-11} . C'est ainsi que, dans l'emplacement le plus reculé du Japon, qui se trouve à environ 1500 km de la station d'émission BSE, on estime que la valeur maximale du décalage de fréquence dû à l'effet Doppler est de $\pm 2 \times 10^{-10}$ sans aucune correction [Ishida et autres, 1979; Saburi et autres, 1979].

A la suite d'autres expériences conduites au moyen du BSE, on a obtenu une précision de transfert de fréquence de 5×10^{-12} (1σ) en un point distant d'environ 1000 km de la station d'émission, lorsque l'on a appliqué à la valeur mesurée une correction calculée fondée sur les données orbitales. A la suite de ces expériences, en utilisant une impulsion de synchronisation télévisuelle, on a obtenu une précision de 0,2 μs (1σ) et une précision de 0,12 μs (1σ) au cours d'une comparaison de temps effectuée pendant cinq mois entre deux horloges au césium situées à environ 400 km l'une de l'autre. Lors d'une expérience de transfert de temps normalisé avec insertion de code de temps dans l'intervalle vertical de suppression, on a obtenu dans tout le pays une précision de 10 μs lorsque la commande de compensation de l'effet Doppler était effectuée à la station d'émission [Saburi et autres, 1980].

Ces dernières années, depuis 1983, on a procédé en Europe à une expérience de comparaison de signaux horaires faisant intervenir les organisations VSL, NPL, IEN, DFVLR, TUG et PTB et utilisant les signaux de télévision relayés sur la fréquence 11,682 GHz par le satellite expérimental de télécommunication européen OTS-2. Pendant une semaine du mois d'octobre 1983, on a pu comparer les mesures de transfert de signaux de temps et de fréquence effectuées, entre IEN et TUG, par l'intermédiaire de OTS-2 et de NAVSTAR/GPS. La différence des différences de fréquence relative déduite des mesures faites avec OTS-2 et GPS, a été inférieure à 3×10^{-14} et l'écart type des deux sortes de mesures était inférieur à 20 ns [Kirchner et autres, 1985].

Les mesures faites avec OTS-2 ont montré que l'on pourra, à l'aide de satellites de télévision directe, établir des liaisons de haute qualité pour la comparaison des informations de temps et de fréquence. Naturellement, pour des comparaisons de temps de haute précision, il faudra étalonner les temps de propagation de l'équipement de réception [De Jong et autres, 1981; De Jong et Kaarls, 1983].

Pour de courtes distances entre les laboratoires qui participent aux expériences, on peut se contenter, pour le calcul des temps de propagation, des méthodes de détermination de l'orbite normalement utilisées pour les satellites de télécommunication. Pour de longues lignes de base, la position du satellite doit être déterminée avec le maximum de précision et ceci peut être fait par des mesures précises de distance effectuées par les laboratoires eux-mêmes. Ceci a été prouvé par des mesures comme celles faites à Graz, dont la qualité est comparable à celles effectuées par des stations de poursuite fonctionnant en ondes centimétriques [Kirchner et autres, 1984].

4.4 *Comparaison des diverses possibilités*

Le Tableau I donne quelques renseignements comparatifs supplémentaires sur les différentes possibilités: couverture, précision, coût pour les usagers, et possibilité de réalisation sur place (par rapport à la nécessité de liaisons de transfert de temps auxiliaires à destination d'installations de réception en dehors de l'emplacement) et stade expérimental ou opérationnel à long terme du système ou de la technique. Le Tableau II récapitule brièvement certains des principaux avantages et inconvénients des diverses possibilités de transfert T/F par satellite.

ANNEXE I

COMPARAISONS TEMPS/FRÉQUENCE PAR SATELLITE

Année	Organisation et références	Satellite	Technique et description	Précision annoncée (A) ou précision (P)
1962	USNO/Etats-Unis, NPL/Royaume-Uni, RGO/Royaume-Uni [Steele et autres, 1964]	Telstar 6390 MHz	Dans les deux sens	1 μ s (A); liaison par satellite uniquement 20 μ s (A); ensemble de la liaison
1965	USNO/Etats-Unis, RRL/Japon [Markowitz et autres, 1966]	Relay-II 1723 MHz (tr. montant) 4175 MHz (tr. descendant)	Dans les deux sens	0,1 μ s (A) 0,01 μ s (P)
1967	NBS/Etats-Unis [Gatterer et autres, 1968]	ATS-1 136 MHz	Dans un sens	10-60 μ s (A)
1967	NBS/Etats-Unis [Jespersen et autres, 1968]	ATS-1 149 MHz (tr. montant) 136 MHz (tr. descendant)	Dans les deux sens	< 5 μ s (A)
1968	NASA/Etats-Unis [Laos, 1972]	GEOS-2 136 MHz	Dans un sens; horloges à quartz à bord du satellite	20 μ s (A)
1969	CNES/France [Laidet, 1972]	Transit 400 MHz	Dans un sens; horloges à quartz à bord du satellite	20 μ s (A)
1970	NRL/Etats-Unis [Murray et autres, 1971]	Satellite de télécommunications en bande X; US Defense	Dans les deux sens	0,1-0,2 μ s (A)
1970	NBS/Etats-Unis [Hanson et Hamilton, 1971]	Tacsat/LES-6 signaux de mesure par tonalité latérale sur une porteuse à 250 MHz	Utilisation dans un seul sens de signaux de mesure à faible résolution	40 μ s (A)
1971	NASA/Etats-Unis [Mazur, 1972]	ATS-3 6212 MHz (tr. montant) 4119 MHz (tr. descendant)	Dans les deux sens	50-70 ns (A)
1971	NBS/Etats-Unis [Hanson et Hamilton, 1974]	ATS-3 136 MHz	Transmission dans un sens de signaux WWV par répéteur de satellite	25 μ s (A) 10 μ s (P)
1974	APL/JHU/Etats-Unis [Taylor, 1974]	Transit amélioré 150 MHz 400 MHz	Dans un sens; horloge à bord du satellite; signal codé PRN	< 75 ns (A) 10 ns (P)
1974	NASA/Etats-Unis, FAA/Etats-Unis [Chi et Byron, 1975]	ATS-1 6301 MHz (tr. montant) 4178 MHz (tr. descendant)	Dans les deux sens; signal codé PRN	50 ns (A) 20 ns (P)
1975	NRL/Etats-Unis, USNO/Etats-Unis, RGO/Royaume-Uni, DNM/Australie	NTS-1 335 MHz	Dans un sens; horloge à bord du satellite	< 500 ns (A) 50 ns (P)
1975	RRL/Japon, NASA/Etats-Unis, USNO/Etats-Unis [Saburi et autres, 1976]	ATS-1 6 GHz (tr. montant) 4 GHz (tr. descendant)	Dans les deux sens avec système de communication à accès aléatoire et spectre étalé	10 ns (A) 1 ns (P)

ANNEXE I (suite)

Année	Organisation et références	Satellite	Technique et description	Précision annoncée (A) ou précision (P)
1975	NBS/Etats-Unis [Beehler et autres, 1979]	GOES 468 MHz	Dans un sens	< 100 μ s (A)
1976	CNES/France, LPTF/France, PTB/République fédérale d'Allemagne [Brunet, 1979]	Symphonie 6 GHz (tr. montant) 4 GHz (tr. descendant)	Dans les deux sens	50 ns (A) < 10 ns (P)
1978	DNM/Australie, NRC/Canada, RGO/Royaume-Uni, BIH, IFAG/République fédérale d'Allemagne, NASA/Etats-Unis, NBS/Etats-Unis, NRL/Etats-Unis, USNO/Etats-Unis [Buisson et autres, 1978]	NTS-1 NTS-2 335 MHz 1580 MHz	Dans un sens horloges à bord des engins spatiaux	< 1 μ s (A)
1979	NRC/Canada, NBS/Etats-Unis, USNO/Etats-Unis, LPTF/France [Costain et autres, 1979]	CTS/Hermès Symphonie 4/6 GHz 12/14 GHz	Dans les deux sens	50 ns (A) 0,2 ns (P)
1979	NPL/Inde, PTB/République fédérale d'Allemagne [Mathur et autres, 1980]	Symphonie 4/6 GHz	Dans les deux sens	< 100 ns (A) < 10 ns (P)
1979	IEN/Italie [Detoma et Leschiutta, 1980]	Sirio-1 12/17 GHz	Dans les deux sens; une seule voie en temps partagé	50-100 ns (A) 1-5 ns (P)
1979	NIM/République populaire de Chine, PTB/République fédérale d'Allemagne	Symphonie	Dans les deux sens	< 80 ns (A) < 10 ns (P)
	SO et CSAO/République populaire de Chine, LPTF/France	Symphonie	Dans les deux sens	< 100 ns (A) < 10 ns (P)
Depuis 1980	NBS/Etats-Unis, USNO/Etats-Unis, BIH/France, LPTF/France, PTB/République fédérale d'Allemagne, NRL/Etats-Unis, VSL/Pays-Bas, TUG/Autriche, TAO/Japon, JPL/Etats-Unis, RRL/Japon	GPS	Visibilité commune	< 100 ns (A) 10-30 ns (P)
1980	RRL/Japon [Saburi et autres, 1980]	BSE	Dans un sens	5×10^{-12} (1000 km) (A) 0,2 μ s (A) 0,12 μ s (P)
1978- 1982	NRC/Canada, LPTF/France, CNES/France	Symphonie	Dans les deux sens	0,5 ns (P)
1980- 1982	PTB/République fédérale d'Allemagne	Symphonie	Dans les deux sens	0,5 ns (P)

ANNEXE I (suite)

Année	Organisation et références	Satellite	Technique et description	Précision annoncée (A) ou précision (P)
Depuis 1981	RRL/Japon [Imae et autres, 1983]	CS 30/20 GHz	Dans les deux sens, antenne de 1,3 m-2 m avec SSRA Dans les deux sens, antenne de 1 m-2 m avec SSRA	1 ns (P) 13 ns (A) 1 ns (P) 0,7 ns (A)
1982	VSL/Pays-Bas, NPL/Royaume-Uni, IEN/Italie, DFVLR, PTB/République fédérale d'Allemagne, TUG/Autriche [De Jong et autres, 1981; De Jong et Kaarls, 1983]	OTS-2	Dans un sens	300 ns (A) 20 ns (P)
1983	USNO/Etats-Unis, COMSAT/Etats-Unis, DFVLR/République fédérale d'Allemagne	Intelsat-V	Dans les deux sens	300-500 ps (P)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLAN, D. W., DAVIS, D. D., WEISS, M., CLEMENTS, A., GUINOT, B., GRANVEAUD, M., DORENWENDT, K., FISCHER, B., HETZEL, P., AOKI, S., FUJIMOTO, M. K., CHARRON, L. et ASHBY, N. [juin 1985] Accuracy of international time and frequency comparisons via global positioning system satellites in common-view. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 118-125.
- ALLAN, D. W. et WEISS, M. A. [mai 1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphie, Pa., Etats Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 334-347 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- AOKI, S., FUJIWARA, K. et YAMAZAKI, T. [1984] Loran-C versus GPS. Time and Latitude Bull., Tokyo Astronomical Observatory, Vol. 58, 25.
- BEEHLER, R. E. [décembre 1982] GOES satellite time code dissemination. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- BEEHLER, R. E., DAVIS, D. D., CATEORA, J. V., CLEMENTS, A. J., BARNES, J. A. et MENDEZ-QUINONES [novembre 1979] Time recovery measurements using operational GOES and TRANSIT satellites. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 283-315.
- BRUNET, M. [juillet-août 1979] Synchronization of atomic clocks through the "Symphonie" satellite. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 721-730.
- BUISSON, J., McCASKILL, T., OAKS, J., LYNCH, D., WARDRIP, C. et WHITWORTH, G. [novembre 1978] Submicro-second comparisons of time standards via the Navigation Technology Satellites (NTS). Proc. 10th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 601-629.
- CHI, A. R. [novembre 1979] Satellite time transfer via TDRSS and applications. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 45-65.
- CHI, A. R. et BYRON, E. [décembre 1975] Two-way time transfer experiment using a synchronous satellite. Proc. 7th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 357-377.
- CLEMENTS, P., BORUTZKI, S. et KIRK, A. [1984] Maintenance of time and frequency in the Jet Propulsion Lab's deep space network using the global positioning system. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- COOPER, R. S. et CHI, A. R. [juillet-août 1979] A review of satellite transfer technology: accomplishments and future applications. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 605-619.

- COSTAIN, C. C. et autres [1979] Two-way time transfer via geostationary satellites NRC/NBS, NRC/USNO and NBS/USNO via Hermes and NRC/LPTF (France) via Symphonie, Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 499-520.
- COSTAIN, C. C., DAAMS H. et BOULANGER, J. -S. [1982] Two-way satellite time transfer using low power CW tones. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 31-37.
- COSTAIN, C. C., DAAMS, H., BOULANGER, J. -S. et DOUGLAS, R. [1983] Time dissemination from the National Research Council of Canada. Proc. 37th Annual Symposium on frequency control, US Army Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique.
- DAVIS, D. D., WEISS, M., CLEMENTS, A. et ALLAN, D. W. [décembre 1981a] Unprecedented syntonization and synchronization accuracy via simultaneous viewing with GPS receivers and construction characteristics of an NBS/GPS receiver. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 527-547.
- DAVIS, D. D., WEISS, M., CLEMENTS, A. et ALLAN, D. W. [mai 1981b] Construction and performance characteristics of a prototype NBS/GPS receiver. Proc. 35th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphie, Pa., Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- DECHER, R., ALLAN, D., ALLEY, C., VESSOT, R. et WINKLER, G. [décembre 1980] A space system for high-accuracy global time and frequency comparison of clocks. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 99-115.
- DE JONG, G. et KAARLS, R. [avril 1983] Report on time synchronization via OTS-2. CEE – Bureau of Référence, Bruxelles, Belgique.
- DE JONG, G., KAARLS, R., KIRCHNER, D. et RESSLER, H. [decembre 1981] Time comparison via OTS-2. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 347-367.
- DETOMA, E. et LESCHIUTTA, S. [décembre 1980] Two-way sequential time synchronization: preliminary results from the SIRIO-1 experiment. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC. USA, 329-351.
- DETOMA, E. et autres [1981] Time code dissemination experiment via the SIRIO-1. NASA Conf. Publ. 2220, 469-488. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- DETOMA, E., LESCHUITTA, S. et PETTITI, V. [1983] Disseminazione di segnali di tempo via satellite geostazionario, *Elettronica e Telecomunicazioni*, Vol. 32, 4, 163-169.
- EASTON, R. L., FISHER, L. C., HANSON, D. W., HELLWIG, H. W. et RUEGER, L. J. [octobre 1976] Dissemination of time and frequency by satellite. *Proc. IEEE*, Vol. 64, 1482-1493.
- FUJIMOTO, M. -K., FUJIWARA, K. et AOKI, S. [1983] International time comparison by a GPS time receiver, Proc. 15th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 71.
- GATTERER, L. E., BOTTONNE, P. W. et MORGAN, A. H. [décembre 1968] Worldwide clock synchronization using a synchronous satellite. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-17, 4, 372-378.
- HANSON, D. W. et HAMILTON, W. F. [septembre 1971] Clock synchronization from satellite tracking. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems*, Vol. AES-7, 5, 895-899.
- HANSON, D. W. et HAMILTON, W. F. [septembre 1974] Satellite broadcasting of WWV signals. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems*, Vol. AES-10, 5, 562-573.
- HANSON, D. W., DAVIS, D. D. et CATEORA, J. V. [juillet-août 1979] NBS time to the western hemisphere by satellite. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 731-740.
- HARTL, Ph., GIESCHEN, N., MÜSSENER, K. M. et SHAFER, W. [1983] Higt-accuracy global time transfer via geosynchronous telecommunications satellites with Mitrex. *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, Vol. 5, 7, 335-342.
- IMAE, M., OKAZAWA, H., SATO, T., URAZUKA, M., YOSHIMURA, K. et YASUDA, Y. [1983] Time comparison experiments with small K-band antennas and SSRA equipments via a domestic geostationary satellite. *IEEE Trans. Inst. Meas.*, Vol. 32, 1, 199-203.
- IMAE, M., URATSUKA, M., MIKI, C., MORIKAWA, T., AKATSUKA, K. et YOSHIMURA, K. [1985] Development of a GPS time transfer receiver and time comparison results, Proc. 39th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- ISHIDA, T., SOEJIMA, S. et ICHIKAWA, Y. [décembre 1979] Present situation of Japanese satellite broadcasting for experimental purpose. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-25, 4, 105-112.
- JESPERSEN, J., KAMAS, G., GATTERER, L. et MacDORAN, P. [juillet 1968] Satellite VHF transponder time synchronization. *Proc. IEEE*, Vol. 56, 7, 1202-1206.
- KIRCHNER, D., KOUELKA, O. et RIEDLER, W. [1984] Range measurements to the OTS-2 satellite by means of a STELLA terminal. *ESA J.*, 8, 133-142.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., CORDARA, F., GALLIANO, P. G. et PETTITI, V. [juin 1985] A comparison of time and frequency measurements via OTS-2 with results obtained by NAVSTAR/GPS and LORAN-C. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 126-129.

- KLEPCZYNSKI, W. J. [1982] Systematic effects in GPS time transfer. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 491.
- KOVAČEVIĆ, B., DIMITRIJEVIĆ, B., ARSIĆ, M. et GOLUBOBIĆ, L. [octobre 1981] Precise international T/F comparisons via ground and satellite TV systems. *J. Inst. Electron. Telecomm. Engrs.*, Vol. 27, 10, 450-456.
- KOVAČEVIĆ, B., DIMITRIJEVIĆ, B., ARSIĆ, M. et KOVAČEVIĆ, N. [1979] Precise real-time signal dissemination over the TV broadcasting satellite. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 685-694.
- LAIDET, L. M. [mai 1972] Worldwide synchronization using the TRANSIT satellite system. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 60, 5, 630-632.
- LAIOS, S. C. [mai 1972] Satellite time synchronization of a NASA network. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 60, 5, 632-633.
- MARKOWITZ, W., LIDBACK, C. A., UYEDA, H. et MURAMATSU, K. [décembre 1966] Clock synchronization via Relay II satellite. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-15, 4, 177-184.
- MATHUR, B. S., BANERJEE, P., SOOD, P. C., SAXENA, M., KUMAR, N. et SURI, A. K. [décembre 1980] Precise time and frequency intercomparison between NPL, India and PTB, Federal Republic of Germany via satellite Symphonie-1. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 863-875.
- MAZUR, W. E., Jr. [mai 1972] Dual transponder time synchronization at C band using ATS-3. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 60, 5, 633-634.
- MILLIKEN, R. J. et ZOLLER, D. J. [été 1978] Principle of operation of NAVSTAR and system characteristics. *Navigation*, Vol. 25, 2, 95-106.
- MURRAY, J. A., PRITT, D. L., BLOCKER, L. W., LEAVITT, W. E., HOOTEN, P. M. et GORING, W. D. [avril 1971] Time transfer by Defense Communications Satellite. Proc. 25th Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 186-193 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- NOTTARP, K., SCHLÜTER, W. et HÜBNER, U. [novembre 1979] One-way time transfer via METEOSAT capable of 30 ns accuracy. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 329-343.
- PUTKOVICH, K. [décembre 1980] USNO GPS program. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- RUEGER, L. J. et BATES, A. [1978] NOVA satellite experiment. *Radio Sci.*, Vol. 14, 707-714.
- SABURI, Y., YAMAMOTO, M. et HARADA, K. [décembre 1976] High-precision time comparison via satellite and observed discrepancy of synchronization. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-25, 4, 473-477.
- SABURI, Y., YASUDA, Y., KOBAYASHI, S. et SATO, T. [novembre 1979] T & F comparison via broadcasting satellite and Navigation Technology Satellite. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 315-329.
- SABURI, Y., YASUDA, Y., KOBAYASHI, S., SATO, T. y IMAE, M. [1980] Experiment of standard frequency and time signal dissemination via the BSE. 31st Congress International Astronautical Federation (IAF).
- SERENE, B. et ALBERTINOLI, P. [novembre 1979] The LASSO experiment. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 145-171.
- STARKER, S., NAU, H., HAMMESFAHR, J. et TSCHIESCHE, H. [1982] NAVEX a space shuttle experiment with atomic clocks. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 181-202.
- STARKER, S. et ROTHER, D. [1979] A spacelab experiment on clock synchronization and one-way ranging. *Ortung und Navigation I/79 Vierteljahresmitteilung der Deutschen Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON)*, 35-53.
- STEELE, J. McA., MARKOWITZ, W. et LIDBACK, C. A. [décembre 1964] Telstar time synchronization. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-13, 4, 164-170.
- TAYLOR, R. J. [29-31 mai 1974] Satellite-to-ground timing experiments. Proc. 28th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 384-388 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- USNO [1985] United States Naval Observatory. Time Service Announcement, Series 16.
- WARDRIIP, C., BUISSON, J., OAKS, O., LISTER, M., STEBRINS, S., GUINOT, B., GRANVEAUD, M., FREON, G., DUBOIS, B., SCHLÜTER, W., NOTTARP, K., REINHARDT, V., KRUGER, R., DACHEL, P. et DETOMA, E. [1983] An international time transfer experiment via the Global Positioning System (GPS). Proc. 37th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- YOSHIMURA, K., IMAE, M., URATSUKA, M., MORIKAWA, T., YOSHINO, T., KOBAYASHI, S. et IGARASHI, T. [janvier 1986] Research activities on time and frequency transfer using space links. *Proc. IEEE*, Vol. 74, 1, 157-160.

BIBLIOGRAPHIE

Documents du CCIR

[1978-82]: 7/131 (Italie).

RAPPORT 576-3

DIFFUSION DE FRÉQUENCES ÉTALON PAR STABILISATION DE LA FRÉQUENCE PORTEUSE D'UNE STATION DE RADIODIFFUSION

(Programme d'études 4A/7)

(1974-1978-1982-1986)

De nombreux utilisateurs du service de fréquences étalon et de signaux horaires, notamment dans les industries radioélectriques et électroniques, n'ont besoin que d'une référence de fréquence de précision moyenne. Ces utilisateurs sont souvent situés dans un environnement électromagnétique où de sévères brouillages peuvent réduire considérablement l'utilité des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes attribuées ainsi que dans les autres bandes. En outre, il est souhaitable qu'un équipement simple et peu coûteux permette d'effectuer ces comparaisons de fréquence.

Ces exigences sont satisfaites en Europe par plusieurs émetteurs de fréquences étalon et de signaux horaires dans la bande 5 et par la stabilisation de la porteuse des stations de radiodiffusion: Allouis, 162 kHz; Donebach, 153 kHz; Droitwich, Westerglen, Burghead, 200 kHz (voir la Note 1); Motala, 189 kHz et Milan I, 900 kHz. Les porteuses des stations précitées sont obtenues à partir d'étalons atomiques de fréquence. Pour de plus amples détails sur certaines de ces stations, on se reportera au Rapport 267.

Compte tenu des caractéristiques de propagation des ondes kilométriques, et en fonction de la puissance émise, la zone de service principale de ces stations peut être très grande (avec, par exemple, un rayon de quelques centaines de kilomètres). Dans cette zone, il est possible de faire des comparaisons de fréquence avec une incertitude comprise entre 1×10^{-11} et 1×10^{-9} , pourvu que les mesures soient effectuées pendant les heures de jour, et avec une durée de mesure suffisante.

Des expériences ont été faites aux Etats-Unis d'Amérique dans la bande 6, avec la stabilisation de la porteuse d'une station de radiodiffusion à 650 kHz, fonctionnant avec une puissance de la porteuse de 50 kW. Une incertitude des comparaisons de fréquence de 1×10^{-10} a été obtenue, à une distance de 800 km, pendant les heures de jour.

En République fédérale d'Allemagne, environ 160 émetteurs de télévision fonctionnent dans la bande 9, avec des porteuses télécommandées au moyen d'une fréquence étalon de 10 MHz fournie par les lignes de distribution des programmes de télévision établies sur des faisceaux hertziens. On a observé (voir le Rapport 363) un écart moyen de la fréquence porteuse normalisée de 3×10^{-12} avec un écart type de 3×10^{-11} . Au moyen des porteuses stabilisées, des comparaisons de fréquence avec une incertitude de quelque 10^{-10} peuvent être effectuées en moins d'une minute.

En URSS, la diffusion des fréquences étalon se fait au moyen (voir la Note 1) de porteuses stabilisées des stations de radiodiffusion RV-166 (Irkoutsk), 200 kHz (voir la Note 2) avec une puissance de la porteuse de 40 kW et, RV-76 (Novosibirsk), 272 kHz, qui émettent en classe d'émission A3EGN. (Double bande latérale, une seule voie, modulée en amplitude par du son de qualité radiophonique (monophonique).)

L'incertitude en fréquence des signaux émis est de 5×10^{-12} .

L'intérêt de la stabilisation de la porteuse de stations de radiodiffusion est accentué par le fait qu'on utilise des fréquences allouées et des émetteurs déjà existants sans dégrader leur mission primitive. De plus, ces stations fournissent, en général, un champ d'une intensité suffisante pour assurer un bon rapport signal sur bruit.

Note 1. — 198 kHz après le 1^{er} février 1988 (voir la Résolution N° 500 de la CAMR-79, Genève).

Note 2. — 270 kHz après le 1^{er} février 1990 (voir la Résolution N° 500 de la CAMR-79, Genève).

RAPPORT 577-2

DIFFUSION DE SIGNAUX HORAIRES PAR SUPERPOSITION D'UNE MODULATION DE PHASE A LA MODULATION D'AMPLITUDE D'ÉMISSIONS DE RADIODIFFUSION SONORE

(Programme d'études 4B/7)

(1974-1978-1982)

Un moyen de diffuser les signaux horaires avec la précision exigée par nombre d'utilisateurs et sans accroître l'encombrement des bandes attribuées au service des fréquences étalon et des signaux horaires, consiste à faire appel à des émetteurs destinés à d'autres services. On peut, en particulier, se servir d'un émetteur classique de radiodiffusion sonore et superposer à sa modulation d'amplitude une modulation de phase grâce à laquelle sont transmis, sous une forme codée, des repères de seconde et des informations de date (minute, heure, jour, mois, an).

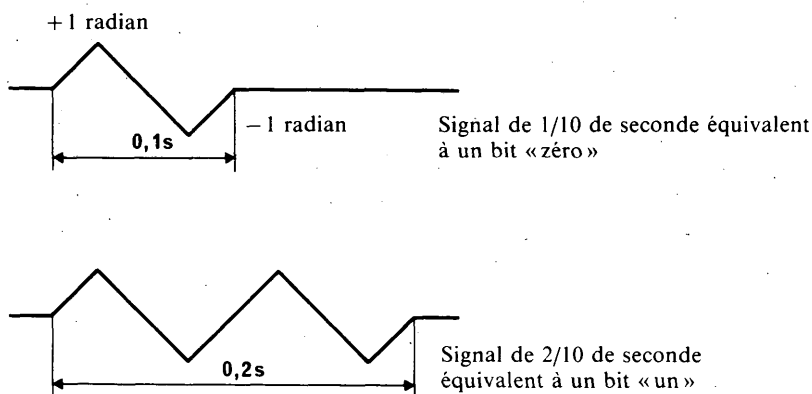
Le récepteur approprié peut jouer le rôle d'un organe d'affichage du temps par télécommande, dont l'exactitude dépend uniquement de celle de l'échelle de temps utilisée à l'émission.

Cette technique est expérimentée en France, en modulant un émetteur de radiodiffusion en bande 5 (émetteur d'Allouis à 162 kHz dont la puissance est de 2 MW).

La transmission de l'information codée s'effectue selon le «code lent» de un bit par seconde, le cycle complet étant de 1 min.

Le code utilisé est celui de l'émetteur DCF77, avec quelques particularités (voir le Rapport 578 et la Note (2) du Tableau II du Rapport 267).

La modulation de phase se fait selon le modèle ci-dessous:



Le signal de temps obtenu (sur le territoire français) a une précision de 1 ms et un écart type de l'ordre de 0,2 ms.

BIBLIOGRAPHIE

- GABRY, A. [16-20 septembre 1974] Diffusion de fréquences étalon et de signaux horaires à partir d'émetteurs de radiodiffusion à modulation d'amplitude. IX^e Congrès international de chronométrie, Stuttgart, République fédérale d'Allemagne.
- GABRY, A. [1980] Diffusion de l'heure par codage de la phase d'un émetteur de radiodiffusion à modulation d'amplitude. *Onde Electrique*, Vol. 60, 10, 51-54.

RECOMMANDATION 583

CODES HORAIRES*

(Question 7/7)

Le CCIR,

(1982)

CONSIDÉRANT

- que, dans de nombreuses branches de la science et de la technique, il est nécessaire de lier les événements à une référence de temps obligeant à connaître la date (année, mois, jour) et l'heure;
- que cette référence de temps peut être transmise sous forme codée à un débit de 1 bit/s («code lent») pendant environ une minute;
- que la largeur de bande nécessaire à la transmission d'une telle information codée est très faible, ce qui donne lieu à une utilisation économique du spectre et permet de recevoir l'information de temps dans de bonnes conditions de fiabilité;

* Des informations supplémentaires sont données dans le Rapport 578.

- d) que les «codes lents» sont très utilisés et qu'ils peuvent être émis par des stations de radiodiffusion à modulation d'amplitude ordinaires, sans dégrader la qualité du service primaire par l'emploi d'une modulation de phase de l'onde porteuse;
- e) que le code horaire utilisé pour la première fois par l'émetteur de fréquences étalon et de signaux horaires DCF77 est actuellement employé dans plusieurs pays d'Europe, et qu'il s'est révélé être de grande utilité;
- f) qu'il est souhaitable d'utiliser le même code horaire dans de vastes zones géographiques;
- g) que, dans certaines régions du monde, par exemple, dans bon nombre de pays en développement, aucun code horaire n'a encore été introduit,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que l'on encourage l'introduction de codes horaires;
2. que si, dans la Région 1, un service de signaux horaires propose un code horaire, celui-ci soit conforme à un des codes déjà approuvés, comme c'est le cas du code utilisé par l'émetteur DCF77;
3. que si un service de signaux horaires d'une autre Région envisage d'introduire un code horaire, on prenne en considération les avantages présentés par l'adoption de la solution appliquée dans la Région 1.

RAPPORT 578-2

CODES HORAIRES

(Question 7/7)

(1974-1978-1982)

L'évolution de la situation au cours des dernières années a fait ressortir la nécessité de transmettre des informations de temps plus complètes que celles qui sont fournies par les signaux habituels de secondes et de minutes dans le cadre du service de fréquences étalon et de signaux horaires. Les besoins à cet égard, qui peuvent impliquer l'indication codée de la minute, de l'heure et du jour de l'année, relèvent de différents domaines et l'on pourrait ainsi, par exemple, fournir une base de temps commune pour des systèmes de contrôle dispersés sur une vaste aire géographique et équipés d'appareils fonctionnant sans surveillance. Un nombre croissant d'applications est prévu dans les domaines des sciences, des industries et des administrations.

Grâce à la collaboration des divers groupes d'utilisateurs des Etats-Unis, une série de codes horaires a été normalisée et adoptée. Ils ont reçu les qualificatifs de «décimal série» (DS), de DCB (décimal codé binaire) et de codes horaires binaires groupés parallèles (PB) [IRIG, 1970 et 1980; NASA/GSFC, 1970-81; NBS, 1979].

Le code, dit PB (binaire parallèle) a été conçu afin de faciliter le traitement automatique des données. On s'est avant tout penché sur les applications aux transferts de temps entre Terre et satellite, ou entre satellites [Chi, 1979a et b]. Pour cette raison, on n'a pas toujours adopté les unités de temps classiques, bien que l'on s'en soit tenu strictement au concept du système international (SI) d'unités.

Un code PB, comme son nom l'indique, consiste en groupes de nombres binaires, dont chacun est défini comme une unité de temps. On a adopté des groupes, plutôt qu'un groupe unique, afin de s'adapter non seulement aux unités de temps SI, mais aussi aux besoins divers des utilisateurs en matière de précision et d'exactitude. Le code PB5, représenté à la Fig. 1, illustre ce concept.

La Fig. 2 montre un code horaire DCB série type qui consiste en une trame temporelle comprenant une séquence d'ondes carrées, ou impulsions. Les impulsions sont disposées selon une trame, de telle manière que leurs positions permettent de désigner une unité de temps. A l'intérieur de chaque unité de temps, ou sous-trame, un groupe de quatre impulsions est utilisé comme élément de comptage. La largeur de chaque impulsion est utilisée pour définir un état binaire. Les quatre impulsions de la sous-trame reçoivent les poids binaires 1, 2, 4 et 8, de manière à former un chiffre de 0 à 9. Chaque sous-trame est séparée de la suivante par un repère de référence de sous-trame et chaque trame principale est séparée de la suivante par un repère de référence de trame à la fin de chaque trame principale.

La station de fréquence étalon et de signaux horaires WWV a été la première à ajouter à son programme de modulation des informations de temps complètes par codage, vers 1960. Des codes horaires ont été ensuite inclus dans les émissions des stations WWVH et WWVB (60 kHz). Dans les émissions en ondes décimétriques, les signaux de codage sont émis sur une sous-porteuse à 100 Hz. Pour la station WWVB, le niveau de la porteuse est réduit de 10 dB pour chaque élément binaire.

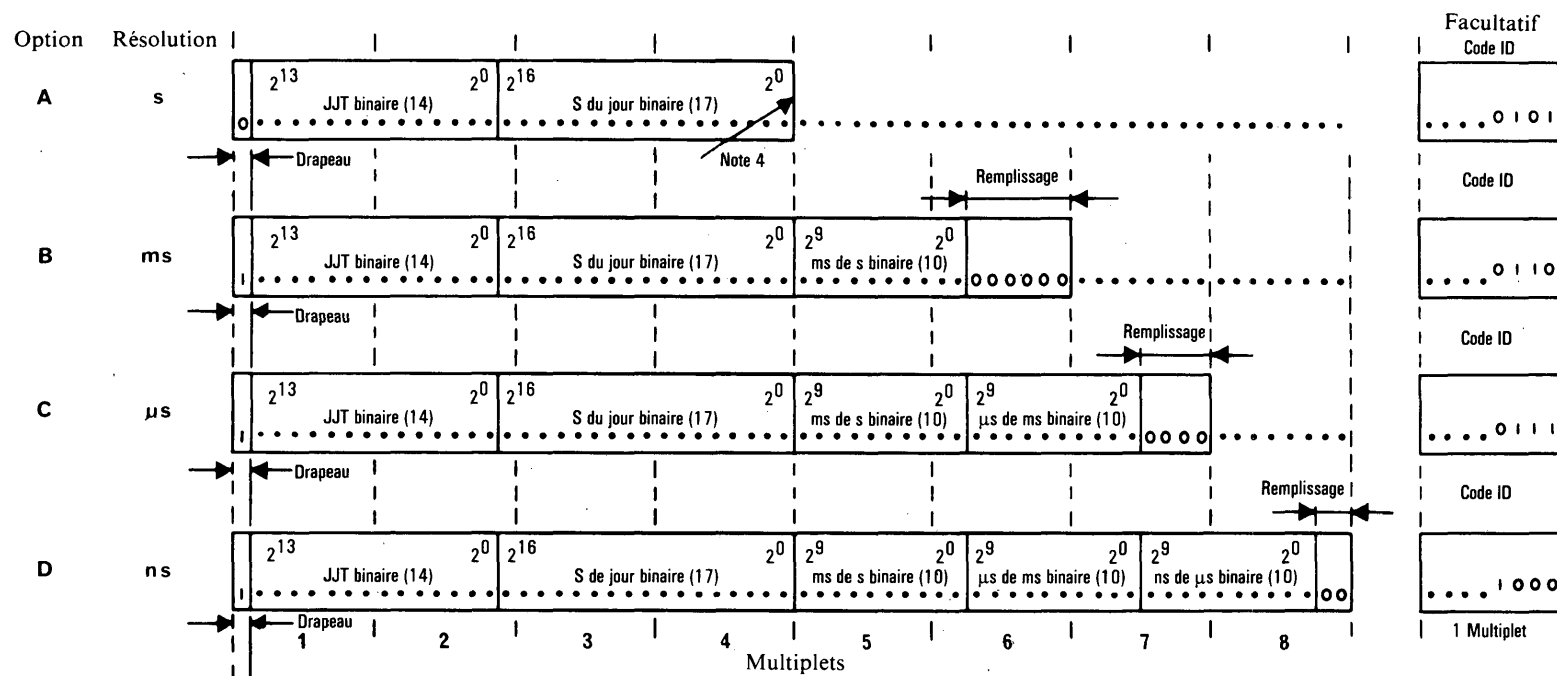


FIGURE 1 — Code horaire binaire groupé parallèle PB5 et options de résolution

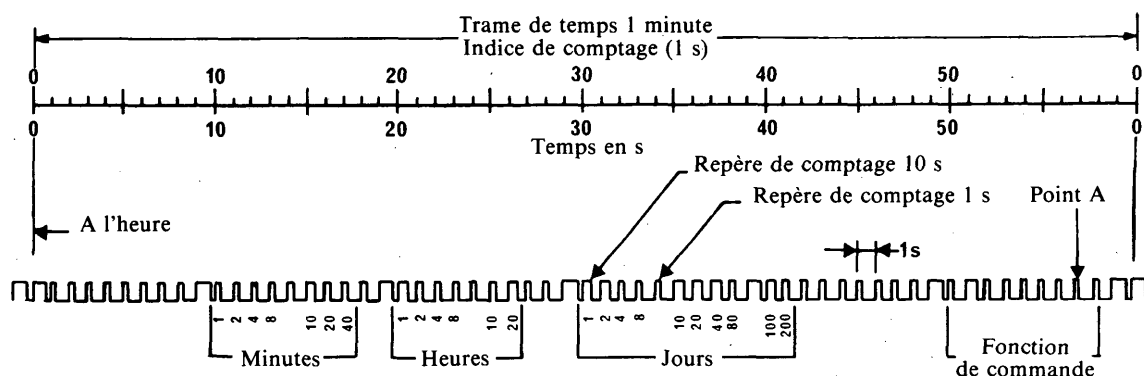
Note 1. — Les pointillés représentent les positions des bits.

Note 2. — Le chiffre entre parenthèses représente le nombre de bits dans chaque groupe.

Note 3. — Des bits de remplissage peuvent être ajoutés au groupe secondaire le moins significatif dans l'option B, C ou D, comme indiqué, pour maintenir des frontières de multipléts entiers.

Note 4. — Le jour julien tronqué (JJT) et les groupes de seconde du jour sont à la droite de cette frontière ; les autres groupes sont à gauche.

JJT = DJM - 40 000 (voir la Recommandation 457).



Heure au point A = 21 : 10 57
= 21 heures 10 minutes 57 secondes du jour 173

FIGURE 2 — Format caractéristique de code horaire DCB

Un code horaire MDF est inclus dans les impulsions des 31^e à 39^e secondes de CHU, pour donner le jour, l'heure, la minute et la seconde. On a choisi le système MDF à 300 bauds en raison de son utilité démontrée dans la transmission de données commerciales et de la facilité avec laquelle on peut disposer de l'équipement commercial. Dans de sévères conditions de bruit, le décodage s'est révélé beaucoup plus fiable qu'avec les codes équivalents à modulation d'amplitude.

A la suite de DCF77 en 1973 [Becker et Hetzel, 1973], un certain nombre de stations européennes d'émission de fréquences étalon et de signaux horaires dans la bande 5 ont ajouté une information de temps codé dans leurs émissions.

Deux méthodes ont été appliquées, selon la largeur de bande disponible et le degré d'immunité au bruit du décodeur.

Pour parvenir au maximum de sécurité, le «code lent», au taux de un bit/s, a été adopté d'abord par DCF77, puis par MSF 60 kHz. L'information complète s'étend alors sur presque une minute.

On considère que cette méthode a deux grands avantages: la largeur de la bande nécessaire est restreinte (moins de 30 Hz) et la faible rapidité de transmission permet le décodage avec des décodeurs de construction simple. Ces avantages sont particulièrement précieux pour les stations éloignées qui fonctionnent sans surveillance. Pour DCF, l'équipement de réception et de décodage a été décrit par [Hetzel et Röhbeck, 1974], et pour MSF 60 kHz, par [Cross, 1976].

Si l'émetteur dispose d'une plus grande largeur de bande, on peut au contraire employer le «code rapide», pour lequel on choisit le débit binaire de telle sorte que l'information complète soit donnée en 0,5 s environ. Un tel code est transmis par MSF 60 kHz et par OMA 50 kHz.

Un «code rapide» similaire est également diffusé en Italie par la RAI sur les réseaux MA et MF, environ 25 fois par jour.

Les formats de code généralement utilisés peuvent contenir des informations sur la seconde, la minute, l'heure, le jour du calendrier, le jour de la semaine, le mois, l'année, le jour Julien modifié et dans certains cas DUT1, ainsi qu'une indication quand le temps diffusé diffère du temps du fuseau horaire.

Une caractéristique commune des services DCF77, MSF 60 kHz et Allouis 162 kHz est l'utilisation des codes DCB. Ils ont aussi la même forme de modulation de la durée d'impulsions, les zéros binaires étant représentés par des repères de 0,1 s et les uns binaires par des repères de 0,2 s.

Les codes utilisés ne sont pas tous identiques. Depuis septembre 1981, les repères des 17^e et 18^e secondes de DCF77 indiquent si l'heure diffusée est UTC ou UTC plus 1, 2 ou 3 heures [Becker et Hetzel, 1981]. L'émission française Allouis 162 kHz a le même code que DCF77 avec l'information supplémentaire que le jour en cours est un jour férié ou non, indiqué sur la 14^e seconde [Gabry, 1980] (voir le Rapport 577).

Ces codes ne sont pas tous considérés comme parvenus à leur forme finale; il convient que les autorités responsables énumérées dans l'Annexe I au Rapport 267 fournissent, au moment opportun, les informations pertinentes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BECKER, G. et HETZEL, P. [1973] Kodierte Zeitinformation über den Zeitmarken- und Normalfrequenzsender DCF77 (Informations de temps codées de l'émetteur de fréquences étalon et de signaux horaires DCF77). *PTB-Mitt.*, Vol. 83, 163.
- BECKER, G. et HETZEL, P. [juin 1981] Informationen über DCF77: Status der Ausstrahlung, Zeitcode, Zonenzeitkodierung (Informations relatives à DCF77: caractéristiques de l'émission, code horaire, codage de l'heure du fuseau horaire). *PTB-Mitt.*
- CHI, A. R. [19-21 novembre 1979a] A Grouped Binary Time code for Telemetry and Space Applications. International Telemetering Conference, San Diego, Ca., Etats-Unis d'Amérique.
- CHI, A. R. [1979b] Satellite Time Transfer via TDRSS and Applications. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 45-64.
- CROSS, A. F. [février 1976] Time-code receiver clock-1. *Wireless World*, Vol. 82, 1482, 30-35.
- GABRY [1980] Diffusion de l'heure par codage de la phase d'un émetteur de radiodiffusion à modulation d'amplitude. *Onde Electrique*, Vol. 60, 10, 51-54.
- HETZEL, P. et ROHBECK [avril 1974] Digitale Anzeige der vom Sender DCF77 verbreiteten amtlichen Zeit (Renseignements numériques sur l'heure officielle, diffusés par DCF77). *Funkschau*, Vol. 46.
- IRIG [1970 et 1980] Department of Defense Inter-Range Instrumentation Group (IRIG), Documents 104-70 et 128-77, Defense Documentation Center (DDC). Attention: DDC-IRA, Cameron Station, Alexandria, Va. 22314, Etats-Unis d'Amérique.
- NASA/GSFC [1970-81] Aerospace Data Systems Standards, Part 5: Clock and time code standards. Director, Goddard Space Flight Center. Attention: Aerospace Data Standards Office, Code 730.4, Greenbelt, Md. 20771, Etats-Unis d'Amérique.
- NBS [1979] National Bureau of Standards, Special Publication 432, National Bureau of Standards, Boulder, Co. 80302, Etats-Unis d'Amérique.

BIBLIOGRAPHIE

- CCSDS [1985] Consultative Committee for Space Data Systems. Recommendation for time code formats. Red Book INUC-3, Secretariat of the CCSDS.

RAPPORT 731-1

ENQUÊTE FAITE PARMI DES USAGERS DES ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1978-1982)

1. Introduction

De janvier à juillet 1975, le «National Bureau of Standards» des Etats-Unis a mené une enquête auprès des usagers des émissions de ses stations WWV et WWVH [NBS, 1975].

Les questionnaires utilisés pour cette enquête ont été diffusés selon plusieurs procédés: listes d'adresses, de la Division temps et fréquence du NBS (1500 adresses); listes d'adresses fournies au NBS par d'autres organisations, par exemple l'IEEE (9000), le service météorologique national des Etats-Unis (liste de 2600 navires) et par plusieurs organismes de navigation (11 000); reproduction directe dans 10 publications au moins (tirage total supérieur à 250 000); réponses à des demandes de questionnaires suscitées par des annonces parlées au cours des émissions WWV/WWVH elles-mêmes; réponses à des demandes suscitées par des communiqués ou des annonces parus dans 13 publications au moins (tirage total environ 380 000); autres moyens divers.

Au total, 9359 questionnaires remplis avaient été retournés au 1^{er} mai 1975, en provenance de tous les continents.

Il est bon d'indiquer que dans 23% des questionnaires retournés, les signataires indiquaient que les réponses représentaient «officiellement» plus que l'usage qu'ils faisaient personnellement des services en question. La plupart de ces signataires se bornaient à indiquer qu'ils représentaient les intérêts de la société ou de l'organisation pour laquelle ils travaillaient. Dans un petit nombre de cas, on a indiqué le nombre des personnes pour lesquelles les réponses étaient officiellement données. Si l'on *admet* que ces nombres sont représentatifs de toute la tranche de 23% de représentation «officielle», on obtient un nombre beaucoup plus grand que les 9359 questionnaires retournés. Néanmoins, dans l'analyse des réponses, chaque questionnaire a été compté comme une seule réponse.

En 1977, le Centre principal de métrologie du Service national des fréquences étalon et des signaux horaires de l'URSS a procédé à une enquête auprès des usagers de ce service afin de se renseigner sur l'utilisation des stations existantes à ondes kilométriques, hectométriques et décamétriques et sur les besoins des usagers pour ce qui est de la précision des mesures et des caractéristiques des émissions dans le domaine technique et dans celui de l'information.

En 1979-1980, lors d'une de ses études périodiques, le National Physical Laboratory (NPL) a procédé à une enquête auprès des usagers des services MSF, plus particulièrement en ce qui concerne les émissions à ondes décamétriques. Une enquête semblable a été faite en Italie pendant la même période, afin de se renseigner sur les besoins des usagers, au sujet de l'introduction d'un nouveau code transmis par les stations de radiodiffusion.

2. Résumé des résultats fournis par les questionnaires

2.1 Classification des usagers

Dans l'enquête faite aux Etats-Unis, chaque destinataire du questionnaire était invité à se classer lui-même dans une catégorie, prise sur un ensemble de 14 catégories. Il apparaît maintenant, rétrospectivement, que trois importantes catégories ont été oubliées:

- les particuliers,
- les horlogers/bijoutiers,
- les radioamateurs.

Malheureusement, la plupart de ces personnes ont été groupées dans la rubrique «divers».

La Fig. 1 montre comment les usagers se sont classés. A noter que plusieurs participants ont choisi plus d'une catégorie, ce qui fait que la somme des classifications est supérieure au nombre des réponses.

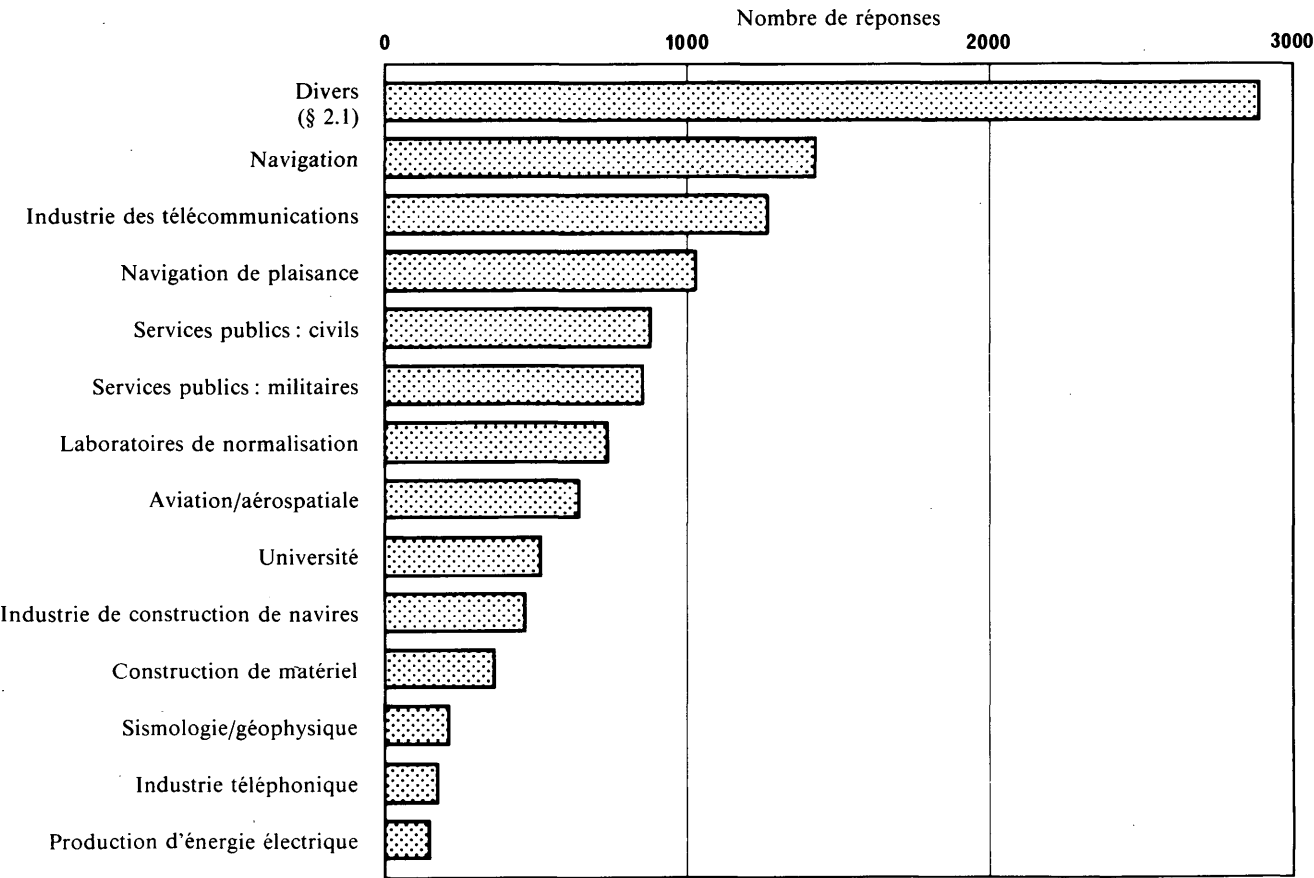


FIGURE 1 — Nombre de réponses par catégorie d'usagers d'après une enquête effectuée aux Etats-Unis

2.2 Utilisation des diverses fréquences diffusées

En ce qui concerne l'enquête faite aux Etats-Unis, la Fig. 2 indique que les émissions les plus utilisées sont celles qui sont faites sur 5, 10 et 15 MHz. Cela était prévisible, compte tenu des trois considérations suivantes:

- au cours de la phase actuelle de faible activité solaire, la propagation est plus fiable sur ces fréquences;
- c'est sur ces fréquences que les stations radioélectriques émettent le plus de puissance;
- beaucoup de récepteurs du commerce reçoivent uniquement ces fréquences.

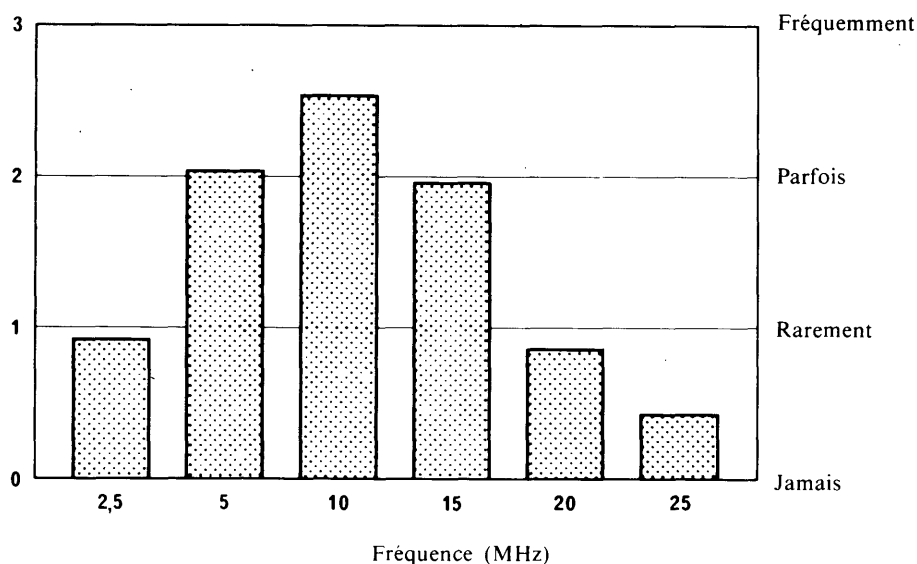


FIGURE 2 - Utilisation des fréquences d'après une enquête effectuée aux Etats-Unis

La Fig. 3 représente l'utilisation relative des fréquences porteuses des stations de fréquences étalon de l'URSS fonctionnant dans les bandes des 2,5, 5, 10 et 15 MHz. Plus de 70% des utilisateurs des émissions de fréquences étalon reçoivent des émissions dont la fréquence porteuse est décalée de ± 4 kHz par rapport à sa valeur normale.

Au Royaume-Uni, 21% seulement des réponses reçues mentionnaient une utilisation quelconque du service à ondes décimétriques. Les réponses indiquaient clairement que l'on dispose, au Royaume-Uni, de nombreuses autres sources de référence de temps et de fréquence, qu'il s'agisse d'autres stations à ondes décimétriques ou de diverses émissions d'ondes kilométriques, par exemple, celles de MSF elle-même sur 60 kHz, de DCF77 et de HBG.

Les résultats de cette enquête tout à fait récente confirment que le service assuré par MSF en ondes décimétriques n'a qu'un rôle secondaire à jouer dans la diffusion d'une référence de temps et de fréquence au Royaume-Uni et dans les zones maritimes adjacentes. C'est surtout l'émission de MSF sur 60 kHz qui est au premier plan, car elle est plus précise, plus fiable et plus à l'abri des effets de la propagation, tout en fournissant un code de temps prévu pour assurer une indication automatique de la date et de l'heure.

2.3 Brouillage

On avait demandé aux usagers des services du NBS d'indiquer à quel rythme ils constatent des «brouillages nuisibles entre les émissions du NBS et d'autres émissions de signaux horaires et de fréquences étalon». Sur la totalité des réponses fournies à cette question (de l'ordre de 8700), 3% environ indiquent «fréquemment» et 9% «parfois». Comme on le prévoyait, les difficultés sont bien moindres sur le territoire des Etats-Unis, bien que 14% des usagers exerçant dans le fuseau horaire oriental de ce pays indiquent des brouillages nuisibles «fréquemment» ou «parfois». On comparera ce chiffre avec les 19 à 25% correspondants pour les usagers qui indiquent comme emplacements géographiques le monde entier ou tous les océans. D'après les commentaires inscrits dans un grand nombre de questionnaires, il apparaît clairement que la situation est particulièrement critique dans la partie est de la région atlantique, en Méditerranée et dans le Pacifique ouest, ce qui était prévisible car WWV/WWVH ne sont pas les services prépondérants dans ces régions. D'autre part, il apparaît, d'après certains commentaires, que quelques usagers interprètent la notion de «brouillages nuisibles» plus largement que de simples brouillages causés par d'autres émissions de signaux horaires et de fréquences étalon. Il est impossible de savoir dans quelle mesure ces interprétations erronées ont pu altérer les résultats.

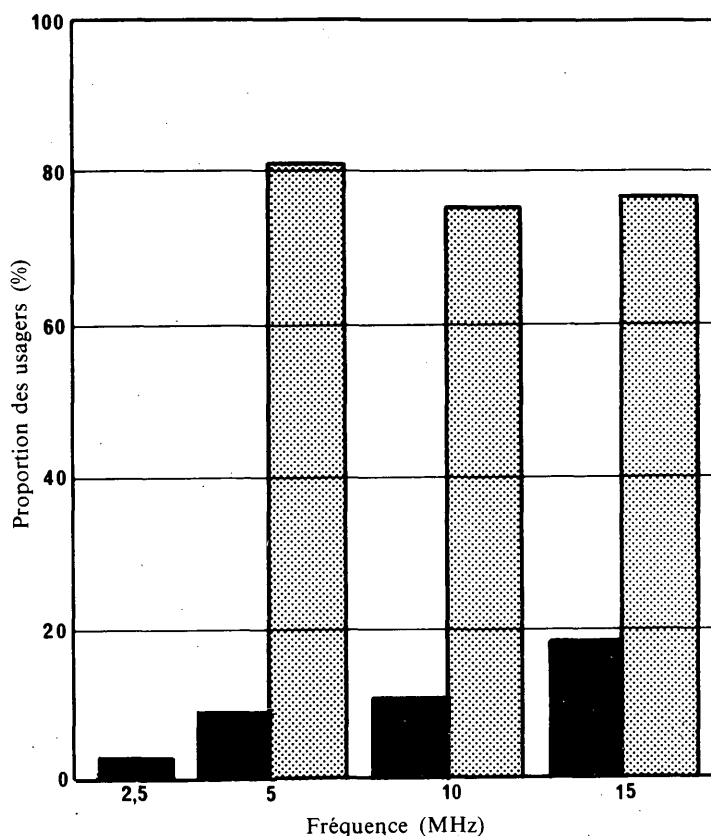


FIGURE 3 — Utilisation des fréquences d'après une enquête effectuée en URSS

(La liste des stations d'URSS est donnée dans le Tableau I du Rapport 267)

 ± 4 kHz

 ± 0 kHz

2.4 Utilisation des divers services par les catégories d'utilisateurs

S'agissant de l'enquête menée aux Etats-Unis, le Tableau I donne l'appréciation subjective (sur une échelle de notation de 0 à 3) faite par chacune des 14 catégories d'utilisateurs sur les 8 services assurés par WWV et WWVH. Ce Tableau indique également les appréciations globales ainsi que l'effectif de chaque catégorie. Les notations de 0 à 3 représentent le consensus de réponses pour une population donnée (à savoir un groupe d'utilisateurs donné) et pour un des 8 services. Le chiffre inscrit dans le Tableau I est une moyenne pondérée des diverses réponses à la question suivante: «Dans quelle mesure utilisez-vous les renseignements suivants? (venait ensuite la liste des 8 services)»; les réponses sont pondérées par 3 (fréquemment), 2 (parfois), 1 (rarement) ou 0 (jamais). Dans cette même échelle 0-3, les appréciations globales indiquées dans la colonne «Services» constituent une notation composite pour chaque service, sur la base des réponses de tous les utilisateurs, quelle que soit leur catégorie. Les enseignements qui se dégagent le plus clairement de ce Tableau sont les suivants: les annonces de l'horloge parlante sont surtout les plus utilisées et les valeurs DUT1 sont partout les moins utilisées. L'utilisation la plus intensive des valeurs de DUT1 est inférieure à l'utilisation la plus faible de tous les autres services, quelle que soit la catégorie d'utilisateurs.

TABLEAU I – *Notation des services par les diverses catégories d'utilisateurs*
(d'après une enquête effectuée aux Etats-Unis)

(Ces notes sont des moyennes pondérées sur une échelle de 0 à 3 allant de « jamais utilisé » (0) à « fréquemment utilisé » (3), (cf § 2.4.).)

Services (appréciation globale)	Catégorie d'utilisateurs (Nombre de réponses)	Divers (2870)	Navigation (1425)	Industrie des télécommunications (1274)	Navigation de plaisance (1020)	Services publics: civils (894)	Services publics: militaires (840)	Laboratoires de normalisation (732)	Aviation/aérospatiale (614)	Université (489)	Industrie de construction de navires (463)	Construction de matériel (353)	Sismologie/géophysique (195)	Industrie téléphonique (157)	Production d'énergie électrique (135)
Horloge parlante (2,80)		2,84	2,82	2,79	2,84	2,76	2,68	2,59	2,85	2,85	2,80	2,75	2,86	2,67	2,58
Repères de secondes (1,99)		1,96	2,11	2,12	1,97	2,14	2,00	2,27	2,22	2,32	2,31	2,25	2,49	1,90	2,06
Fréquences étalon (1,88)		1,88	1,30	2,52	1,36	1,95	1,51	2,34	1,69	1,94	1,52	2,34	1,68	2,45	2,12
Prévisions de la propagation (1,54)		1,61	1,19	1,93	1,21	1,39	1,28	1,47	1,47	1,53	1,29	1,59	1,55	1,68	1,32
Bulletins météorologiques (1,37)		1,27	1,86	1,41	2,00	1,13	1,07	1,16	1,52	1,30	1,92	1,27	1,48	1,18	1,14
Alertes géophysiques (1,01)		1,08	0,87	1,23	0,93	0,93	0,87	0,97	1,01	1,24	0,79	1,04	1,68	1,03	0,83
Code horaire BCD (0,66)		0,56	0,83	0,79	0,63	0,81	0,85	0,76	0,89	0,80	0,98	0,74	1,10	0,64	0,77
Valeurs de DUT1 (0,30)		0,26	0,27	0,41	0,25	0,36	0,38	0,48	0,41	0,47	0,25	0,40	0,46	0,31	0,40

3. Horloge parlante

Il est intéressant de noter que dans le cas des Etats-Unis, l'horloge parlante est considérée comme le service le plus utile par les catégories suivantes: sismologie, université, aviation et navigation de plaisance. En revanche, les laboratoires de normalisation et l'industrie de production d'énergie électrique utilisent assez peu ce service. La raison en est probablement que ces catégories considèrent les fréquences étalon comme plus importantes pour leur travail que les informations de temps; d'autre part, la plupart des usagers de ces services utilisent les émissions de WWVB (60 kHz) pour leur travail d'étalonnage plutôt que les émissions de WWV ou WWVH.

4. Valeurs de DUT1

A l'époque où le CCIR proposa que les valeurs de DUT1 soient incluses dans le système UTC de diffusion du temps, on a beaucoup insisté sur la nécessité de faire des corrections en temps réel pour obtenir l'échelle de temps UT1. Plus précisément, on a jugé qu'il serait indispensable, pour les besoins de la navigation, de diffuser, à chaque minute d'une émission, des corrections permettant de déterminer UT1 à 0,1 s près. Compte tenu de cet historique, on a accompli un effort exceptionnel pour déterminer les besoins des navigateurs, au moyen des diverses listes d'adresses, publications et annonces mentionnées précédemment.

Le Tableau I montre que les navigateurs et les industriels de la construction de navires utilisent très peu DUT1. De même, en réponse à une autre question relative à l'importance des huit services, il est apparu que le secteur de la navigation n'est pas plus intéressé par DUT1 que les autres catégories. En fait, il convient de souligner que la note zéro ne peut être obtenue que *si toutes les personnes* répondant au questionnaire indiquent «jamais»; il faut bien comprendre que des questions amènent toujours un peu de «bruit» ou des réponses parasites. Ainsi, on peut se demander si une note globale de 0,3 est la plus proche de zéro que l'on puisse obtenir avec le questionnaire.

Pour essayer de répondre à cette question, on pourrait observer que l'industrie téléphonique, la production d'énergie électrique et les laboratoires de normalisation ne sont pas intéressés par les valeurs de DUT1 probablement parce que leurs activités ne dépendent pas étroitement de la position de la Terre. Néanmoins, les réponses de ces catégories sont presque identiques à celles des catégories apparentées à la navigation (en fait, les notes qu'elles donnent sont un peu plus élevées).

Malheureusement, la taille des échantillons n'est pas grande et il reste quelque incertitude. On peut toutefois affirmer, sans risque de se tromper, que DUT1 est celui des services assurés par WWV et WWVH qui est le moins important et le moins utilisé.

Bien entendu, certains usagers ont indiqué une *utilisation* «fréquente» des valeurs de DUT1, ou ont jugé ce service «très important». Il est bon d'analyser cela en profondeur et de voir s'il y a une corrélation avec l'utilisation principale qui est faite des émissions (le questionnaire indiquait 13 possibilités de choix pour «utilisation principale»). Il n'est pas étonnant que la catégorie «astronomie» vienne au premier rang (6%) de ceux qui considèrent que les valeurs de DUT1 sont très importantes; venait ensuite la catégorie «poursuite des fusées et des satellites» avec 5%. Toutes les autres catégories se situaient à 4% ou en dessous; on avait 2% pour la catégorie «navigation/localisation». On en conclut que cette utilisation de DUT1, faible au demeurant, concerne principalement les activités spatiales et l'astronomie; en revanche, ce service n'est pas particulièrement utile ni nécessaire à la navigation terrestre.

En URSS, 60% de tous les usagers qui se servent des fréquences étalon pour synchroniser des échelles de temps ont besoin de l'échelle UT1 et emploient par conséquent les informations UT1 – UTC. De plus, 80% des usagers dont il est question utilisent en outre les informations DUT1. Pour recevoir les informations sur la différence entre les échelles UT1 et UTC, plus de 90% des usagers emploient un code de position et moins de 10% préfèrent le code Morse. Cela étant, l'URSS a renoncé, en 1978, à poursuivre les transmissions des renseignements UT1 – UTC en code Morse.

5. Fréquence étalon

Les résultats montrent que les fréquences étalon diffusées par WWV/WWVH viennent au troisième rang des services assurés par ces stations, pour l'intérêt qu'ils suscitent. Le Tableau I montre que l'utilisation des fréquences étalon est supérieure à la moyenne pour le secteur des télécommunications (y compris beaucoup de radioamateurs), les laboratoires de normalisation, les constructeurs d'équipements et l'industrie téléphonique. Comme il est naturel, l'utilisation de ce service est très faible dans les catégories apparentées à la navigation, où les garde-temps constituent l'élément le plus important. Comme les effets de la propagation limitent à 1×10^{-7} environ la précision de fréquence utile dans la plupart des liaisons en ondes décimétriques, fort peu de réponses proviennent d'utilisateurs intéressés par une plus grande précision.

En URSS, 75% des usagers utilisent les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires pour des mesures de fréquence. Les émissions en ondes kilométriques sont celles qui ont le plus de succès à cet égard. Pour ce qui est de la précision de mesure dont ont besoin les usagers, on peut distinguer trois catégories: faible précision (avec incertitude de mesure $\sigma > 10^{-7}$), précision moyenne (avec incertitude de mesure $10^{-7} \geq \sigma > 10^{-10}$), grande précision (avec incertitude de mesure $\sigma \leq 10^{-10}$). Plus de 90% des usagers se rangent dans les deux premières catégories ci-dessus.

6. Signaux horaires

Il apparaît que ce service de WWV/WWVH se classe au deuxième rang, dépassé seulement par l'horloge parlante. Son utilisation la plus intensive se situe dans les catégories suivantes: sismologie/géophysique, université, construction de navires (à l'exclusion de la navigation de plaisance), laboratoires de normalisation et aviation/aérospatiale.

En URSS, environ 50% des usagers des signaux horaires utilisent ceux-ci pour des mesures de temps. Pour ce qui est de la précision de mesure dont ont besoin les usagers, on peut distinguer trois catégories: faible précision ($\Delta t > 0,1$ s), précision moyenne ($0,1 \text{ s} \geq \Delta t > 0,01$ ms), grande précision ($\Delta t \leq 10 \mu\text{s}$). Une très forte majorité (plus de 90% des usagers) a besoin d'une précision comprise entre 1 s et 0,1 ms. Les signaux horaires les plus populaires sont ceux émis en ondes décamétriques par les stations RWM et RID.

7. Codes horaires BCD

C'est ici que la surprise a été la plus grande. On pourrait penser qu'il y a eu confusion avec les services fournis par WWVB sur 60 kHz; quoi qu'il en soit, un grand nombre des commentaires fournis semble indiquer que le code horaire diffusé par WWV/WWVH suscite un réel intérêt. Mais, ce qui a le plus surpris, c'est le très vif intérêt manifesté par les sismologues et les géophysiciens pour le code horaire BCD. On pensait jusque là que cette catégorie écoutait WWVB et non WWV/WWVH.

En Italie, l'enquête a fait apparaître un intérêt marqué pour la diffusion d'un code horaire complet, la majorité des usagers demandant notamment une information de date complète au sujet «du jour de la semaine».

8. Informations supplémentaires sur les émissions des stations WWV/WWVH

8.1 Bulletins météorologiques pour la navigation maritime

Régulièrement, au cours de chaque heure, les stations WWV et WWVH diffusent des renseignements météorologiques. Ces renseignements, fournis par le service météorologique national des Etats-Unis, sont valables pour des zones déterminées des océans Atlantique et Pacifique. On a considéré qu'ils intéresseraient principalement ceux qui naviguent sur ces océans et qui utilisent également les émissions de signaux horaires. Le Tableau I montre immédiatement que ces renseignements météorologiques sont appréciés par ceux auxquels ils sont destinés. L'analyse a montré que 34% des usagers «navigation» des émissions WWV/WWVH estiment que les renseignements météorologiques sont «très importants». Pour les navigateurs au moins, ces renseignements viennent au troisième rang d'importance parmi les services assurés par les émissions.

8.2 Prévisions de la propagation

Comme on pouvait le prévoir, la catégorie «industrie des télécommunications» utilise ces prévisions plus qu'aucune autre catégorie d'usagers. L'analyse a révélé que 35% des radioamateurs considèrent ces renseignements comme «très importants». En fait, les radioamateurs ont été de loin le groupe numérique le plus important à juger ces prévisions «importantes» ou «très importantes».

8.3 Alertes géophysiques

Le Tableau I montre immédiatement que ces alertes sont utiles principalement aux sismologues et aux géophysiciens.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

NBS [1975] US National Bureau of Standards, Technical Note 674.

BIBLIOGRAPHIE

TCHERENKOV, G. T. [1978] Utilisation dans l'économie nationale des signaux de fréquences étalon et de signaux horaires émis par les stations de fréquences étalon à ondes décamétriques de l'URSS (en russe). Vol. 37, 67, 15.

Documents du CCIR

[1978-82]: 7/111 (Royaume-Uni); 7/130 (Italie).

RECOMMANDATION 537

**RÉDUCTION DES BROUILLAGES MUTUELS ENTRE ÉMISSIONS DU SERVICE DE
FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES SUR LES FRÉQUENCES
QUI LEUR SONT ATTRIBUÉES DANS LES BANDES 6 ET 7**

(Programme d'études 1A/7)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) les dispositions de l'Article 33 du Règlement des radiocommunications;
- b) que les brouillages mutuels entre émissions du service de fréquences étalon et de signaux horaires font l'objet d'études permanentes;
- c) que l'on aura probablement besoin de nouvelles stations d'émission de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes 6 et 7, dans les régions du monde encore mal desservies;
- d) que les caractéristiques principale de l'ionosphère peuvent être simulées de manière satisfaisante,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

- 1. que l'on applique les dispositions de l'Article 33 du Règlement des radiocommunications pour améliorer la coordination et pour éliminer les cas de brouillage éventuels;
- 2. que, dans les cas où il existe actuellement des brouillages mutuels, l'IFRB, à la demande conjointe des administrations intéressées, entreprenne des études de simulation pour déterminer si l'on peut mettre en œuvre une solution compatible par partage des fréquences et du temps;
- 3. que, pour l'exécution de ces études, des renseignements complets sur toutes les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires: puissance fournie à l'antenne, configuration et orientation de l'antenne, hauteur de l'antenne au-dessus du sol, caractéristiques du sol, etc., soient communiqués à l'IFRB.

RAPPORT 732-2

**RÉDUCTION PROPOSÉE DES BROUILLAGES MUTUELS ENTRE ÉMISSIONS DE
FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES DANS LES BANDES 6 ET 7**

(Programme d'études 1A/7)

(1978-1982-1986)

1. Procédures d'exploitation

Le présent Rapport est fondé en partie sur les conclusions du Groupe de travail intérimaire 7/3 qui a été constitué pour examiner les moyens propres à réduire les brouillages mutuels dans les services de fréquences étalon et de signaux horaires. Il met en évidence les procédures suivantes, pour aider à alléger les problèmes de brouillages mutuels.

1.1 Partage dans le temps (multiplexage dans le temps)

Ce partage constitue un moyen pratique, même s'il n'est que partiel, de remédier aux brouillages mutuels. Il ne demande pas de modification des méthodes de réception: il suffit de connaître les horaires de fonctionnement des stations lorsqu'il faut procéder à une correction pour tenir compte du temps de propagation; dans une situation idéale, le partage dans le temps pourrait être appliqué à l'échelon mondial pour couvrir nombre d'émissions par multiplexage, exploitées de façon compatible. Un tel système a été conçu il y a une vingtaine d'années par le Rapporteur principal qui dirigeait alors les travaux de la Commission d'études 7; ce système visait à remédier aux problèmes du brouillage mutuel entre WWV, qui émettait alors de Beltsville (Maryland), et plusieurs émetteurs européens de fréquences étalon et de signaux horaires.

Le partage dans le temps continue d'être appliqué dans une petite zone géographique de l'Europe occidentale, à la fois pour les émissions des stations IAM, IBF et MSF sur 5 MHz et des stations MSF et OMA (modulation seulement) sur 2,5 MHz. Bien que l'utilité d'un tel arrangement local soit reconnue, cette méthode n'est pas considérée comme le remède majeur aux difficultés présentes. En raison des variations journalières et saisonnières de la propagation, il n'est pas possible de garantir la continuité de la réception sur une fréquence quelconque, ce qui constitue pour certains utilisateurs un grave inconvénient du système. Il y a aussi la difficulté due à la mesure du temps d'accès pour la transmission désirée et les problèmes qui peuvent se poser pour l'identification des signaux de différentes stations.

On peut envisager une autre méthode de multiplexage dans le temps utilisant un cycle d'alternance plus court où, par exemple, on attribue à chacune des six stations susceptibles de donner lieu à des brouillages 10 fractions de seconde successives et uniques dans chaque minute pour un fonctionnement isolé sans brouillage par les cinq autres. Un tel système nécessiterait, naturellement, une coordination entre les stations participantes, mais cette coordination ne devrait pas être difficile à établir puisque toutes les stations auront adhéré à l'UTC dans un intervalle de précision de 1 ms.

On a envisagé une extension du principe du partage dans le temps: deux stations susceptibles de donner lieu à des brouillages émettraient sans interruption des porteuses, mais en supprimant respectivement les impulsions impaires et paires, ce qui leur permettrait d'intercaler leurs signaux horaires. Pour que la méthode soit efficace, il semble cependant qu'elle demande des conditions quelque peu exceptionnelles de continuité et de stabilité de la propagation.

Une autre forme de partage dans le temps consiste à décaler d'une valeur appropriée l'émission de la deuxième impulsion; c'est la procédure suivie par la station BPM en République populaire de Chine pour les impulsions UTC.

1.2 *Modulation en audiofréquence*

Cette forme de modulation, sauf dans la mesure limitée nécessaire à l'identification de la station gaspille une précieuse portion du spectre et les efforts devraient tendre à l'élimination de cette modulation dans les services de fréquences étalon et de signaux horaires.

1.3 *Discrimination de fréquence*

1.3.1 *Sous-porteuse d'impulsions*

La plupart des stations dans les bandes 6 et 7 utilisent actuellement les émissions de la classe A2X pour transmettre les signaux horaires. Des stations telles que WWV, WWVH, JJY et autres transmettent des repères de secondes sur des fréquences sous-porteuses séparées choisies conformément à la formule suivante:

$$f_{sc}(n) = 0,2n \quad \text{kHz} \quad (1)$$

où n est un nombre entier choisi en sorte que $n = 5$ pour WWV, $n = 6$ pour WWVH et $n = 8$ pour JJY.

L'utilisation d'émissions de la classe A2X pour les signaux horaires permet de séparer assez simplement les signaux susceptibles de causer des brouillages sur la même fréquence porteuse à l'aide de filtres basse fréquence appropriés, bien que cela augmente le temps de transmission dans le récepteur.

1.3.2 *Emissions à bande latérale unique (BLU) avec porteuse complète*

Les avantages de l'exploitation BLU sont évidents; celle-ci réduit les effets du brouillage tout en permettant une certaine économie du spectre et assure une certaine protection contre les évanouissements; il est entendu en même temps que des administrations ne souhaitent peut-être pas investir les capitaux nécessaires pour convertir les stations d'émission existantes à la technique BLU alors que l'on peut encore envisager une période de 15 à 20 ans pour les services de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes 6 et 7.

Les mêmes considérations s'appliquent à l'introduction d'un système moins traditionnel de modulation de phase ou de fréquence, qui permettrait peut-être à plusieurs stations de coexister avec des brouillages mutuels réduits, mais au prix d'une complexité accrue des émetteurs et des récepteurs. Pour être acceptable, toute modification du réseau existant des stations de fréquences étalon et de signaux horaires doit être d'une application simple et ne demander que peu ou pas de changement des équipements actuellement utilisés pour l'émission et la réception.

1.3.3 *BLU à porteuse complète ou supprimée et fonctionnement avec décalage de fréquence*

Avec cette méthode, on peut espérer établir une coexistence harmonieuse des émissions actuelles et des émissions futures dans les bandes des ondes hectométriques et décamétriques. Elle présuppose que les fréquences porteuses ne se confinent plus aux valeurs de 2,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 et 25 MHz, mais que l'on peut en outre utiliser les fréquences obtenues à l'aide de la formule suivante:

$$f(N) = (X + 4N) \quad \text{kHz} \quad (2)$$

où $X = 2500, 5000, 10\,000, 15\,000$ et $20\,000$, N pouvant prendre les valeurs de 0 ou ± 1 pour $2500 \leq X \leq 20\,000$.

Cette technique des fréquences décalées est déjà utilisée avec succès en URSS pour les fréquences allant jusqu'à 15 MHz, pour une valeur de N égale à 0 ou à ± 1 . La disposition des stations de signaux horaires et de fréquences étalon de l'URSS est représentée à la Fig. 1, avec les fréquences d'exploitation appropriées (fondées sur le Rapport 267). La figure indique également les emplacements de stations situées dans d'autres pays et qui fonctionnent simultanément sur au moins trois fréquences (ATA, BPM, LOL, MSF, WWV et WWVH) dans la gamme de fréquences 2,5 à 15 MHz. Les stations soviétiques RWM et RID, avec décalage de fréquence de plus et moins 4 kHz respectivement, sont très largement utilisées [Tcherenkov, 1978], comme le montre le Rapport 731 en raison du degré de protection élevé qu'elles assurent contre les perturbations causées par d'autres stations de fréquences étalon et de signaux horaires fonctionnant au centre des bandes allouées. Ces signaux peuvent être reçus de deux façons: soit comme signaux J2X par mélange avec une porteuse locale de 5, 10 ou 15 MHz suivi d'une détection et d'un filtrage linéaires ou non linéaires, soit de la manière habituelle comme des signaux A1X sur des fréquences porteuses éloignées des valeurs normales.

Compte tenu des avantages considérables que présente le fonctionnement à bande unique latérale pour la solution des problèmes de brouillage régional, il y a lieu de recommander d'envisager l'utilisation d'émissions de classe H2X (BLU, porteuse complète) et J2X (BLU, porteuse supprimée) uniquement avec les fréquences porteuses normales dans les bandes assignées. Pour simplifier le récepteur et améliorer sa protection contre le bruit, les valeurs supérieures ($f_{sc} +$) et inférieures ($f_{sc} -$) des fréquences sous-porteuses pourraient être choisies d'après les relations suivantes:

$$\left. \begin{aligned} f_{sc} + &= 0,4 (n + \frac{1}{2}) && \text{kHz} \\ f_{sc} - &= 0,4 (n + 1) && \text{kHz} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Pour des émissions de la classe H2X, les valeurs proposées de n sont: $n = 1, 2, \dots, 5$, et pour les émissions de la classe J2X, $n = 6, 7, \dots, 11$, par exemple, $n = 9$ correspond à une fréquence supérieure décalée de + 3,8 kHz et à une fréquence inférieure décalée de - 4 kHz (voir la formule (3)).

1.3.4 Largeur de bande totale nécessaire aux services de fréquences étalon et de signaux horaires

Afin que le nouveau système d'attribution des fréquences porteuses puisse englober les bandes latérales, il convient de prévoir une certaine extension de la largeur de bande totale dont disposent les services de fréquences étalon et de signaux horaires.

A 2,5 MHz, 5 MHz, et 10 MHz, la largeur de bande disponible doit être au total de ± 8 kHz pour couvrir les émissions éventuelles qui correspondraient à une valeur de N égale à -1, 0 et +1. A l'heure actuelle, les parties du spectre appelées «bandes de garde» sont larges de ± 5 kHz, excepté à 2,5 MHz et dans la Région 1 où ces bandes ne sont que de ± 2 kHz.

A 15 MHz et 20 MHz, la largeur de bande disponible doit être au total de ± 12 kHz pour une valeur de N égale à -2, -1, 0, +1 et +2. Compte tenu de la faible possibilité de remettre en œuvre la fréquence de 25 MHz dans les services de fréquences étalon et de signaux horaires, il est proposé de renoncer à cette fréquence pour les futures opérations des services de fréquences étalon et de signaux horaires.

1.3.5 Utilisation des fréquences nouvellement attribuées

Par décision de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (Genève, 1979), les fréquences étalon et signaux horaires peuvent être émis dans 3 bandes de fréquences à 4,8 et 16 MHz dans la Région 3. Cela atténue les problèmes de brouillage mutuel observés sur les autres fréquences en Région. Au Japon, la station JJY a commencé de fonctionner sur 8 MHz.

1.4 Principe du voisin le plus proche

Le plan de fréquences exposé dans les paragraphes précédents permettrait à un certain nombre d'émissions des stations des services de fréquences étalon et de signaux horaires (FESH) de coexister avec un brouillage mutuel minimal. La manière dont le plan doit être mis en œuvre et les diverses fréquences à utiliser au mieux dépendront de la disposition géographique relative des stations éventuellement brouilleuses. On préconise que lorsque deux stations sont très voisines et qu'elles sont séparées par moins de 3000 km, il soit obligatoire de prévoir une différence de fréquence d'au moins ± 4 kHz entre leurs fréquences porteuses respectives: la disposition exacte de la fréquence dépendra aussi de la situation de la station non pas la plus proche mais de celle qui vient immédiatement après; il s'agit essentiellement d'un problème bilatéral qui doit être résolu entre paires de stations voisines.

Pour illustrer une application possible du plan de fréquences proposé, on peut se référer à la Fig. 1. Les décalages relatifs des stations situées sur le territoire de l'URSS et acceptés comme base du plan ainsi que les valeurs appropriées de N sont indiqués sur la figure. Des valeurs correspondantes de N pour ATA, BPM, LOL, MSF, WWV et WWVH peuvent être choisies conformément aux dispositions du plan de fréquences pour réduire au minimum les brouillages mutuels, mais il faut souligner que les exemples ci-après ne visent nullement à empiéter sur le droit des administrations à choisir des valeurs appropriées de N par accord bipartite ou tripartite.

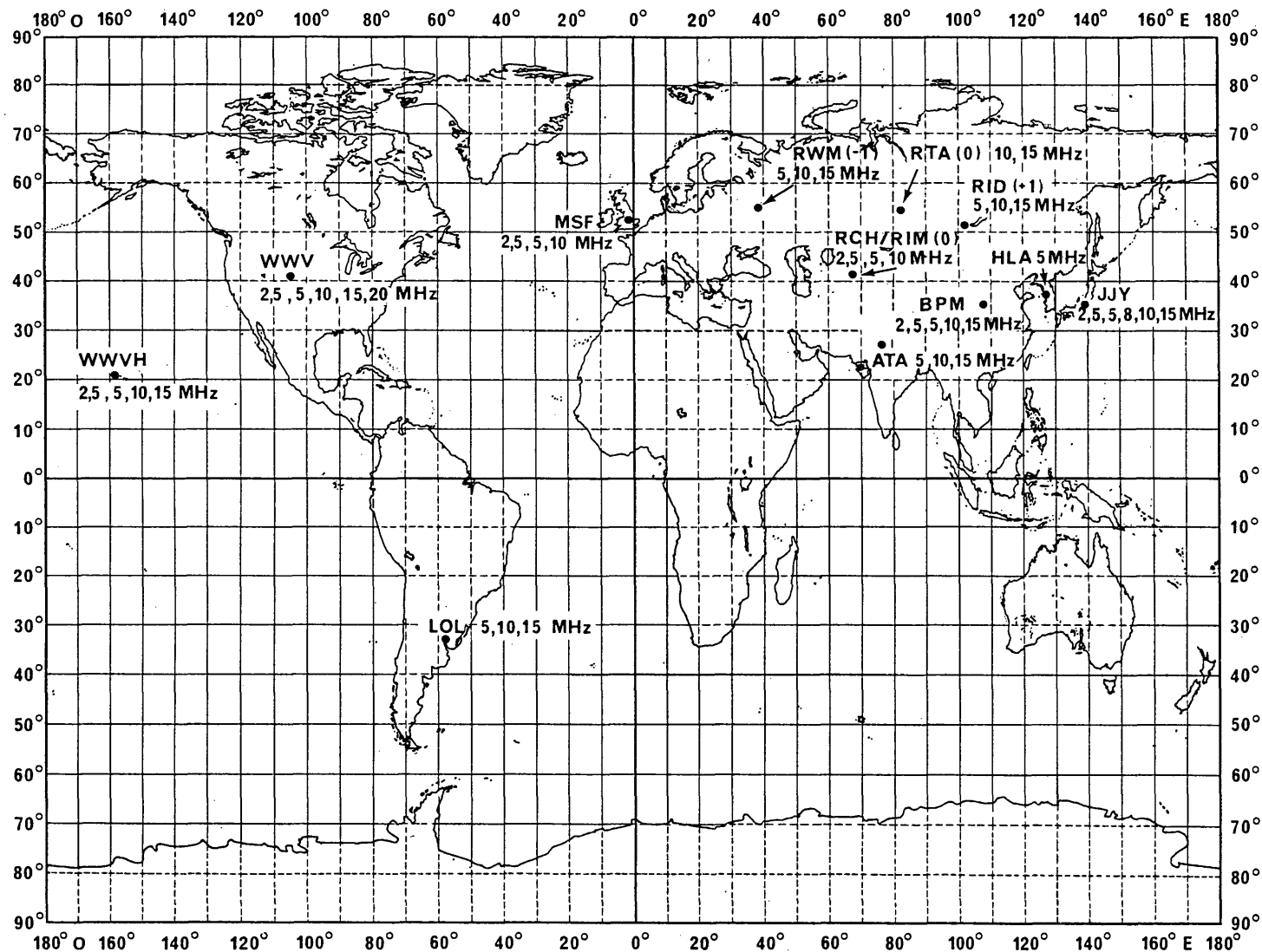


FIGURE 1 – Décalages des fréquences porteuses des stations de signaux horaires et de fréquences étalon

En Europe, MSF, Rugby ($N = 0$) est actuellement décalé par rapport à RWM, Moscou ($N = -1$) son voisin immédiat, les prochaines sources les plus voisines de brouillage sont RCH/RIM, Tachkent situé à quelque 5000 kilomètres ou RTA, Novossibirsk (sur 10 MHz) qui est encore plus éloigné. Au besoin, MSF peut fonctionner avec $N = +1$ de manière à éliminer tout risque résiduel de brouillage provenant des stations soviétiques à l'exception de RID, Irkoutsk situé dans la zone la plus orientale de l'URSS. En regardant la Fig. 1, il est évident qu'il serait souhaitable, d'après ces propositions, que ATA fonctionne avec $N = +1$ ou -1 pour éliminer les brouillages mutuels avec RCH/RIN, Tachkent.

Lorsque l'on examine la partie occidentale du Pacifique, il est évident qu'il y a un grave conflit entre les émissions de BPM, JJY et WWVH sur 2,5, 5, 10 et 15 MHz. Le problème pourrait être très atténué si JJY fonctionnait avec $N = -1$, compte tenu du fait que RID, Irkoutsk a $N = +1$. Une autre solution serait que WWVH accepte $N = +1$, JJY, $N = 0$ et BPM, $N = -1$. Moyennant une nouvelle attribution des valeurs N en URSS, il serait possible d'exploiter ces stations de base d'une manière plus judicieuse, sur au moins deux fréquences. La Fig. 1 montre qu'une permutation des valeurs N entre RTA et RID représenterait une solution avantageuse, conforme au principe du voisin le plus proche, qui est la station RCH/RIM, Tachkent. Une telle modification permettrait également d'adopter un écart de fréquence supérieur entre BPM et JJY lesquelles sont relativement voisines, avec $N = -1$ pour BPM et $N = +1$ pour JJY. En Amérique, la station LOL est suffisamment éloignée de WWV et d'autres émetteurs pour permettre que l'on poursuive son exploitation avec $N = 0$, bien que le système proposé puisse également être exploité ici avec $N = \pm 1$ pour LOL.

On constatera que la mise en application du plan de fréquences proposé est dans une grande mesure automatique et qu'une fois qu'une valeur de N est choisie pour une station donnée, il n'est guère possible de la modifier sans affecter d'autres parties du réseau FESH. Néanmoins, si l'on prend comme point de départ les valeurs de fréquence adoptées en URSS, il est possible d'établir un réseau cohérent et compatible de stations FESH, dans lequel se produirait un minimum de brouillage et qui s'écarterait le moins possible de l'utilisation normale de ces stations.

1.5 *Contrôle des diagrammes de rayonnement verticaux et horizontaux*

Il a été suggéré que, pour l'essentiel, l'élimination des brouillages mutuels soit obtenue par un choix opportun du décalage relatif de fréquence, mais il n'en faut pas moins étudier l'étalement des rayonnements dans le plan horizontal et dans le plan vertical à partir de l'émetteur. En particulier, dans les zones géographiques peu étendues, il peut être nécessaire de limiter le diagramme polaire vertical aux angles de site supérieurs à 30° avec une prépondérance du rayonnement pour les grands angles de site. On atteint facilement cet objectif en utilisant des doublets horizontaux; le Rapport 301 de la Commission d'études 10 donne les caractéristiques de ces systèmes conçus pour la radiodiffusion dans les régions tropicales. D'autres renseignements figurent aussi dans le Manuel du CCIR sur les antennes à effet directif [UIT, 1966].

2. Mesures administratives

2.1 On propose également que ce Rapport soit communiqué au Rapporteur principal de la Commission d'études 2, étant donné que les fréquences étalon actuellement attribuées sont partagées en partie avec les services de la recherche spatiale et de la radioastronomie.

2.2 Bien que le Rapport 731 fasse état de la vive nécessité d'émettre dans les bandes 6 et 7, il est suggéré que les administrations examinent périodiquement la demande de tels services, compte tenu des économies souhaitables en matière de puissance et de fréquences qui résulteraient de leur suppression.

Une enquête faite auprès des utilisateurs du service MSF à ondes décimétriques en 1979-1980 ayant clairement montré que ce service ne joue qu'un faible rôle dans la diffusion de références de temps et de fréquence tant au Royaume-Uni que dans les régions voisines de l'Europe occidentale, l'Administration du Royaume-Uni a l'intention d'interrompre ses émissions du service MSF sur les trois fréquences utilisées dans les ondes décimétriques et ce avant la fin de la présente décennie, probablement au cours du premier semestre de 1988.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- TCHERENKOV, G. T. [1978] The use in the national economy of standard frequency and time signals transmitted by USSR HF signal generator stations. Studies by the All-Union Scientific Research Institute of Physical and Radio Measurements. Studies on time and frequency measurement (en russe), Vol. 37, 67, 15.
- UIT [1966] Manuel sur les antennes pour ondes décimétriques à effet directif, UIT, Genève.

RAPPORT 735-1

**IMPORTANCE DES ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON
ET DE SIGNAUX HORAIRES FAITES DANS LA BANDE 5**

(Programme d'études 2B/7)

(1978-1982)

1. Des stations émettent des fréquences étalon et des signaux horaires de façon continue dans la bande 5; certaines diffusent un code de temps contenant une information de date complète, telle que minute, heure, quantième, jour de la semaine, mois et année.

Ce genre de service est particulièrement développé en Europe; les émissions faites dans la bande 5 y sont généralement plus utilisées que les services assurés dans les bandes attribuées pour les émissions existantes de fréquences étalon et de signaux horaires.

2. Pour les raisons suivantes, la bande 5 convient particulièrement à la diffusion de l'heure et des fréquences:

- l'onde de sol couvre une vaste superficie et son champ est plus intense que celui de l'onde ionosphérique jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de distance;
- l'onde ionosphérique se propage par l'intermédiaire de la couche D, et sa propagation est stable, surtout pendant le jour;
- les antennes ont un bien meilleur rendement aux fréquences de la bande 5 qu'à celles de la bande 4, et l'on peut obtenir de relativement grandes largeurs de bande.

De ces conditions de propagation et de ces facteurs techniques résultent diverses particularités que l'on peut résumer comme suit:

- pour les comparaisons de fréquence, l'angle de phase de l'onde porteuse est reproduit à la station réceptrice avec une bonne précision, par exemple, avec un écart type inférieur à $1 \mu\text{s}$ à une distance de 700 km pendant le jour. A 300 km de la station émettrice, l'écart type de l'angle de phase de l'onde porteuse, pour la moyenne à long terme, est inférieur à $0,2 \mu\text{s}$ pendant le jour. On parvient ainsi à desservir une vaste zone géographique en fréquences étalon avec une incertitude relative inférieure à 1×10^{-12} , à condition d'utiliser des méthodes appropriées pour prendre la moyenne. On peut de la sorte, moyennant des techniques convenables, asservir à ces émissions des étalons de fréquence secondaires (par exemple, à vapeur de rubidium) et améliorer de ce fait la stabilité de leur fréquence à long terme;
- pour les comparaisons de temps, on peut, avec un matériel simple et bon marché, parvenir, de jour et à des distances de plusieurs centaines de kilomètres, à une incertitude inférieure à 0,1 ms; au prix d'une certaine dégradation de la précision, on peut utiliser des horloges asservies jusqu'à des distances de quelque 2000 km.

3. Les services ainsi assurés dans la bande 5 se prêtent aux applications suivantes et sont à la disposition des catégories d'usagers ci-après:

3.1 *Fréquences étalon*

Laboratoires industriels; centres de recherche scientifique; comparaisons de temps entre services de l'heure de pays voisins; assistance aux services de l'heure de pays ne disposant pas d'installations techniques perfectionnées; commande de la fréquence porteuse d'émetteurs de divers services radioélectriques; réseaux de télécommunication (par exemple, réseaux numériques synchrones et semi-synchrones); étalonnage de garde-temps et de chronomètres.

3.2 *Signaux horaires*

Horloges publiques; horloges parlantes; services publics tels que télévision et radiodiffusion; services postaux; chemins de fer et autres moyens de transport, y compris le contrôle de la navigation aérienne; horloges de référence dans des sociétés industrielles et des institutions publiques.

Datation d'événements: trafic; géophysique (par exemple, mesures sismiques et recherches géosismiques); médecine (chronologie des examens médicaux).

Référence de temps commune pour les systèmes de traitement électronique de données (processeurs, par exemple) et pour la régulation d'installations de production.

Référence de temps pour répartir la puissance dans un réseau de distribution d'énergie électrique (par exemple, s'il s'agit d'un tarif à tranches horaires) et pour étudier le comportement dynamique d'un tel réseau.

RAPPORT 736-1

**PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE LE SERVICE DES SIGNAUX HORAIRE ET LE SERVICE
DE RADIOLOCALISATION, LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET LES SERVICES FIXE
ET MOBILE AU VOISINAGE DE 14, 21, 26 ET 31 GHz**

(Programme d'études 2A/7)

(1978-1982)

1. Introduction

Le présent Rapport a pour objet d'étudier les problèmes que pose le partage des fréquences entre, d'une part, un système projeté de diffusion du temps par satellite et d'autre part le service de radiolocalisation, le service fixe par satellite et les services fixe et mobile au voisinage de 14, 21, 26 et 31 GHz (voir le Tableau I). On évalue le fonctionnement dans une même voie d'un système de diffusion du temps par satellite, d'un système de radiolocalisation, d'un équipement pour communications du service fixe par satellite et d'un équipement de faisceaux hertziens de Terre des services fixe et mobile. Pour pouvoir faire une analyse complète, on a admis des caractéristiques représentatives des classes générales d'équipement.

2. Le système de diffusion du temps par satellite

La Fig. 1 représente schématiquement un système projeté de diffusion du temps par satellite qui doit permettre des comparaisons très précises du temps et de la fréquence entre des points de la Terre extrêmement distants les uns des autres. Un émetteur au sol transmet un signal codé en bruit pseudo-aléatoire (PRN) à un récepteur de station spatiale. Celui-ci décode le signal et procède à une comparaison avec une horloge de précision installée dans le satellite de manière à déterminer l'heure d'arrivée par rapport à l'étalon horaire de l'engin spatial. Un émetteur d'engin spatial utilise ensuite un signal à modulation PRN pour relayer à la station terrienne des données sur l'éphéméride et l'époque de la réception des signaux transmis par la station au sol. Le récepteur de la station terrienne décode ce signal, ce qui permet de comparer l'étalon du temps de l'engin spatial avec l'horloge au sol. On peut utiliser deux stations terriennes avec l'engin spatial de manière que des stations 1 et 2 puissent comparer leurs horloges. On peut aussi comparer l'horloge de l'engin spatial avec la norme d'étalonnage du temps d'une station terrienne donnée, afin d'évaluer la précision de ladite horloge. Les bandes des fréquences d'exploitation envisagées pour le système de diffusion du temps par satellite sont énumérées au Tableau I. Les caractéristiques de fonctionnement du système sont récapitulées dans le Tableau II. L'on recourt au codage PRN pour obtenir des rapports signal/bruit satisfaisants et une puissance de brouillage minimale à la réception par les autres stations qui partagent les bandes.

3. Partage avec le service de radiolocalisation

La bande de fréquences envisagée au voisinage de 14 GHz pour les transmissions de temps sur le trajet montant doit être partagée avec le service de radiolocalisation. On trouvera au Tableau III les caractéristiques courantes de fonctionnement d'un système de radiolocalisation exploitable dans cette partie du spectre. On peut éviter les brouillages entre une station terrienne du système de diffusion du temps et un système de radiolocalisation en coordonnant les emplacements des stations, les orientations et les hauteurs des antennes, etc., des deux installations. Par exemple, si les deux stations sont espacées d'une distance (en km):

$$d \leq \sqrt{17 h_1} + \sqrt{17 h_2}$$

où

h_1 : hauteur de l'antenne 1 (en mètres),

h_2 : hauteur de l'antenne 2 (en mètres),

l'horizon radioélectrique d'une station se trouvera au-dessous de l'horizon radioélectrique de l'autre et aucun couplage des faisceaux principaux ne se produira, quelle que soit l'orientation. A titre d'exemple, si les deux antennes ont 15 m de hauteur, il suffit que les deux stations soient espacées d'environ 32 km pour que leurs horizons radioélectriques ne coïncident pas. En outre, on peut aussi tirer parti de la directivité de l'antenne d'émission du système de diffusion du temps pour réduire encore le flux de brouillage à l'emplacement de l'antenne du système de radiolocalisation.

Aux termes des numéros 2540 à 2548 du Règlement des radiocommunications, le niveau de la puissance isotrope rayonnée équivalente émise dans une direction quelconque vers l'horizon par une station terrienne fonctionnant dans les bandes de fréquences comprises entre 1 et 15 GHz ne doit pas dépasser:

+40 dBW dans une bande quelconque large de 4 kHz, pour $\theta \leq 0^\circ$

+40 + 3 θ dBW dans une bande quelconque large de 4 kHz, pour $0^\circ < \theta \leq 5^\circ$

θ étant, en degrés, l'angle de site de l'horizon vu du centre de rayonnement de l'antenne de la station terrienne. Cet angle est exprimé par une valeur positive au-dessus du plan horizontal et par une valeur négative au-dessous de ce plan. Dans le cas étudié:

$$\begin{aligned} \text{p.i.r.e.} &= P_t + G_t + B \\ &= 20 + 53 - 48 = 25 \text{ dB(W/4 kHz) maximum} \end{aligned}$$

où

P_t : puissance de l'émetteur, dBW

G_t : gain de l'antenne d'émission, dB

B : facteur de correction de la largeur de bande

$$10 \log \left(\frac{4 \times 10^3}{250 \times 10^6} \right)$$

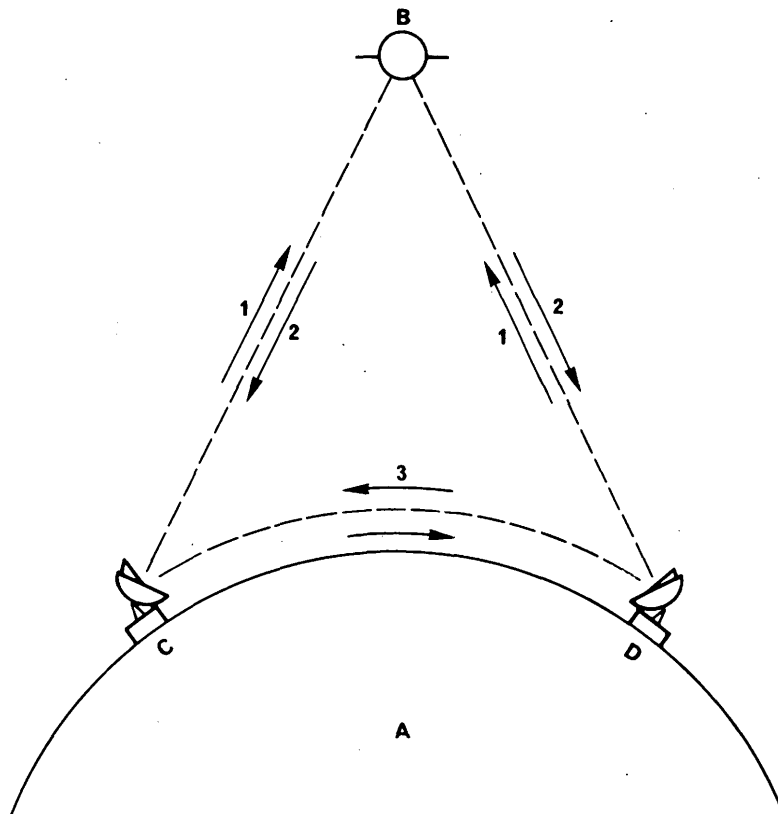


FIGURE 1 — Système de diffusion du temps par satellite

- | | |
|---|---------------------------------|
| A | Terre |
| B | Satellite de diffusion du temps |
| C | Station terrienne N° 1 |
| D | Station terrienne N° 2 |
| 1 | Liaison Terre-vers-espace |
| 2 | Liaison espace-vers-Terre |
| 3 | Trajet de Terre |

TABLEAU I – Fréquences envisagées – système de diffusion du temps par satellite

Bande proposée pour la fréquence centrale d'exploitation (GHz)	Largeur de bande radiofréquence proposée (GHz)	Autres attributions (existantes ou possibles)	Limites d'exploitation (Règlement des radiocommunications de l'UIT)
13,4-14,0 (trajet montant)	$\pm 0,125$ (0,25)	Radiolocalisation Exploration de la Terre par satellite (détecteur actif) Recherche spatiale (Terre-vers-espace)	p.i.r.e. + 40 dB(W/4 kHz) $\theta \leq 0^\circ$ p.i.r.e. (+ 40 + 3 θ) dB(W/4 kHz) $0^\circ < \theta \leq 5^\circ$ Aucune restriction à la radiolocalisation
20,2-21,2 (trajet descendant)	$\pm 0,125$ (0,25)	Fixe par satellite (Espace-vers-Terre) Mobile par satellite (Espace-vers-Terre)	Pas de limite spécifiée
25,27-27,5 (trajet montant)	$\pm 0,6$ (1,2)	Fixe Mobile Exploration de la Terre par satellite (Espace-vers-Terre)	p.i.r.e. $\leq +64$ dB(W/MHz) $\theta \leq 0^\circ$ p.i.r.e. $\leq (+64 + 3\theta)$ dB(W/MHz) $0^\circ < \theta \leq 5^\circ$
30,0-31,3 (trajet descendant)	$\pm 0,6$ (1,2)	Fixe par satellite (Terre-vers-espace) Fixe Mobile Recherche spatiale Mobile par satellite (Terre-vers-espace)	pas encore spécifiées

TABLEAU II – *Système de diffusion du temps par satellite – récapitulation des caractéristiques*

<i>Station terrienne</i>	
Puissance de l'émetteur	100W
Gain d'antenne (supposé)	53 dB
Type de modulation	Code PRN
Température de bruit du récepteur	1000 K (FB~6 dB)
Largeur de bande avant détection	250 MHz, 1,2 GHz
Largeur de bande après détection	1 MHz
Gain de traitement	24 dB, 30,8 dB
Rapport signal/bruit après détection	18 dB
<i>Satellite</i>	
Puissance de l'émetteur	50W
Gain d'antenne	4 dB (couverture mondiale)
Type de modulation	Code PRN
Température du bruit du récepteur	1000 K
Largeur de bande avant détection	250 MHz, 1,2 GHz
Largeur de bande après détection	1 MHz
Gain de traitement	24 dB, 30,8 dB
Rapport signal/bruit après détection	18 dB

TABLEAU III – *Caractéristiques courantes de fonctionnement du système de radiolocalisation*

Puissance de crête des impulsions	25 kW
Largeur des impulsions	32 ns
Temps de montée des impulsions	12 ns
Fréquence de répétition des impulsions	15 kHz
Puissance moyenne	12 W
Fréquence (porteuse)	~14 GHz
Sensibilité du récepteur	-85 dB(m)
Facteur de bruit du récepteur	11 dB ($T_s \sim 3400$ K)
Rapport signal/bruit (nécessaire pour l'exploitation)	12 dB
Largeur de bande FI du récepteur	40 MHz
Gain d'antennes (par rapport au gain d'une antenne isotrope)	35 dB
Lobes latéraux	25 dB au-dessous du lobe principal
Inclinaison d'antenne	0 degré
Cadence de balayage d'antenne	135 balayages par minute
Diagramme d'antenne	10 degrés, largeur de bande verticale 0,34 degré, largeur de bande horizontale

Les émissions provenant du faisceau principal de l'émetteur du système de radiolocalisation peuvent occasionnellement être directement couplées dans l'antenne du récepteur du satellite lorsque le satellite de diffusion du temps est visible et se trouve à moins de 10° au-dessus de l'horizon du système de radiolocalisation (une largeur de bande verticale de 10° ayant au départ été admise). Dans ce cas, la densité de puissance du brouillage au récepteur du satellite est:

$$D_r = P_t + G_t - B_t - 10 \log (4\pi R^2) + 10 \log \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right)$$

$$D_r: -179 \text{ dB(W/Hz)}$$

où

D_r : densité de puissance du brouillage, dB(W/Hz)

P_t : puissance moyenne de l'émetteur, dBW

G_t : gain de l'antenne d'émission, dB

B_t : largeur de bande de l'émetteur, dB(1 Hz)

R : distance entre les antennes d'émission et de réception, en mètres (3709×10^3 m pour un satellite à 1000 km)

G_r : gain de l'antenne de réception, dB

λ : longueur d'onde opérationnelle, en mètres.

La densité évaluée de puissance des signaux (donnée par la même égalité à laquelle on ajoute le gain de traitement, 24 dB), est de -169 dB(W/Hz), ce qui donne un rapport porteuse/brouillage (C/I) de 10 dB dans le cas le plus défavorable. Ce rapport C/I suffit à protéger le système de diffusion du temps pendant toute la durée des opérations.

4. Partage avec le service fixe par satellite (espace vers Terre)

Le trajet descendant envisagé au voisinage de 21 GHz, pour le service de diffusion du temps par satellite doit partager une bande avec les trajets descendants du service fixe par satellite et du service mobile par satellite (espace vers Terre). Pour que le partage soit admissible dans cette bande, la puissance surfacique produite à la surface de la Terre doit être inférieure aux limites spécifiées aux numéros 2577 à 2585 du Règlement des radiocommunications (voir le Tableau I). La discrimination angulaire due à la directivité de l'antenne de la station spatiale du service fixe par satellite peut aussi contribuer à la protection de ce service si l'on impose aux émissions du satellite une séparation angulaire minimale par rapport à l'axe du faisceau d'antenne de la station terrienne du service fixe par satellite.

La puissance surfacique à la station terrienne du service fixe par satellite est donnée par la formule suivante:

$$\begin{aligned} DFP &= P_t + G_t - B_t - 10 \log (4\pi R^2) \\ &= -145 \text{ dB(W/(m}^2 \text{ MHz))} \end{aligned}$$

Les critères de brouillage établis lors de la CAMR-RS-77 spécifient un rapport maximal de -35 dB entre une seule source de brouillage et la porteuse pour protéger les systèmes de télécommunications du service fixe par satellite. Le Rapport 561 prévoit une puissance surfacique, produite à la surface de la Terre par la porteuse du trajet descendant du service fixe par satellite, de l'ordre de -124,0 dB(W/(m² MHz)), d'où: un rapport C/I de 21 dB. Les 14 dB de protection supplémentaire (en supposant un gain d'antenne du service fixe par satellite de 60 dB et une enveloppe des lobes latéraux correspondant à la norme de l'UIT), peuvent s'obtenir en évitant toute transmission à moins de 0,3° de l'axe du faisceau d'antenne de la station terrienne du service fixe par satellite. Cette séparation angulaire est donnée par la formule:

$$G = 32 - 25 \log \theta$$

où

G = gain maximal de l'antenne, dans un angle θ par rapport à l'axe.

Donc:

$$\begin{aligned} (60 - 14) &= 32 - 25 \log \theta \\ \theta &= 0,3 \text{ degré.} \end{aligned}$$

Il n'est pas impossible que soient mises en service des stations terriennes du service fixe par satellite ayant des sensibilités supérieures à ce qu'indique le Rapport 561. Si une telle station avait par exemple les caractéristiques suivantes:

- puissance de bruit de la station terrienne rapportée à l'entrée du récepteur: - 143,6 dB(W/MHz)
- rapport porteuse/bruit sur le trajet descendant utile: 15 dB
- gain de l'antenne de la station terrienne: 65 dBi

la puissance surfacique spectrale du satellite du service fixe à la surface de la Terre serait de $-146 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{MHz))}$. Cette valeur est sensiblement la même que celle du système à satellite de diffusion de signaux horaires. Pour assurer la protection de ce système sensible du service fixe par satellite (c'est-à-dire un rapport porteuse/brouillage (C/I) de 35 dB), il faudrait bloquer la diffusion des signaux horaires sur le trajet descendant alors que celui-ci se trouve à moins d'environ $1,2^\circ$ du faisceau principal de la station terrienne.

Une station terrienne sensible du type indiqué ci-dessus aurait une ouverture de faisceau de l'ordre de $0,048^\circ$. Dans les conditions les plus défavorables (cas où le système de commande du satellite de diffusion de signaux horaires aurait une défaillance alors que le satellite lui-même continuerait à émettre), la station terrienne sensible pourrait recevoir des signaux brouilleurs dans son faisceau principal pendant environ $1,7 \times 10^{-7}\%$ du temps soit environ 5 s par an. Or, la plus longue occurrence possible d'un couplage dans le faisceau principal pour un passage unique est, dans ce cas, de l'ordre de 0,4 s. Si l'on prend en considération tout le cône de $1,2^\circ$ autour de la direction de visée de la station terrienne, un rapport porteuse/brouillage de moins de 35 dB pourrait éventuellement se présenter pendant environ 0,01% du temps avant qu'il puisse être porté remède à la défaillance du satellite de diffusion de signaux horaires.

5. Partage avec le service fixe par satellite (Terre vers espace)

Le trajet descendant envisagé au voisinage de 31 GHz pour le système de diffusion du temps par satellite partagerait une portion de bande attribuée aux trajets montants du service fixe par satellite. On peut éviter les brouillages entre les émissions des stations terriennes du service fixe par satellite et les récepteurs des stations terriennes de diffusion du temps en coordonnant les paramètres et les emplacements des stations, les orientations des antennes, etc. Les brouillages entre l'émetteur de diffusion du temps installé à bord d'un satellite, et le récepteur de l'engin spatial du service fixe par satellite sont très peu probables étant donné les p.i.r.e. relativement peu élevées et la longueur des distances. Prenons un exemple: la puissance surfacique de brouillage au récepteur du service fixe par satellite est donnée par l'expression suivante:

$$\begin{aligned} PFD_I &= P_t + G_t - B_t - 10 \log(4\pi R^2) \\ &\leq 17 + 0 - 84 - 11 - 151 = -229 \text{ dB(W/(m}^2 \text{ Hz))} \end{aligned}$$

De même, la puissance surfacique de la porteuse est égale à:

$$\begin{aligned} PFD_C &= P_t + G_t - B_t - 10 \log(4\pi R^2) \\ &\leq 8,3 - 11 - 152 = -155 \text{ dB(W/(m}^2 \text{ Hz))} \\ &\text{(pour une densité de p.i.r.e. = 8,3 dB(W/Hz) et } R \simeq 41\,500 \text{ km).} \end{aligned}$$

Le rapport C/I serait donc d'environ +74 dB.

6. Partage avec les services fixe et mobile

Le partage entre le trajet montant du service de diffusion du temps par satellite (environ 26 GHz) et les services fixe et mobile est possible à deux conditions: d'une part, que la p.i.r.e. de l'émetteur de diffusion du temps soit conforme aux limites spécifiées au numéro 2542 du Règlement des radiocommunications, d'autre part, que l'on prévoie un rapport C/I qui exclut tout brouillage nuisible mutuel.

Pour les stations terriennes fonctionnant au-dessus de 15 GHz, la densité de la p.i.r.e. doit être:

$$\begin{aligned} 64 \text{ dB(W/1 MHz)} \theta &\leq 0^\circ \\ 64 + 3 \theta \text{ dB(W/1 MHz)} &0^\circ < \theta < 5^\circ. \end{aligned}$$

Pour la station terrienne de diffusion du temps:

$$\text{p.i.r.e.} \leq 20 + 71 - 24 = 67 \text{ dB(W/MHz)}.$$

Ainsi, si $\theta \geq 1,0^\circ$, la première condition est remplie.

La seconde condition, c'est-à-dire le rapport C/I , est satisfaite si l'on coordonne les paramètres (gain, puissance, etc.) et les emplacements des stations, les hauteurs et les orientations des antennes, etc. Par exemple, si deux stations partageant une même bande de fréquences ont des antennes de 15 mètres de hauteur, pour :

$$d \geq \sqrt{17 \times 15} + \sqrt{17 \times 15} \geq 32 \text{ km}$$

leurs horizons radioélectriques ne se trouvent pas dans le même plan.

Le partage au voisinage de 31 GHz entre le trajet descendant du service de diffusion du temps et les services fixe et mobile sera fondé sur un compromis entre le niveau du brouillage et le pourcentage du temps d'exploitation pendant lequel le brouillage se produit.

La densité de puissance de brouillage à l'entrée du récepteur est égale à :

$$P_I = E_T + G_r - L$$

où

$$\begin{aligned} E_T &= \text{densité de la p.i.r.e. de l'émetteur} = P_T + G_T - B_T \\ &= 17 + 4 - 84 = -63 \text{ dB(W/Hz)} \end{aligned}$$

L : affaiblissement de propagation = $92,5 + 20 \log f + 20 \log R$

f : fréquence d'exploitation, GHz

R : distance en km.

Si $R = 3709 \text{ km}$ ($L = 193,7 \text{ dB}$) et $G_R = 60 \text{ dBi}$, $P_I = 196,7 \text{ dB(W/Hz)}$.

Conformément au Rapport 686, pour un réseau de cinq stations de faisceaux hertziens :

$$P_I = -196,2 + 10 \log \left(\frac{X}{1250} \right)$$

où X = brouillage admissible, valeur psophométrique pondérée, (pW0p).

Si $P_I = -196,7$

$$X = 1114 \text{ pW0p}$$

ou

$$-59,5 \text{ dBm0p.}$$

Conformément à la Recommandation 357, un faisceau hertzien analogique à modulation angulaire peut supporter ce niveau de brouillage pendant près de 20% du temps d'exploitation. Il ressort du Rapport 684, qui analyse les statistiques de temps de la visibilité des satellites gravitant sur des orbites à basse altitude, qu'un tel satellite se trouverait pendant moins de 1% du temps dans le faisceau principal d'une station. Le système de diffusion du temps peut en conséquence utiliser des fréquences en partage avec les faisceaux hertziens des services mobile et fixe sans causer de brouillages nuisibles. On peut éliminer les brouillages causés par des émetteurs des services fixe et mobile aux récepteurs des stations terriennes de diffusion du temps, en coordonnant les paramètres et les emplacements des stations, les orientations des antennes, etc.

7. Conclusions

Le partage entre un système de diffusion du temps par satellite et le service de radiolocalisation au voisinage de 14 GHz est possible. On peut éliminer les brouillages que peut causer une station terrienne de diffusion du temps au détriment du service assuré par un système de radiolocalisation, si l'on coordonne les deux installations. La puissance isotrope rayonnée équivalente produite par les stations terriennes du système de diffusion du temps doit être conforme aux dispositions du numéro 2541 du Règlement des radiocommunications. L'énergie rayonnée aux fréquences radioélectriques par des émetteurs du système de radiolocalisation ne perturbera pas les opérations du système de diffusion du temps.

Le partage entre un trajet descendant du système de diffusion du temps et les liaisons espace vers Terre du service fixe par satellite au voisinage de 21 GHz est également possible. L'émetteur de l'engin spatial de diffusion du temps doit respecter les limites spécifiées au numéro 2578 du Règlement des radiocommunications en ce qui concerne la puissance surfacique produite à la surface de la Terre. En outre, le satellite de diffusion du temps doit être programmé pour exclure toute émission au voisinage de 21 GHz lorsque ce satellite se trouve à moins de $0,3^\circ$ de l'axe du faisceau principal de l'antenne de réception d'une station terrienne du service fixe par satellite exploitée sur une fréquence proche de 21 GHz.

Le partage entre un trajet descendant du système de diffusion du temps par satellite et les trajets montants du service fixe par satellite au voisinage de 31 GHz est possible, lorsque les caractéristiques du système de temps sont celles qui sont énoncées dans le présent Rapport. Il faudra une coordination entre les stations terriennes de diffusion du temps et celles du service fixe par satellite pour protéger le système de diffusion du temps contre tout brouillage nuisible.

Le partage des fréquences entre un trajet montant du système de diffusion du temps et les services fixe et mobile au voisinage de 26 GHz est possible à condition que la puissance de l'émetteur ne dépasse pas 100 W pour un gain d'antenne maximal de 71 dB et un angle de site minimal de 1° au-dessus du plan de l'horizon. La coordination entre stations terriennes et stations de faisceaux hertziens sera nécessaire.

Le partage entre un trajet descendant du système de diffusion du temps et les services fixe et mobile au voisinage de 31 GHz est possible si la puissance de l'émetteur du satellite ne dépasse pas 50 W et si le gain d'antenne du satellite n'est pas supérieur à 4 dB. On utilisera le codage PRN pour améliorer les rapports signal/bruit sans élever les niveaux des puissances de brouillage.

RAPPORT 896-1

DOCUMENTATION DES MODIFICATIONS APPORTÉES AUX SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1982-1986)

1. Introduction

Les signaux horaires émis par les diverses stations du service des signaux horaires ont toujours été maintenus au voisinage du temps déterminé par la rotation de la Terre, soit par des sauts soit par des changements dans le rythme des signaux. Aujourd'hui, la plupart des pays transmettent le temps UTC.

2. Signaux horaires des Etats-Unis

Les sauts de temps et de fréquence pratiqués par la station WWV du National Bureau of Standards et par l'horloge maîtresse du US Naval Observatory (USNO) pour les années 1956-1971 ont été indiqués dans [CCIR, 1978-82]. Des corrections au temps UTC sont apportées depuis 1972.

3. Signaux horaires de la station JJY

Les sauts de temps et de fréquence pratiqués par la station JJY des Radio Research Laboratories (RRL) du Japon ont été indiqués dans [CCIR, 1982-86]. De janvier 1955 à août 1961, le temps et la fréquence de la station JJY ont été maintenus de manière à coïncider très sensiblement avec le UT2 qui était déterminé par l'Observatoire astronomique de Tokyo (TAO). Le système UTC a été introduit au 1^{er} septembre 1961.

4. Avant l'introduction du système UTC actuel (conformément à la Recommandation 460), plusieurs méthodes d'ajustement des signaux horaires ont été utilisées. Il faut que les détails de ces ajustements restent accessibles pour les besoins des archives. Les Administrations de la République fédérale d'Allemagne, de France, du Japon, du Royaume-Uni et des Etats-Unis d'Amérique ont envoyé ces renseignements au Bureau international de l'heure (BIH) qui, conformément à la suggestion exprimée dans le Vœu 71, a accepté de conserver ces renseignements en archives. En outre, chaque Centre Mondial d'Exploitation des données pourra également constituer une source possible pour ces renseignements.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Documents du CCIR

[1978-82]: 7/103 (Etats-Unis d'Amérique).

[1982-86]: 7/4 (Japon).

RAPPORT 897-1

**MÉTHODES DE TRANSFERT DE PRÉCISION
DE SIGNAUX HORAIRES A COURTE DISTANCE**

(Programme d'études 3C/7)

(1982-1986)

1. Introduction

On a besoin de pouvoir comparer des échelles de temps maintenues en des emplacements séparés par de courtes distances inférieures à 100 km; dans le présent Rapport, il s'agit d'emplacements que l'on considère comme «locaux» s'ils partagent le même environnement ou le même milieu de propagation. Cela comprend les emplacements en visibilité directe, ceux qui sont à portée de câbles à paires coaxiales ou de fibres optiques ou encore ceux que l'on peut commodément atteindre à l'aide d'une horloge transportable.

2. Méthode de la visibilité commune

Une méthode très répandue de synchronisation en fréquence et en temps (Rapport 363) consiste à contrôler en commun un signal radioélectrique qui peut être reçu aux deux emplacements (Loran-C, ligne de télévision, porteuse de télévision, porteuses stabilisées à ondes myriamétriques, hectométriques, décimétriques, Omega) et à comparer les différences observées entre le signal reçu de l'extérieur et un signal interne engendré en chacun des emplacements. L'observation simultanée des signaux d'un satellite par des récepteurs au sol indépendants est l'un des exemples les plus prometteurs [Taylor, 1974], bien que cette méthode présente l'inconvénient que la différence entre les trajets de propagation doit être étalonnée.

3. Câbles, y compris les câbles en fibres optiques

Lorsque les distances sont telles qu'un câble à paires coaxiales peut être utilisé pour relier les emplacements, la propagation bilatérale des signaux fournit un moyen d'étalonner la longueur du trajet et de faire des comparaisons directes des signaux pour la synchronisation des fréquences étalon et des signaux horaires [Rueger et Bates, 1979].

La comparaison d'échelles de temps au moyen de lignes téléphoniques est une méthode simple et peu coûteuse. Des expériences de comparaison d'échelles de temps ont été effectuées par les Radio Research Laboratories (RRL) du Japon, sur des circuits téléphoniques locaux et des circuits téléphoniques à grande distance de 800 km, équipés de coupleurs acoustiques. On a déterminé l'instant de réception et le temps de propagation aller-retour pour différentes fréquences porteuses utilisées pour les modes d'appel et de réponse des coupleurs et on a calculé la valeur moyenne des résultats. Une précision de $\pm 0,1$ ms a été obtenue dans le cas des circuits locaux et des circuits à grande distance [CCIR, 1982-86]. Cette méthode peut être appliquée uniquement si les deux trajets sont égaux, mais certaines administrations ont adopté des acheminements asymétriques. Aux Etats-Unis d'Amérique, par exemple, les communications à grande distance s'effectuent souvent dans un sens par satellite et dans l'autre par une liaison terrestre. Cette répartition vise à réduire le temps de propagation aller-retour. Toutefois, quand les satellites sont utilisés, si le temps de propagation mesuré est inférieur à 100 ms ou supérieur à 500 ms, il est très probable que des acheminements identiques ont été utilisés et la méthode définie pour la compensation du temps de propagation est applicable.

Une liaison de transfert T/F expérimentale utilisant des fibres optiques à 850 nm avec modulation à 100 MHz a été testée au Jet Propulsion Laboratory. Sur un trajet de 3 km, on a obtenu une stabilité de 3×10^{-15} à 100 s et de 1×10^{-16} à 1000 s. Le temps de propagation aller-retour dans une seule fibre a été mesuré en permanence et la phase d'entrée a été corrigée pour compenser les variations du temps de propagation. On a ainsi obtenu une phase constante à l'extrémité de réception. Un système à fibres monomodes à 1300 nm avec une amélioration prévue des performances est en cours d'installation à Goldstone, en Californie (EU) pour relier deux antennes du Deep Space Network [Lutes, 1982].

L'Université technique de Graz a mis au point un système de diffusion par fibres optiques multimodes de l'information temps/fréquence sur des distances atteignant plusieurs centaines de mètres, qui a été réalisé à l'aide de composants commercialement disponibles. Ce système est comparable, tant par son prix que par ses performances, au matériel classique de laboratoires de chronométrie. La gigue (sortie/entrée, écart type de 100 échantillons) est bien inférieure à 50 ps et les variations du temps de propagation à l'émetteur comme au récepteur dues à la température, sont respectivement inférieures à 30 et 50 ps/°C. Les variations du temps de propagation des câbles utilisés sont comprises entre 5 et 17 ps/°C pour des câbles d'une longueur de 100 m [Kirchner et Ressler, 1984].

4. Liaisons en visibilité directe

Pour certaines distances, le recours à des liaisons radioélectriques en visibilité directe (y compris celles utilisant les micro-ondes ou les faisceaux laser) constitue une solution économique pour transférer des signaux sur des trajets de propagation unilatéraux ou sur des trajets bilatéraux avec réflexion. Le recours à des trajets bilatéraux permet d'évaluer l'effet de facteurs propres au trajet de propagation (température, humidité, nuages, fumées ou pluie), mais il peut alors y avoir des effets de trajets multiples qui dépendent des caractéristiques de réalisation des antennes d'émission et de réception, ainsi que de l'emplacement pour ce qui est des obstacles ou des surfaces réfléchissantes se trouvant au voisinage du trajet à visibilité directe.

Une liaison aérienne bidirectionnelle horizontale de comparaison de temps a été établie entre, d'une part, l'équipement de transfert des signaux horaires et de télémétrie laser de l'Université du Maryland, situé au télescope de 1,2 m du Goddard Optical Research Facility (GORF) et, d'autre part, la Time Services Division de US Naval Observatory (USNO). Le trajet courbé couvre une distance de 26 km dans un sens. Deux réflecteurs optiques en coin situés à l'USNO, identiques à ceux placés sur la Lune pendant le programme Apollo, réfléchissent les impulsions laser et les renvoient au GORF. Des impulsions de lumière d'une durée de 100 ps et d'une énergie de plusieurs centaines de μJ provenant d'un laser au néodymium-YAG, doublé en fréquence jusqu'à une longueur d'onde de 532 nm (vert), sont envoyées à un rythme de 10 impulsions par seconde. La détection à l'USNO se fait au moyen d'une photodiode à avalanche et la mesure du temps est faite par un compteur calculateur et un ordinateur par rapport à un train d'impulsions de 10 impulsions par seconde provenant de l'horloge maîtresse. L'écart type pour 100 comparaisons est typiquement de 200 à 400 ps. L'écart type correspondant de la moyenne est de 20 à 40 ps. La précision d'étalonnage est, actuellement, de 1 à 2 ns, il est effectué avec une horloge portative [Alley et autres, 1982].

Des techniques similaires ont été utilisées en 1982 dans une expérience de comparaison du temps par impulsions laser entre les deux sections de l'Observatoire de Shanghai, Zi-Ka-Wei et Zo-Se, séparées de 25,2 km. Les fluctuations dans le temps de la différence d'horloge entre les deux sections sont respectivement d'environ $\pm 8,0$ ns (valeur efficace) pour une seule mesure et d'environ $\pm 1,3$ ns pour la valeur moyenne des mesures effectuées pendant deux minutes [Yang et autres, 1983].

5. Observations d'ordre général

Les signaux de rythme utilisés aux fins de synchronisation sont caractérisés par la durée d'établissement, la largeur de bande disponible et la stabilité du temps de propagation de phase tandis que le signal traverse le milieu de propagation et les appareils de mesure.

La pratique s'est établie d'étalonner les différences entre les longueurs des trajets de propagation en transportant une horloge de précision entre les deux emplacements dans l'hypothèse où l'on peut corriger la marche de cette horloge d'après les données sur son vieillissement, sa vitesse et les corrections de gravitation [Allan et Ashby, 1979].

Dans le Tableau I, on verra quelles sont les possibilités offertes par plusieurs méthodes en matière de transferts de haute qualité lorsqu'il s'agit de distances au plus égales à une centaine de kilomètres.

TABLEAU I — Incertitude en matière de transfert de signaux horaires à courte distance

Méthode utilisée pour le transfert		Incertitude	Nature de l'utilisation	Calibration (1)
Horloge transportable	[Rogers et autres, 1977]	2 ns	Routine	
Télévision (ligne)	[Lavanceau et Shephard, 1978]	10 ns	Routine	X
Télévision (porteuse)	[Lavanceau et Shephard, 1978]	0,1 ns	Routine	X
Faisceau hertzien	[MacConnell et autres, 1977 ; Norton et autres, 1962]	2 ps 2-50 ps	Expérimentale	X (2)
Câbles à paires coaxiales	[Rueger et Bates, 1979]	0,2 ns	Routine	X (2)
Loran-C	[Winkler, 1972]	0,1 µs	Routine	X
Ondes myriamétriques (Omega)	[Cooper et Chi, 1979]	1,5 µs	Expérimentale	X
Signaux horaires, ondes décamétriques		1 ms	Routine	X
Téléphonie 10 kHz		10-100 µs		X
Optique				
Fibres optiques		10 µs	Expérimentale	X (2)
Laser	[Besson, 1970]	0,1 ns	Expérimentale	X
Géodimètre	[Levine, 1978 ; Faller et Faller, 1977]	2 ps	Expérimentale	
Liaisons par satellite				
GOES	[Beehler et autres, 1979]	1 µs	Routine	
Transit	[Laidet, 1972 ; Beehler et autres, 1979]	1-5 µs	Routine	
Programme Transit amélioré	[Taylor, 1974 ; Rueger et Bates, 1979]	10 ns	Expérimentale	
Système mondial de détermination de position	[Schuchman et Spilker, 1977]	10 ns	Pour réalisations éventuelles	
Radiodiffusion	[CCIR, 1970-74 a]	6 µs	Routine	X
Lignes électriques 50-60 Hz	[CCIR, 1970-74 b et c]	0,25 ms	Routine	X

(1) La calibration des deux instruments de l'installation est nécessaire pour garantir la valeur indiquée d'incertitude du transfert. Les méthodes marquées par un « X » requièrent une calibration par l'intermédiaire d'un conduit de transmission indépendant.

(2) Une calibration externe n'est pas nécessaire pour un fonctionnement bilatéral.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLAN, D. et ASHBY, N. [1979] Practical applications of relativity for a global coordinate time scale. *Radio Sci.*, Vol. 14, 649-669.
- ALLEY, C. O., RAYNER, J. D., STEGGERDA, C. A., MULLENDORF, J. V., SMALL, L. et WAGNER, S. [1982] Time transfer between the Goddard optical research facility and the US Naval Observatory using 100 picosecond laser pulses. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 244.

- BEEHLER, R. E., DAVIS, D. D., CATEORA, J. V., CLEMENTS, A. J., BARNES, J. A. et MENDEZ-QUINONES [novembre 1979] Time recovery measurements using operational GOES and TRANSIT satellites. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 283-315.
- BESSON, R. J. [1970] Comparison of national time standards by simple overflight, *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-19, 4, 227-232.
- COOPER, R. S. et CHI, A. R. [1979] A review of satellite time transfer technology: Accomplishments and future applications. *Radio Sci.*, Vol. 14, 605-619.
- FALLER, J. E. et FALLER, J. L. [1977] Measurement of the position of points on the earth surface using absolute gravimeter and a multi wavelength geodimeter as complements of extra-terrestrial techniques. Ed., J. D. Mulholland *Scientific Application of Lunar Laser Ranging*, 277-283.
- KIRCHNER, D. et RESSLER, H. [décembre 1984] A fibre optic time and frequency distribution system, *CSTG Bull.*, 7, 171-175.
- LAIDET, L. M. [mai 1972] Worldwide synchronization using the Transit Satellite System. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 60, 630-632.
- LAVANCEAU, J. D. et SHEPHARD, L. F. [1978] Real time distribution via passive TV networks. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., Etats-Unis d'Amérique, 249-276.
- LEVINE, J. [1978] Multiple wavelength geodesy. Proc. 9th GEOP Conf., Columbus, Ohio, Etats-Unis d'Amérique.
- LUTES, G. [septembre 1982] Optical fiber applications in the NASA deep space network. *Laser Focus*, Vol. 18, 9, 115-121.
- MacCONNELL, J. W., SYDNOR, R. L. et HINSHAW, J. T. [1977] A precision microwave frequency and time distribution system. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., Etats-Unis d'Amérique.
- NORTON, K. A., BARROWS, E., THOMPSON, M. C., Jr. et JAMES, H. B. [décembre 1962] Variance of radio frequency caused by turbulence on line-of-sight transmission. *IRE Trans. P.G.I.*
- ROGERS, A. E. E. et autres [1977] Clock synchronization via very long baseline interferometry. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., Etats-Unis d'Amérique, 127-134.
- RUEGER, L. J. et BATES, A. G. [juillet-août 1979] NOVA satellite time experiment. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 707-714.
- SCHUCHMAN, L. et SPILKER, J. [1977] Time transfer via GPS. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., Etats-Unis d'Amérique.
- TAYLOR, R. J. [29-31 mai 1974] Satellite Transit to ground timing experiments. Proc. 28th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 384-388 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- WINKLER, G. M. R. [1972] Recent experiments with flying atomic clocks, LORAN-C (etc.) for clock synchronization. Rapport à la XVII^e Assemblée générale de l'URSI, Varsovie, République populaire de Pologne.
- YANG, F., ZHUANG, Q., SU, J., TAN, D., LI, Zh. et CAI, J. [1983] Time comparison experiment via laser pulses. *Kexue Tongbao*, Vol. 12, 746-757.

Documents du CCIR

- [1970-74]: a. 7/2 (Japon); b. 7/57 (Allemagne (République fédérale d')); c. 7/82 (Italie).
- [1982-86]: 7/2 (Japon).

RAPPORT 1016

MÉTHODES UTILISANT LES SIGNAUX DE TÉLÉVISION POUR LE TRANSFERT ET LA DIFFUSION DES SIGNAUX HORAIRE ET DES FRÉQUENCES ÉTALON

(Programme d'études 3C/7)

(1986)

Les signaux de télévision conviennent bien à la diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon avec plusieurs degrés de précision et à la comparaison d'échelles de temps; ils présentent notamment les avantages ci-après:

- leur large disponibilité et l'intensité satisfaisante du signal;
- leur structure temporelle et la grande largeur de bande déjà attribuée;
- le faible prix de l'équipement de réception;
- le fait que leur propagation est prévisible.

Plusieurs méthodes ont été mises au point pour comparer les échelles de temps par télévision. La méthode originale de Tolman et autres [1967] prévoit les mesures simultanées du temps d'arrivée d'impulsions de synchronisation déterminées. Ce système est utilisé couramment en République populaire de Chine [CCIR, 1974-78a], en Europe [Rovera, 1972; Allan et autres, 1970; Parcelier, 1976; Parcelier et Fréon, 1977; Becker et Enslin, 1972], au Japon [Saburi et autres, 1978] et aux Etats-Unis [Allan et autres, 1972; Davis et autres, 1971] où il est appelé «Ligne 10».

Les impulsions de synchronisation de télévision sont utilisées comme repères communs pour de nombreuses comparaisons du temps sur le plan national et parfois international. Le temps de propagation doit être déterminé par des horloges portatives ou par d'autres méthodes appropriées. Pour les comparaisons en visibilité directe, utilisant le même émetteur de télévision, l'incertitude sur la mesure d'une différence de temps peut être de dix ns ou moins.

On ne peut utiliser des signaux de télévision provenant d'émetteurs différents aux fins de la comparaison de temps ou de fréquences que si le temps de propagation résultant des liaisons entre les émetteurs reste constant ou s'il est limité à un petit nombre de valeurs constantes et faciles à distinguer. Il convient aussi de ne pas utiliser de synchroniseurs de trame. De tels synchroniseurs mémorisent une image complète sous forme numérique et libèrent la trame en synchronisation avec une horloge locale. L'incertitude introduite par les liaisons entre émetteurs est généralement inférieure à 1 μ s si elles suivent la même voie d'acheminement, mais peut atteindre plusieurs microsecondes. L'utilisation de voies d'acheminement différentes sur le réseau de liaisons peut occasionner des variations beaucoup plus grandes.

Une méthode de mesure des temps de propagation, section par section, pour la détermination du temps de propagation total a été utilisée à l'Observatoire de Beijing en République populaire de Chine. Cette méthode n'a nécessité que des appareils simples et un équipement classique. Les résultats ont été vérifiés et comparés au temps des horloges transportables et du Loran-C, les écarts systématiques entre les différentes méthodes se situant dans les limites de 1 μ s.

Des liaisons à satellite peuvent avoir des temps de propagation variables et d'une durée indéfinie, ou des magasins de trames dont l'entrée et la sortie sont commandées par des horloges différentes. Tel est le cas, par exemple, des synchroniseurs de trames et des convertisseurs d'étalons, dont l'utilisation devrait augmenter. S'il est vrai que cela peut limiter à l'avenir l'utilité de grands réseaux de télévision pour la diffusion de signaux horaires et de fréquences, cela peut aussi en simplifier localement l'utilisation, en permettant une commande active et indépendante du rythme du signal dans un sous-réseau ou après le passage par une liaison à satellite.

Des expériences systématiques, réalisées pendant sept années par les Observatoires de Shaanxi, Shanghai et Beijing, ont montré que la technique d'utilisation de l'impulsion de synchronisation de la ligne 6 permet d'obtenir une précision de 2 μ s au moins et une précision journalière d'étalonnage des fréquences d'environ $(2 - 20) \times 10^{-13}$ sur une distance de 2000 km.

Au Japon, on a réussi à améliorer la stabilité de l'équipement de mesure utilisé pour cette méthode en stabilisant la fréquence de l'oscillateur local dans l'étage d'accord de l'appareil de télévision et en donnant un réglage fixe à la commande automatique de gain dans l'amplificateur à fréquence intermédiaire, la tension de commande étant aussi élevée que possible. On a amélioré les stabilités à court et à long terme, qui ont atteint environ 10 ns et 30 ns respectivement [Inouye et Nara, 1978; CCIR, 1974-78b]. En outre, des expériences entreprises récemment ont montré que l'on peut améliorer notablement la stabilité en mesurant le front arrière de l'impulsion de synchronisation plutôt que son front avant. Ainsi, pour de simples mesures différentielles effectuées au moyen de la même impulsion de synchronisation, on obtient d'excellents résultats en utilisant le front arrière qui, plus raide, donne une meilleure précision de mesure [Saburi et autres, 1978].

Il est à noter, cependant, qu'il est généralement plus facile de régler le moment d'arrivée du front *avant* de l'impulsion par rapport à un repère de temps connu, que celui du front arrière. On obtiendra donc peut-être des résultats plus exacts avec le front avant pour mesurer la différence de temps entre une impulsion d'horloge locale et une impulsion particulière d'un signal télévisuel synchronisé.

On utilise en France plusieurs générations de récepteurs construits spécialement pour la comparaison journalière de 15 horloges dans plusieurs laboratoires et qui donnent le TA (F) [Parcelier, 1976]. Les mesures se rapportent à une impulsion bien caractérisée sur une ligne d'essai et sont émises automatiquement à partir de l'horloge locale. Le réglage se fait selon la forme optimale de l'impulsion reçue; la commande automatique du gain et de niveau donne des résultats qui ne sont pas influencés par le contenu de l'image. Des mesures simultanées pendant 30 min par deux équipements adjacents ont donné une dispersion (1σ) de +5 ns de part et d'autre de la moyenne; on obtient une précision de 40 à 50 ns en exploitation normale dans une série de 15 à 30 mesures consécutives sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres.

En URSS, des expériences ont été faites en insérant des impulsions de repère de seconde dans la sixième ligne du signal vidéo, avec possibilité de télécommande par rapport à l'échelle UTC (S). De plus, on a également inséré un code horaire [Borisockin et Fedoton, 1982].

Deux horloges à césium situées, l'une en Bretagne, l'autre à Paris, ont été comparées pendant un mois par des mesures quotidiennes de télévision et par six transports d'horloge [Parcelier et Fréon, 1977]. L'écart type des différences entre les deux moyens de comparaison, sur cette période est d'une quinzaine de nanosecondes. Un dernier transport d'horloge effectué deux mois et demi plus tard a donné un résultat supérieur de 28 nanosecondes à celui de la télévision.

Des comparaisons régulières d'horloges à l'aide de signaux de télévision et huit mesures au moyen d'horloges transportables ont été effectuées pendant sept années entre trois laboratoires de Tokyo, tous situés à une vingtaine de kilomètres de l'émetteur de télévision. L'écart type sur la différence entre les deux méthodes a été d'environ 50 ns. Il a été tenu compte des variations du temps de transmission dans les récepteurs, déterminées par des étalonnages locaux.

Un récepteur mis au point en Suisse permet de mesurer le front avant d'une impulsion de synchronisation de ligne; il comporte une commande automatique de fréquence et une stabilisation précise des niveaux de signaux immédiatement avant et après le front. Des mesures de signaux provenant du même émetteur par des récepteurs adjacents ont donné des valeurs 1σ inférieures à 1 ns pour des temps moyens de 10 s et plus, mais, pour des signaux d'émetteurs différents, la valeur de 1σ s'élève d'environ 1 ns à 3 ns lorsque le temps moyen passe de 50 s à 500 s [CCIR, 1974-78c].

Une méthode assez semblable a été décrite par Lavanceau et Carrol [1971] à l'USNO. Il s'agit de stabiliser la sous-porteuse couleur par rapport à un étalon de fréquence à jet de césium, dans le studio de télévision. L'impulsion de synchronisation de la ligne 10 est commandée et synchronisée par rapport à un «Tableau de coïncidences» (TOC) publié par l'USNO, qui peut être utilisé avec le système NTSC, similaire à celui du TOC Loran-C.

Contrairement à la référence TOC cohérente, telle qu'elle est utilisée dans le bulletin hebdomadaire de l'USNO (Time Service Announcements, série 4), on se propose au Japon [Saburi et autres, 1978] d'utiliser la même référence TOC jour après jour.

Le NBS (Etats-Unis d'Amérique) a mis au point et essayé une méthode qui consiste à diffuser par télévision des signaux horaires en appliquant des données codées dans certaines lignes du signal de télévision. On a utilisé tout d'abord les lignes 13 à 16, auxquelles on a ajouté par la suite la ligne 1 et la ligne 21. On a prévu dans ce système un signal de référence à 1 MHz [Davis et autres, 1970; Howe, 1972].

Les systèmes de télévision utilisés en Europe ont des taux nominaux de répétition de trame de 25 Hz et l'on peut en principe insérer des marqueurs de secondes UTC en un endroit fixe de la trame.

Le réseau national de télévision de Yougoslavie est utilisé de cette manière pour diffuser des signaux horaires et des fréquences provenant d'une horloge au césium du studio de Belgrade. Des impulsions correspondant à la seconde sur l'échelle UTC (YU) avec marqueurs de minutes et d'heures sont insérées dans la deuxième partie de la ligne 19, tandis que la ligne 332 contient un code qui donne l'heure, la minute et la seconde et indique l'origine et l'état de l'information horaire. La première partie des deux lignes contient une salve stabilisée de 1 MHz [Kovačević, 1973; 1977]. La télévision de Belgrade diffuse ces signaux sur ses deux programmes pendant toute la durée des émissions depuis 1975.

Au Royaume-Uni, les impulsions de synchronisation de ligne et de trame émises par la British Broadcasting Corporation dans la bande 9 sont généralement commandées par un étalon au rubidium. Leur écart par rapport à UTC n'est généralement que de quelques microsecondes par jour mais il y a également des échelles de temps irréversibles selon le programme. Les signaux de plusieurs émetteurs desservant de grandes agglomérations urbaines et industrielles sont contrôlés, tous les jours ouvrables, avec une précision de 0,1 μ s. Les mesures établissent un rapport entre les échelles UTC maintenues au National Physical Laboratory et l'emplacement de l'émetteur MSF/GBR à Rugby [CCIR, 1974-78d].

On a également mis au point plusieurs méthodes permettant d'obtenir des références de fréquence très stables à partir d'émissions télévisuelles. En République fédérale d'Allemagne, on a étendu la régulation précise des fréquences à environ 160 émetteurs de télévision de 82 stations, dans la gamme de fréquences comprise entre 471,24 et 783,26 MHz. Les fréquences d'émission sont télécommandées par un étalon au césium ajusté par rapport à un groupe central d'étalons au césium commerciaux de haute performance. Les stations examinées ont présenté un écart de fréquence normalisé moyen de 3×10^{-12} . L'écart type calculé est de 3×10^{-11} . On a constaté que les signaux reçus à des distances de 46 à 125 km de l'émetteur présentaient, au cours d'une période de 30 s, des fluctuations de phase correspondant à des variations de fréquence de l'ordre de 1×10^{-11} , dans le cas le plus défavorable.

En République démocratique allemande, les impulsions de synchronisation de ligne et de trame émises par le réseau de télévision national sont commandées directement par le service des signaux horaires et des fréquences étalon, avec un écart type de 6 ns, et elles servent à l'émission de fréquences étalon dans le pays et aux comparaisons de temps avec les services des signaux horaires de pays voisins. Des sauts de temps réversibles supérieurs à 200 ns, dus à des variations du temps de transmission sur les liaisons du réseau de télévision utilisé, sont éliminés grâce à une méthode d'évaluation qui réduit l'incertitude de ces comparaisons à moins de 50 ns [Kalau, 1979].

En France, on a utilisé une fréquence porteuse de télévision de 182,25 MHz comme référence commune dans des comparaisons de fréquence entre des masers à hydrogène de deux laboratoires distants de 16 km. Des synthétiseurs entraînés par les masers servaient à produire sur la porteuse des impulsions en audiofréquences et des comparaisons de phase de ces impulsions étaient faites par l'intermédiaire d'une liaison téléphonique. Les résolutions obtenues étaient de $4 \times 10^{-11} \tau^{-1}$ pour $1 \text{ s} < \tau < 300 \text{ s}$ et 6×10^{-14} pour $\tau = 1 \text{ heure}$ [Gabry et autres, 1977].

La stabilité de fréquence assurée par une sous-porteuse couleur de télévision a été démontrée au Japon et aux Etats-Unis. Cette très grande stabilité est due au fait que les réseaux de télévision utilisent, pour produire les fréquences des sous-porteuses, des étalons de fréquence atomiques.

On a fait des comparaisons de fréquence entre Tokyo et Mizusawa (Japon) [Saburi et autres, 1978]. La sous-porteuse couleur a été comparée en phase avec un signal de sous-porteuse couleur produit localement. La précision obtenue était en moyenne de $6,5 \times 10^{-12}$, 4×10^{-12} et $2,2 \times 10^{-12}$ sur des périodes de 10, 30 et 60 minutes respectivement.

Des comparaisons de fréquence ont été effectuées par l'Institut national de métrologie de la République populaire de Chine en 1979. Les résultats montrent que, si l'on utilise la sous-porteuse couleur de télévision sur une distance de 2000 km, la précision de l'étalonnage des fréquences est supérieure à $\pm 5 \times 10^{-12}$ en 30 min. Des résultats similaires ont été par ailleurs obtenus par les Observatoires de Beijing et Shaanxi.

Une méthode très simple, qui utilise directement l'impulsion de la sous-porteuse couleur, a été expérimentée à l'Observatoire de Shanghai. La précision de l'étalonnage des fréquences est de l'ordre de 1 à 2×10^{-11} en 15 min.

Certains essais ayant prouvé l'excellente stabilité à long terme des émissions effectuées par les grands réseaux de télévision des Etats-Unis avec sous-porteuse couleur à 3,58 MHz [Davis et autres, 1971], le NBS vient d'instaurer un service national amélioré d'étalonnage des fréquences. Il est maintenant facile et peu coûteux, pour à peu près tous les utilisateurs des Etats-Unis, d'étalonner leur oscillateur avec une précision de quelque 10^{-11} , en 15 minutes environ, en prenant comme référence l'étalon de fréquence primaire du NBS. Cette précision est rendue possible par la grande stabilité des étalons de fréquence atomiques du réseau qui engendrent les signaux de sous-porteuse, et par le fait que le NBS mesure systématiquement les fréquences des sous-porteuses.

L'utilisateur doit d'abord mesurer la différence de fréquence entre son oscillateur et la sous-porteuse d'un des grands réseaux de télévision, à un moment où il reçoit directement les programmes de ce réseau. On peut facilement obtenir le signal de sous-porteuse nécessaire à l'opération sur un récepteur de télévision en couleur légèrement modifié. Au NBS, plusieurs modèles d'appareils ont été conçus et construits à cet effet à l'intention des utilisateurs [Davis, 1975]. Sous sa forme la plus simple (comparateur de barres de couleur), la mesure s'effectue en chronométrant manuellement le temps que met une barre visible sur l'écran de télévision pour parcourir le cycle correspondant à une séquence de changement de couleurs.

Dans un modèle plus perfectionné, toujours à l'intention des utilisateurs, la différence de fréquence entre l'oscillateur local et la sous-porteuse du réseau est mesurée, calculée et affichée automatiquement et directement sur l'écran de télévision, en multiples de 10^{-11} . L'ensemble des opérations de mesure automatique prend environ 15 minutes et assure une précision de 1×10^{-11} .

Le NBS a encore mis au point un système d'enregistrement de données d'une grande souplesse d'emploi comportant un microprocesseur, qui effectue automatiquement la comparaison des impulsions de synchronisation «de ligne 10» ainsi que les mesures comparatives de fréquence de la sous-porteuse de couleur. Au moyen de tels appareils relativement peu onéreux, installés en plusieurs endroits reculés du territoire des Etats-Unis, on effectue ainsi régulièrement et sans surveillance des comparaisons de temps à 10 ns près ainsi que des comparaisons de fréquence (moyenne sur 1 jour) à 1×10^{-12} près [Davis, 1976].

L'un des principaux réseaux des Etats-Unis se sert aujourd'hui d'étalons au césium pour engendrer les sous-porteuses de couleur à 3,58 MHz qui sont ensuite distribuées dans tout le pays. L'emploi de l'étalon au césium fait disparaître pratiquement toute dérive à long terme de la fréquence de la sous-porteuse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLAN, D. W., BLAIR, B. E., DAVIS, D. D. et MACHLAN, H. E. [avril 1972] Precision and accuracy of remote synchronization via network television broadcasts, LORAN-C, and portable clocks. *Metrologia*, Vol. 8, 64-72.
- ALLAN, D. W., LESCHIUTTA, S. et ROVERA, G. [1970] TV frame pulses used for precision time synchronization and their noise distribution. *Alta Frequenza*, Vol. XXXIX, 452.
- BECKER, G. et ENSLIN, H. [1972] Genaue Zeit- und Frequenzvergleiche mittels Fernsehimpulsen (Comparaisons précises de temps et de fréquence à l'aide des impulsions de synchronisation de la télévision). *Frequenz*, Vol. 26, 332.
- BORISOCKIN, V. V. et FEDOTON, Y. A. [1982] Transmission T/F signals via TV system. *Izm. Tekhn.*, 2.
- DAVIS, D. D. [20 mars 1975] Calibrating oscillators with TV colour-reference signals. *Electronics*, Vol. 48, 107-114.
- DAVIS, D. D. [décembre 1976] A microprocessor data logging system for utilizing TV as a time-frequency transfer standard. Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, (US Naval Research Laboratory, Washington, DC) 167-183.
- DAVIS, D. D., BLAIR, B. E. et BARNABA, J. F. [août 1971] Long-term continental US timing system via television networks. *IEEE Spectrum*, Vol. 8, 41-52.
- DAVIS, D. D., JESPERSEN, J. L. et KAMAS, G. [juin 1970] The use of television signals from time and frequency dissemination. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 58, 931-933.
- GABRY, A., FAUCHERON, G., DUBOIS, B. (CNET) et PETIT, P. (CNRS) [1-3 juin 1977] Distant comparison of stable frequency standards by means of the transmission of a beat note between the carrier of a TV broadcast signal and a frequency synthesized from the frequency standards. Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).

- HOWE, D. A. [août 1972] Nationwide precise time and frequency distribution utilizing an active code within network television broadcasts. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-21, 263-276.
- INOUE, T. et NARA, M. [avril 1978] The stability of time comparison by TV signal of common emission. *Bull. Nat. Res. Lab. Metrology*, 36.
- KALAU, M. [1979] Experiences with time comparisons by the TV method. Proc. 10th International Congress of Chronometry, Genève, Vol. 2, 83-89.
- KOVAČEVIĆ, Z. B. [1973] Premiers résultats expérimentaux d'émissions de signaux horaires et de fréquences étalon sur le réseau de télévision. JUKEM, Actes, XXV/13, Belgrade (en serbocroate).
- KOVAČEVIĆ, Z. B. [1977] New possibilities for time and standard frequency dissemination over TV networks. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md, Etats-Unis d'Amérique.
- LAVANCEAU, J. D. et CARROLL, D. [1971] Real time synchronization via passive television transmission. Proc. 3rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Strategic Planning Meeting, 331-366.
- PARCELIER, P. [23 janvier 1976] Comparaison d'horloges atomiques par réception de signaux de télévision. *Bull. d'Information du Bureau Nat. de Métrologie*, 23, 32-39.
- PARCELIER, P. et FREON, G. [3-7 octobre 1977] Utilisation de la télévision dans la métrologie temps-fréquence. Actes du Colloque international sur la mesure en télécommunications organisé par l'URSI. Lannion, France.
- ROVERA, G. [1972] On the accuracy of the TV timing method. *Alta Frequenza*, 41, 822-824.
- SABURI, Y., YASUDA, Y., KOBAYASHI, S. et SATO, T. [1978] Precision comparison of time and frequency by means of TV signals. *Rev. Radio Res. Labs (Japon)*, Vol. 18, 433-444.
- TOLMAN, J., PTACEK, V., SOUCEK, A. et STECHER, R. [décembre 1967] Microsecond clock comparison by means of TV synchronizing pulses. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-16, 3, 247-254.

Documents du CCIR

[1974-78]: a. 7/137 (Chine (République populaire de)); b. 7/6 (Japon); c. 7/125 (Suisse); d. 7/106 (Royaume-Uni).

RAPPORT 1017

CARACTÉRISATION DES RETARDS PRODUITS DANS LES ANTENNES

(Question 9/7)

(1986)

1. Introduction

A mesure qu'une plus grande résolution dans le transfert des signaux horaires devient possible, grâce à l'emploi de générateurs de signaux horaires et de fréquences étalon améliorés présentant une plus grande stabilité à court terme, les moyens utilisés pour étalonner et mesurer les retards subis dans les circuits entre les étalons à comparer peuvent être la source d'erreurs la plus importante. Dans les circuits pris en considération, on trouve également les retards dus aux antennes utilisées pour l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques se propageant dans l'espace entre générateurs de signaux horaires de précision. Le présent Rapport donne un aperçu des travaux qui ont été publiés sur ce sujet et constitue une première tentative pour décrire l'état actuel de ces techniques. Les moyens utilisés pour effectuer ces étalonnages n'ayant pas été normalisés entre les administrations, il convient d'étudier des directives susceptibles de conduire à l'adoption de procédures de mesures acceptables.

2. Considérations générales

Il existe actuellement des générateurs de signaux horaires capables de maintenir pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours, des échelles de temps avec des variations inférieures à 1 ns. Les retards subis dans les circuits électroniques peuvent être mesurés et étalonnés en laboratoire avec une précision de l'ordre de la centaine de femtosecondes. La sensibilité de ces circuits aux modifications de l'environnement, température, champ magnétique, accélération, etc., peut se mesurer, et l'on dispose des moyens nécessaires pour détecter et compenser ces effets perturbateurs ou pour en tenir compte. On peut considérer que les antennes sont un sous-ensemble des circuits électriques pouvant être connectés en série, cependant leur mesure et leur étalonnage peuvent nécessiter le recours à des procédés plus élaborés.

Avec les très grandes antennes utilisées pour émettre des signaux Loran-C, il faut 60 μ s et parfois plus pour que l'énergie établisse le champ de rayonnement à 100 kHz. [Fujimoto et Fujiwara, 1981]. De même, les petites antennes cadres inductives utilisées pour capter ces signaux introduisent des retards liés à l'établissement du signal reçu. Les signaux tels que ceux utilisés dans le système Oméga dans la gamme de 11 à 15 kHz, prennent des dizaines de millisecondes avant de s'établir [Watt, 1967].

A un moindre degré, les antennes utilisées dans les satellites pour émettre des signaux à 150 et 400 MHz introduisent des retards de l'ordre de 25 à 50 ns. Etant donné que ces retards dépendent de facteurs tels que la largeur de bande, la fréquence, la longueur physique et la directivité, les signaux horaires obtenus à partir d'une échelle de temps commune peuvent présenter des décalages ou des retards qui sont à l'origine des principales erreurs dans les transferts de temps.

3. Mesures

Des expériences ont été réalisées pour mesurer les retards dus aux antennes par un procédé de substitution. On choisit une section de câble de longueur comparable à la distance de rayonnement en champ lointain, $2D^2/\lambda$, pour des antennes électriquement petites et l'on détermine le retard de phase total. Le câble est divisé en deux: une extrémité alimente une antenne et l'autre reçoit le signal d'une autre antenne identique. On détermine le retard de phase total de cette combinaison. La différence entre les deux mesures de retard, moins le temps de propagation calculable dans le milieu diélectrique constitué par l'air entre les centres des phases des deux antennes, est le double du retard correspondant à une seule antenne.

Lorsque l'antenne a une très grande ouverture, il arrive qu'on ne puisse pas avoir deux antennes presque identiques suffisamment éloignées l'une de l'autre pour pouvoir procéder à ces mesures. Dans ce cas, le retard peut être mesuré entre deux antennes plus petites presque identiques, puis comparé au retard subi lorsque l'une des petites antennes est remplacée par la grande. Des mesures de ce type ont été effectuées par le Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Californie [Otoshi, 1975; Cha et autres, 1978; Otoshi et autres, 1985].

Dans les expériences menées avec des sondes spatiales, on a mesuré les petites variations du retard des signaux hyperfréquences afin d'obtenir des données sur l'atmosphère des planètes et sur la répartition des matières gazeuses dans l'espace. Ces travaux ont servi de base à des études sur l'effet des discontinuités dans le temps de propagation de groupe sur les lignes de transmission hyperfréquence [Beatty et Otoshi, 1975] et ont conduit également à l'élaboration d'une série de normes applicables au temps de propagation de groupe [Otoshi et Beatty, 1976] pour 15, 30 et 60 ns. Ces normes de retard ont été étalonnées à 2113, 2295 et 8415 MHz, à $\pm 0,1$ ns près.

4. Conclusions

Pour des antennes servant pour la diffusion de signaux horaires de précision, l'étalonnage du retard subi par le signal constitue un nouveau paramètre ou caractéristique qui n'est pas habituellement spécifié ou calculé dans la conception initiale d'une antenne. Antérieurement, des expérimentateurs avaient déjà effectué des mesures de substitution pour déterminer empiriquement les retards introduits par les antennes mais ils n'avaient pas fourni de format normalisé ni d'ensemble de données communes couvrant le spectre radioélectrique. Les familles d'antennes utilisées pour la mesure des champs sont maintenant bien au point et leurs conceptions pourraient être facilement adaptées à la normalisation de l'étalonnage du retard.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEATTY, R. W. et OTOSHI, T. Y. [novembre 1975] Effect of discontinuities on the group delay of a microwave transmission line. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-23, 11, 919-923.
- CHA, A. G., RUSCH, W. V. T. et OTOSCHI, T. Y. [novembre 1978] Microwave delay characteristics of Cassegrainian antennas. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-26, 6, 860-865.
- FUJIMOTO, M. K. et FUJIWARA, K. [1981] Measurements on phase delay of a LORAN-C antenna. *Tokyo Astron. Bull.*, 2^e série, 265, 3015-3020.
- OTOSHI, T. Y. [novembre 1975] A collection of articles on S/X-band experiment zero delay ranging tests. Technical memorandum 33-747, Vol. 1. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, Etats-Unis d'Amérique. Egalement disponibles aux National Technical Information Services (NTIS), Report No. N67-14432, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- OTOSHI, T. Y. et BEATTY, R. W. [décembre 1976] Development and evaluation of a set of group delay standards. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 4, 335-342.
- OTOSHI, T. Y., RUSCH, W. V. T. et YOUNG, L. E. [mai 1985] VLBI collimation-tower technique for time-delay studies of a large ground-station communications antenna. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-33, 5, 549-555.
- WATT, A. D. [1967] *VLF Radio Engineering*, Pergamon Press.

SECTION 7D: CARACTÉRISATION DES SOURCES ET DE LA FORMATION DES ÉCHELLES DE TEMPS

Recommandations et Rapports

RECOMMANDATION 538 *

MESURES DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE ET DE PHASE

(Programme d'études 3B/7)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il convient d'utiliser un langage approprié pour communiquer les caractéristiques de stabilité des sources de fréquences étalon;
- b) que les principaux laboratoires, observatoires, industriels et utilisateurs ont déjà adopté certaines recommandations du Sous-comité sur la stabilité de fréquence du Comité technique sur la fréquence et le temps de la Société de l'IEEE sur l'instrumentation et la mesure;
- c) que les mesures de stabilité de fréquence doivent reposer sur des principes théoriques solides, commodés à appliquer et faciles à interpréter directement;
- d) qu'il est souhaitable d'avoir des mesures de stabilité qui puissent être obtenues avec une instrumentation simple,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que les instabilités aléatoires des signaux de fréquences étalon soient caractérisées par les mesures statistiques $S_y(f)$, $S_\phi(f)$ ou $S_x(f)$, et $\sigma_y(\tau)$ définies ci-dessous:
 - 1.1 dans le domaine fréquentiel, la mesure des instabilités de fréquence normées $y(t)$ est $S_y(f)$; c'est-à-dire la densité spectrale unilatérale ($0 < f < \infty$) des instabilités de fréquence normées de fréquence normées $y(t) = (v(t) - v_0)/v_0$ où $v(t)$ est la fréquence porteuse instantanée et v_0 sa valeur nominale;
 - 1.2 dans le domaine fréquentiel, la mesure des instabilités de phase $\phi(t)$ est $S_\phi(f)$, c'est-à-dire la densité spectrale unilatérale ($0 < f < \infty$) des instabilités de phase $\phi(t)$ à une fréquence de Fourier f ;
 - 1.3 dans le domaine fréquentiel, la mesure des instabilités de phase exprimées en unités de temps (phase-temps) $x(t)$ est $S_x(f)$; c'est-à-dire la densité spectrale unilatérale ($0 < f < \infty$) des instabilités de phase-temps $x(t)$, où $x(t) = \phi(t)/2\pi v_0$; $x(t)$ étant lié à $y(t)$ par $y(t) = dx(t)/dt$;
 - 1.4 les relations entre ces densités spectrales sont données ci-dessous:

$$S_y(f) = \frac{f^2}{v_0^2} S_\phi(f) = 4\pi^2 f^2 S_x(f) \quad (1)$$

Les dimensions de $S_y(f)$, $S_\phi(f)$ et $S_x(f)$ sont respectivement: Hz^{-1} , $\text{Rad}^2\text{Hz}^{-1}$ et s^2Hz^{-1} ;

- 1.5 la mesure des instabilités de fréquence normées $y(t)$ est, dans le domaine temporel, l'écart type à deux échantillons $\sigma_y(\tau)$ défini dans l'Annexe I;
2. que, en présentant des mesures statistiques d'instabilité de fréquence, les phénomènes non aléatoires doivent être reconnus, par exemple:
 - 2.1 toute dépendance temporelle observée dans les mesures statistiques doit être explicitée;
 - 2.2 la méthode de mesure des variations systématiques doit être spécifiée (par exemple: une évaluation de la dérive de fréquence linéaire a été obtenue à partir des coefficients d'une régression linéaire selon la méthode des moindres carrés, avec M mesures de fréquence, chacune étant effectuée pendant une durée τ et avec une largeur de bande f_h spécifiée);
 - 2.3 les sensibilités aux conditions ambiantes doivent être explicitées (par exemple: la dépendance de la fréquence et/ou de la phase en fonction de la température, du champ magnétique, de la pression atmosphérique, etc.);

* Voir le Rapport 580 pour plus de détails.

3. que, en présentant toute mesure de stabilité de fréquence, tous les paramètres pertinents doivent être spécifiés:

- 3.1 méthode de mesure;
- 3.2 caractéristiques du signal de référence;
- 3.3 fréquence nominale ν_0 du signal;
- 3.4 largeur de bande f_h du système de mesure ainsi que la forme de la réponse du filtre passe-bas correspondant;
- 3.5 durée totale de mesure ou le nombre de mesures M ;
- 3.6 techniques de calcul (par exemple, détails sur les fenêtres de retards pour les estimations de densités spectrales à partir des données temporelles, ou l'estimation de l'effet du temps mort dans l'évaluation de l'écart type à deux échantillons $\sigma_y(\tau)$);
- 3.7 intervalle de confiance des estimations;

4. qu'une illustration graphique ou une expression analytique des mesures d'instabilité de fréquence comprenant des intervalles de confiance, doivent être fournies (par exemple: $S_y(f)$, $S_\phi(f)$ et $S_x(f)$ en fonction de f , et/ou $\sigma_y(\tau)$ en fonction de τ).

ANNEXE I

DÉFINITION DE LA MESURE TEMPORELLE

L'écart type à deux échantillons* $\sigma_y(\tau)$ est défini comme suit:

$$\sigma_y(\tau) = \left(\left\langle \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2} \right\rangle \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

où

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt \quad (3)$$

τ est la durée d'intégration avec un temps mort nul entre les mesures successives,

k est un indice tel que $t_{k+1} = t_k + \tau$, et

$\langle \rangle$ représente une moyenne de durée infinie.

A partir d'un nombre fini M de mesures de $\bar{y}_k$, une estimation de l'écart type à deux échantillons s'écrit:

$$\hat{\sigma}_y(\tau) \approx \left[\frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

RAPPORT 364-5

COMPORTEMENT DES GÉNÉRATEURS DE FRÉQUENCES ÉTALON

(Programme d'études 3B/7)

(1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

On a publié ces dernières années les résultats de nombreuses études sur l'instabilité des générateurs de fréquences étalon. Les études théoriques du problème, ainsi que les définitions et les procédés expérimentaux de mesure ont été amplement examinés (voir le Rapport 580, notamment pour les notations).

* Le carré de l'écart type à deux échantillons est la variance à deux échantillons (également connue sous le nom de variance paire ou de variance d'Allan à deux échantillons).

On a montré [IEEE, 1966; Yasuda et Yoshimura, 1964] que le type de bruit présent dans un générateur de fréquences étalon peut être classé selon la loi de la densité spectrale de fréquence ou de phase qu'il produit. Ces densités sont les transformées de Fourier des fonctions d'autocorrélation correspondantes, et des méthodes mathématiques appropriées ont été mises au point pour utiliser ces fonctions [Blackman et Tukey, 1959; Davenport et Root, 1958]. L'effet du bruit dit de «scintillation», dont la variation spectrale est inversement proportionnelle à la fréquence, est particulièrement important dans le fonctionnement à long terme de tous les types d'étalons de fréquence; cet aspect de la question a fait l'objet d'études spéciales [NBS, 1974]. On a aussi montré qu'un spectre inversement proportionnel au carré de la fréquence jouait un grand rôle dans les générateurs de fréquence [Jones et Tryon, 1983].

Dans les étalons atomiques et les oscillateurs à quartz, le bruit thermique et le bruit de grenaille contribuent à l'instabilité à court terme; selon le mécanisme générateur, ces bruits ont une densité spectrale de fréquence constante ou en f^2 . L'importance relative de ces effets par rapport à l'instabilité due au bruit de scintillation ou à d'autres perturbations de la fréquence dépend de l'usage auquel on destine le générateur de fréquences étalon.

Du fait que les étalons de fréquence atomiques commerciaux sont de plus en plus nombreux et qu'on les utilise de plus en plus dans un certain nombre de laboratoires du monde entier pour engendrer des échelles de temps très stables, on a accumulé une grande masse de données sur leurs caractéristiques de stabilité. Une conclusion qui s'en dégage est que les étalons commerciaux de fréquence à jet de césium manifestent de temps à autre des dérives de fréquence systématiques faibles, mais significatives.

L'apparition de ces dérives montre que les phénomènes de fluctuation de ces étalons ne peuvent pas être représentés complètement par la mesure de la stabilité $\sigma_y(\tau)$ de [Kolmogorov, 1941; Malakhov, 1966 et Allan, 1966]. Même si l'on connaît le $\sigma_y(\tau)$ de chaque horloge d'un groupe, il peut être vain, du point de vue statistique, de chercher à en déduire le $\sigma_y(\tau)$ pour la moyenne du groupe. Cela s'applique en particulier aux longs intervalles de temps (supérieurs à une demi-année). On pense que cela provient du comportement non stationnaire de certaines horloges pendant des durées correspondant à une fraction appréciable de leur durée de vie.

Parallèlement, on a montré que la majorité de ces sauts de fréquence peut être modélisée par un processus de modulation de fréquence à trajet aléatoire et que l'on peut utiliser $\sigma_y(\tau)$ pour identifier le processus en $\tau^{1/2}$ et son ampleur [Percival, 1976; Barnes et autres, 1982; Jones et Tryon, 1983].

2. Etalons de fréquence à jet de césium

Plusieurs laboratoires (PTB [Becker et Hetzel, 1973], BIH [Guinot, 1974], USNO [Winkler et autres, 1970]) ont entrepris une étude des effets systématiques se manifestant dans les étalons de fréquence commerciaux à jet de césium. Il n'est pas prouvé que les étalons commerciaux au césium présentent, dans leur ensemble, une dérive dans un seul sens au niveau 10^{-14} . On a mis au point [Becker et Hetzel, 1973] des méthodes pour surveiller et ajuster périodiquement les champs magnétiques dans ces étalons commerciaux. On a constaté que ces méthodes améliorent la stabilité d'une horloge particulièrement pendant les six premiers mois de sa vie. On a mis au point une technique d'évaluation de l'exactitude d'un tube à jet de césium qui s'applique aux étalons, qu'ils soient du type de laboratoire ou du type commercial [Hellwig et autres, 1973].

Les étalons primaires de fréquence de laboratoire à jet de césium sont situés au PTB en République fédérale d'Allemagne [Becker, 1976], au NCR au Canada [Mungall et autres, 1976], au NBS aux Etats-Unis d'Amérique [Wineland et autres, 1976], au VNIIFTRI en URSS [Iljin et autres, 1976], au NRLM et au RRL au Japon [Nakadan et Koga, 1985; Nakagiri et autres, 1984] et au NIM en République populaire de Chine. On a évalué la plupart des paramètres dont dépend leur fréquence de sortie, c'est-à-dire que l'on a effectué des expériences et des études théoriques dont on a tiré des renseignements sur les facteurs à cause desquels la fréquence de sortie n'est pas égale à la fréquence de résonance de l'atome en l'absence de perturbation. L'exactitude qui résulte alors d'une analyse des données est meilleure que 1×10^{-13} pour chacun de ces trois étalons de laboratoire. Il ressort de comparaisons effectuées à l'échelon international entre les trois appareils, la référence commune étant le TAI, qu'ils manifestent une concordance à 2×10^{-13} près (variation crête-à-crête). Les mesures faites en 1976 ont montré d'autre part que la fréquence du TAI est trop élevée d'environ 1×10^{-12} par rapport à la définition de la seconde. Au 1^{er} janvier 1977 a été effectué un ajustement par bond du TAI de 1×10^{-12} , de sorte que ce décalage a disparu. Il était dû au fait que le TAI avait été construit par le Bureau international de l'heure de manière telle que son uniformité soit maximale, ce qui conservait ainsi raisonnablement le rythme adopté pour le TAI au 1^{er} janvier 1969 avec la contribution d'un nombre limité d'horloges. On a encore fait d'autres études de la stabilité à long terme de l'échelle de temps TAI en se servant d'étalons commerciaux au césium et en prenant pour référence des étalons primaires. Les mesures faites par le PTB de 1969 à 1973 ont montré que la fréquence du TAI avait diminué en moyenne de 1×10^{-13} chaque année [Becker, 1973]. D'autres mesures montrent que cette dérive s'est poursuivie jusqu'à la fin de 1977.

Quatre horloges primaires à long jet de césium fonctionnent actuellement au NRC. CsV, la première horloge primaire à long jet, est entrée en service en mai 1975. L'évaluation de précision, faite à intervalles de 6 à 12 mois, apporte à l'échelle des temps des erreurs négligeables et a régulièrement indiqué une précision meilleure que 1×10^{-13} [Mungall et Costain, 1977; Mungall, 1978]. Trois nouvelles horloges plus petites, CsVI A, B et C, construites en 1977 et 1978 et utilisées comme horloges secondaires en 1979, sont entrées en service comme horloges primaires en décembre 1979 [Mungall et autres, 1980, 1981; Mungall et Costain, 1983]. Ces horloges ont

une limite de précision de l'ordre de $1,5 \times 10^{-13}$ et nécessitent des évaluations plus fréquentes de la précision pour le maintien de cette limite. Les corrections systématiques pour tenir compte de l'effet d'inversion du champ magnétique et du déphasage de la cavité ont tendance à être moins stables que dans le cas de CsV; toutefois, les réévaluations, effectuées chaque fois que nécessaire, ont permis de maintenir la concordance avec CsV à des valeurs meilleures que 1×10^{-13} . L'instabilité de fréquence à long terme des quatre horloges est de l'ordre de 1×10^{-14} pour des périodes d'environ 24 heures; elle a atteint des valeurs égales à plusieurs 10^{-15} sur des périodes de plusieurs semaines ou de plusieurs mois. Depuis janvier 1980, des rapports réguliers sont fournis au BIH sur le fonctionnement de ces horloges.

Durant la période 1977-1983, la différence entre les échelles de temps TA(NRC) et TA(PTB) est demeurée constante à $\pm 1,2 \mu\text{s}$ près. Les fréquences des étalons primaires NRC CsV et PTB Cs1, dont on déduit directement les échelles de temps respectives, concordaient à 3×10^{-14} (moyenne annuelle).

On a repris l'étude, tant théorique qu'expérimentale, de l'effet Millman dans l'horloge à jet de césium. On a constaté que cet effet n'existe pas dans le cas des transitions $\Delta M_F = 0$. Lorsque l'on utilise de telles transitions pour déterminer le champ magnétique statique dans l'horloge, l'incertitude qui en résulte sur la fréquence de celle-ci est inférieure à 2×10^{-14} [Vanier et autres, 1984].

On a fait appel à une méthode nouvelle pour déterminer la distribution des vitesses des atomes de césium. Cette méthode, fondée sur la variation de la hauteur du pic de Ramsey en fonction de la puissance d'interrogation RF, permet de connaître le décalage de fréquence Doppler du second ordre avec une incertitude inférieure à 1×10^{-14} [Boulanger et autres, 1984].

L'étalon de temps et de fréquence à jet de césium Cs1 du PTB fonctionne en permanence comme horloge primaire depuis la mi-1978, alors qu'il était jusqu'alors mis en œuvre tous les trois mois environ pour contrôler la fréquence de l'échelle de temps atomique produite par les horloges atomiques à jet de césium de type commercial. Cette horloge primaire contribue de manière directe à la formation du temps atomique international (TAI) [Becker, 1979]. La valeur quadratique moyenne des incertitudes dues aux différentes corrections donne pour Cs1 une incertitude relative de 1×10^{-14} pour les valeurs de la fréquence envisagées sur 80 jours [Becker, 1974; Becker, 1979]. L'instabilité relative moyenne de l'étalon de fréquence établie sur 80 jours est évaluée à $6,4 \times 10^{-15}$.

Le NBS a utilisé une série d'étalons primaires au césium du type de laboratoire, pour sa référence de fréquence de base depuis 1960. Les versions actuelles désignées par NBS-6 et NBS-4 présentent des régions d'interaction allant jusqu'à 3,6 m, une inversion de jets et d'autres caractéristiques réalisées pour assurer régulièrement une réévaluation complète des limites d'exactitude. Les évaluations annuelles de l'exactitude donnent des incertitudes de moins de 10^{-13} [Wineland et autres, 1976].

En République populaire de Chine, deux étalons primaires au césium de type de laboratoire, de distance d'interaction de 3,8 m à inversion de jets, Cs2 et Cs3, ont été évalués et mesurés à plusieurs reprises de 1977 à 1980. Les incertitudes totales (en valeur quadratique moyenne) sont respectivement de $4,1 \times 10^{-13}$ et $4,5 \times 10^{-13}$, mais, en raison de certaines limitations dans les conditions d'exploitation, il vaut mieux donner une précision de 8×10^{-13} pour les deux étalons.

En URSS, l'étalon national de temps et de fréquence comprend deux étalons primaires au césium (MTs-1 et MTs-2) respectivement de longueur de 63 cm et de 100 cm. MTs-1 est en exploitation depuis 1975 [Iljin et autres, 1976] et MTs-2 depuis 1980 [Abashev et autres, 1980]. Des améliorations récentes de ces étalons donnent des exactitudes de 1×10^{-13} avec une incertitude de fréquence de $1,5 \times 10^{-13}$ pour MTs-1 et de 1×10^{-13} pour MTs-2. La concordance entre les fréquences des deux étalons est assurée à $1,5 \times 10^{-13}$ près [Elkine et autres, 1983].

L'étalon de temps et de fréquence à jet de césium, de type laboratoire, du NRLM est en service depuis 1976. Son exactitude est estimée à $2,2 \times 10^{-13}$ [Nakadan et Koga, 1985]. Au cours des essais, on a appliqué une méthode de mesure améliorée de l'effet Zeeman, qui consiste à utiliser une paire de transitions sigma ayant la même valeur absolue du nombre quantique [Koga, 1984]. L'étalon de fréquence primaire à jet de césium Cs1, de type laboratoire, des RRL comporte un système de focalisation avec aimant à six pôles et une cavité de Ramsey de 55 cm utilisant un transducteur ligne coaxiale — guide d'onde à l'intérieur de l'écran magnétique [Kobayashi et autres, 1978]. Les RRL ont notifié au BIH les données sur l'évaluation de l'exactitude. L'incertitude totale est de $1,1 \times 10^{-13}$ [Nakagiri et autres, 1984].

Le pompage optique avec un laser accordable monomode et une détection de la résonance hyperfréquence au moyen de la fluorescence induite par le même laser ont été introduits dans un étalon expérimental [Arditi et Picque, 1980]. Un oscillateur a été synchronisé avec ce dispositif pour assurer une exactitude de quelque 10^{-11} .

On a effectué des travaux théoriques au sujet des problèmes de pompage optique d'étalons au césium. Des études se sont poursuivies sur les déplacements de fréquences provoqués par la lumière [Brillet, 1981; De Clercq et Cerez, 1983] ainsi que sur l'utilisation efficace de tous les niveaux hyperfins sous certaines conditions de pompage optique [Avila et autres, 1985]. On a construit une version de laboratoire à petite échelle d'un étalon au césium à pompage optique. Les premiers résultats indiquent que l'instabilité est $\sigma_y(\tau) = 1 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$. Un grand modèle de laboratoire est en cours de construction [Derbyshire et autres, 1985].

3. Étalons de fréquences à hydrogène

Dans des domaines de durées d'intégration allant jusqu'à environ 10^5 s, les caractéristiques des masers actifs sont bien meilleures que celles des dispositifs à césium. Un maser passif peut assurer des caractéristiques de fréquence meilleures que les dispositifs au césium pour des durées d'intégration comprises entre 1000 et 100 000 s [Walls et Persson, 1984]. Les masers à hydrogène ne sont pas des étalons primaires en raison de l'effet de paroi qu'on ne peut contrôler [Vanier et autres, 1975; Vanier et Larouche, 1978].

Les travaux relatifs aux mesures de l'effet de paroi et à sa réduction en vue d'améliorer l'exactitude d'un maser ont été effectués par un certain nombre de laboratoires. Mesurée par rapport au temps atomique international (TAI), la fréquence des masers du NRC a diminué depuis 1971. Établies sur la période 1975-1979, les mesures les plus précises ont fait ressortir une variation d'environ 4×10^{-13} par an et, sur l'ensemble de cette période, une variation totale de $1,7 \times 10^{-12}$ [Morris, 1978]. Toutefois, cette dérive n'a pas été confirmée par tous les laboratoires. L'utilisation d'un ballon de stockage à volume variable [Brenner, 1969 et 1970; Debely, 1970; Uzgiris et Ramsey, 1970; Reinhardt, 1973; Vanier et autres, 1975; Vessot et autres, 1971] et la sélection de la température de fonctionnement qu'il faut obtenir pour annuler l'effet de paroi (approximativement 100°C) [Vessot et autres, 1971; Zitzewitz et Ramsey, 1971; Vessot et Levine, 1970], sont des possibilités qui ont été examinées. La possibilité d'atteindre une précision de 1×10^{-14} est plus ou moins confirmée par la découverte récente d'un effet par échange de spins anormal ainsi que d'un effet de non-homogénéité magnétique [Crampton et Wang, 1974] et par la mise au point de moyens permettant la correction de ces effets [Crampton et Wang, 1974; Reinhardt et Peters, 1975]. Les propriétés métrologiques de deux masers à hydrogène ont été étudiées en détail [Petit et autres, 1974]. Une instabilité de fréquence de 3×10^{-13} pour $\tau \approx 10^3$ s et de 2×10^{-14} pour $\tau = 5$ jours a été obtenue [Petit et autres, 1975]. L'annulation du déphasage moyen par collision sur un revêtement en FEP 120, au voisinage de 90°C , a été vérifiée [Petit et autres, 1975]. L'estimation théorique du déplacement de fréquence par échange de spins a été confirmée expérimentalement [Desaintfuscien et autres, 1975]. Elle est très utile à la détermination précise des déplacements de fréquence résiduels qui ont été mis en évidence par Crampton et autres, [1976]. Une exactitude de 6×10^{-13} a été obtenue sur un maser à hydrogène équipé d'un ballon de stockage à deux compartiments coaxiaux revêtus de téflon [Petit et autres, 1980].

L'effet d'instabilité de la cavité est probablement la cause la plus importante des instabilités à long terme (1 jour et plus) des masers à hydrogène. On a mis au point et utilisé des systèmes d'accord de la cavité dans des masers actifs [Peters et autres, 1968; Vessot et Levine, 1970] aussi bien que dans des masers passifs [Hellwig et Bell, 1972; Walls et Hellwig, 1976]. Des couples de masers auto-accordés l'un par rapport à l'autre peuvent conserver une stabilité de 1 à 2×10^{-14} pendant une durée allant jusqu'à 7 jours [Petit et autres, 1975; Morris et Nakagiri, 1976].

La stabilité dans le temps d'un petit maser passif à hydrogène mis au point par le NBS [Walls et Hellwig, 1976] a été récemment comparée à celle de l'UTC (NBS). Les mesures ont montré que ces deux dispositifs avaient l'un et l'autre une stabilité d'environ 1,2 ns/jour.

L'instabilité en fréquence mesurée d'un petit maser passif était $\sigma_y(\tau) = 1,4 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ pour $\tau \leq$ un jour et de $5 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$ pour $\tau = 16$ jours, et ce pendant 64 jours consécutifs d'observation. Aucune dérive dans les limites d'une incertitude de $\pm 3 \times 10^{-16}$ /jour n'a été constatée, par rapport à l'étalon au césium du NBS. On n'a pas observé non plus de scintillation [Walls et Persson, 1984]. Les premières mesures de stabilité laissent entrevoir de grandes possibilités pour l'emploi du maser passif en tant qu'horloge. Un petit maser passif à hydrogène sert maintenant à l'établissement de l'échelle du temps de référence du NBS. Ces travaux ont montré que l'effet de paroi est constant dans les limites d'une incertitude de 3×10^{-16} par jour, moyenne établie sur 64 jours et que la dérive due à la cavité peut également être maintenue à ce niveau.

Le bruit d'amplitude des masers à hydrogène et à rubidium a été analysé expérimentalement [Lesage et autres, 1980]. La stabilité de fréquence ultime des masers à hydrogène fonctionnant en mode passif, et qui dépend principalement de l'absence de bruit d'amplitude, a été déterminée [Lesage et autres, 1979]. L'effet sur la stabilité de fréquence d'une réaction électronique accroissant le facteur de qualité de la cavité résonnante d'un maser à hydrogène a été étudié théoriquement et expérimentalement [Tetu et autres, 1981]. On a montré que la stabilité de fréquence de masers à hydrogène compacts fonctionnant en mode actif devrait être légèrement meilleure qu'en mode passif [Audoin et autres, 1981].

Un programme d'évaluation [NASA, 1983] pour déterminer les caractéristiques de deux types différents de masers a été exécuté par le Jet Propulsion Laboratory sous les directives de la NASA. Les mesures ont donné pour la sensibilité magnétique des masers, des valeurs de 8 à $30 \times 10^{-10}/\text{T}$, pour la sensibilité à la température, des valeurs de $7,5$ à $15 \times 10^{-15}/\text{K}$ et pour la sensibilité à la pression, des valeurs de $1,5$ à $3 \times 10^{-15}/\text{kPa}$. L'instabilité de fréquence a été de $2,0 \times 10^{-14}$ sur 10 s, de 9 à 21×10^{-16} sur 4000 s et de 7 à 8×10^{-15} sur 10^6 s. Les masers ont présenté une dérive de 5 à 10×10^{-15} par jour. Par la suite, les masers VLG-11 livrés à l'USNO ont utilisé des méthodes améliorées de contact mécanique des joints de la cavité maser et cela a permis une dérive inférieure à $2,5 \times 10^{-15}$ par jour [Vessot et autres, 1984].

Les derniers essais du maser NR de la NASA, effectués à la Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, ont indiqué une instabilité de 4×10^{-15} sur 10^5 s lorsque la dérive était supprimée. Le taux de dérive était constant sur une année avec une incertitude de $\pm 5 \times 10^{-16}$ par jour [Rueger, 1981].

Des travaux faits en URSS sur des masers à hydrogène ont eu pour objet de porter la stabilité à long terme de la fréquence à 1×10^{-14} et d'améliorer la fiabilité de fonctionnement de ces masers. L'utilisation d'une méthode d'inversion des densités de population des sous-niveaux de Zeeman des atomes entrant dans le ballon [Zhestkova et Elkin, 1979] a permis de réduire le déplacement provoqué par l'inhomogénéité du champ magnétique permanent dans la région du ballon de stockage dans un rapport de plusieurs dizaines et ainsi, d'abaisser sa valeur à $(1-3) \times 10^{-14}$ [Elkin et autres, 1980]. La détermination du déplacement de fréquence du maser à hydrogène accordé, dû aux processus d'échange de spin [Elkin et Zhestkova, 1979], a montré qu'une nouvelle augmentation de la stabilité de fréquence à long terme du maser à hydrogène exige un contrôle strict de la stabilité du temps de relaxation des atomes rayonnant dans le ballon. Un obstacle encore plus sérieux à une nouvelle élévation de la stabilité de fréquence sur de longs temps d'intégration est la dérive de fréquence des masers à hydrogène, causée par une variation de l'effet de paroi. Le changement de fréquence du maser à hydrogène accordé en permanence, de 1×10^{-14} par mois, est assez caractéristique [Gaïguerov et autres, 1982] et peut être dû à diverses causes liées à des modifications du revêtement du ballon, y compris sa cristallisation ou sa contamination. Des recherches en vue d'améliorer la reproductibilité de l'effet de paroi sont faites dans deux directions: utilisation d'un ballon de stockage flexible avec sélection de la température donnant un déplacement nul et recherche de nouveaux matériaux pour le revêtement du ballon [Demidov et autres, 1978]. A l'heure actuelle, les étalons de fréquence à hydrogène sont les principaux moyens de maintien de l'étalon national d'échelle de temps et d'un certain nombre d'étalons secondaires de temps et de fréquence en URSS.

Les Radio Research Laboratories (RRL) du Japon poursuivent depuis 1966 des travaux sur les masers à hydrogène [Saburi et autres, 1974; Ohta et autres, 1974]. On est parvenu à améliorer les performances de ces masers en appliquant la méthode de sélection d'un état unique, dite méthode de Majorana. Pour opérer cette sélection, on recourt à l'application d'un champ magnétique réversible et à une double focalisation. On parvient ainsi à éliminer environ 90% des atomes indésirables dans le sous-état de Zeeman et à réduire le déplacement dû à la non-homogénéité magnétique à environ $1/10^6$ du déplacement observé dans la sélection d'état classique [Urabe et autres, 1984]. On poursuit actuellement les travaux portant sur les masers auto-accordés munis du nouveau sélecteur d'état et visant à les utiliser en tant qu'horloges. Les RRL ont également réalisé deux masers à hydrogène utilisables sur le terrain [Morikawa et autres, 1984] en tant qu'étalons de temps et de fréquence du système VLBI K-3 qui a été conçu pour l'expérience VLBI commune aux RRL et à la NASA [VLBI Research Development Group, RRL, 1984]. La stabilité de fréquence mesurée est de $2,4 \times 10^{-15}$ pour une durée de mesure de 830 s et de $1,4 \times 10^{-14}$ pour 10^5 s. La sensibilité à la température ambiante est de $2,3 \times 10^{-14}/K$ et la sensibilité au champ magnétique extérieur est de $2,5 \times 10^{-9}/T$, ce qui est suffisant dans les conditions géomagnétiques ordinaires. Cependant, dans les stations VLBI, le système de poursuite de l'antenne peut perturber gravement le champ magnétique extérieur, d'où la nécessité d'un contrôle minutieux du champ magnétique statique.

4. Oscillateur à cavité supraconductrice

Les données relatives à l'oscillateur à cavité supraconductrice méritent peut-être une attention spéciale car ce dispositif n'est pas encore aussi connu que les autres types d'étalon de fréquence à oscillateur à haute stabilité. La réalisation de cet oscillateur fait apparaître une caractéristique de stabilité qui dépasse celle de tout autre oscillateur connu [Jiménez et Septier, 1973; Turneaure et Stein, 1975]. On a pu, dans des conditions particulièrement favorables, observer des instabilités de 6×10^{-16} pour des durées d'intégration de l'ordre de quelques centaines de secondes [Stein, 1975]. Il semble possible d'adapter au domaine commercial l'oscillateur à cavité supraconductrice étant donné la fiabilité des cryostats à basse température; ce serait le meilleur oscillateur pour des stabilités à moyen terme (temps d'intégration allant jusqu'à des milliers de secondes). Ce modèle pourrait présenter de l'intérêt pour des utilisations spéciales telles que l'interférométrie à longue base et la production d'hyperfréquences et de fréquences plus élevées de grande pureté spectrale. Alors que les premières réalisations ont fait preuve de sensibilités excessives à l'égard de l'environnement, ce qui pourrait aller à l'encontre d'une large diffusion en dépit de leur robustesse et de leur faible encombrement, les dernières réalisations permettent de prévoir des réductions importantes des effets de l'environnement [Dicks et Strayer, 1984].

Les Radio Research Laboratories (RRL) du Japon étudient depuis 1976 un oscillateur stabilisé par cavité supraconductrice (SCO) fonctionnant sur la fréquence 9,2 GHz. A partir de la mesure du rapport signal/bruit d'un SCO et d'un facteur de qualité de $2,9 \times 10^8$ pour la cavité, on a calculé une stabilité de $1,1 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$. Cependant, la fluctuation de fréquence du SCO due à la déformation mécanique de la cavité sous l'effet de l'inclinaison et des vibrations du vase de Dewar paraît importante. La sensibilité à l'accélération mesurée de la cavité supraconductrice a été de $6,5 \times 10^{-8}/g$ pour les fréquences de vibration inférieures à 80 Hz [Komiya, 1985].

5. Dispositifs à stockage d'ions

Un dispositif d'ions $^{199}\text{Hg}^+$ captifs a montré une instabilité de $\sigma_y(\tau) = 3,6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ pour $10 \text{ s} < \tau < 3500 \text{ s}$ [Jardino et autres, 1980]. On a construit un certain nombre de ces dispositifs qui laissent apparaître une instabilité de $\sigma_y(\tau) = 1,2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ [Cutler et autres, 1981]. Un étalon à ions $^9\text{Be}^+$ captifs utilisant un refroidissement laser et un pompage optique, à double résonance, présente une stabilité égale à celle d'un étalon commercial au césium [Bollinger et autres, 1984]. Des études font apparaître que la principale limitation de cette technique est l'incertitude du second ordre Doppler due à la rotation du nuage d'ions qui n'est pas touché par le refroidissement.

Un nouveau concept d'étalon de fréquence fondé sur le «refroidissement par sympathie» fait actuellement l'objet de recherches et d'expérimentations. Dans le refroidissement par sympathie, un type d'ion est refroidi par couplage de Coulomb avec un autre type d'ion refroidi par laser. Cette technique, proposée il y a quelques années au NBS où elle était appliquée en démonstration sur des isotopes Mg^+ , est envisagée aujourd'hui pour l'étalon au mercure. Elle offre l'avantage que les ions servant «d'horloge» peuvent être refroidis en permanence, car les fluctuations alternatives de Stark dues au rayonnement de refroidissement peuvent être réduites jusqu'à une valeur négligeable.

6. Comportement des divers dispositifs

Le type d'étalon de fréquence choisi pour servir de référence de fréquence optimale pour une application donnée dépend, au moins en partie, de la durée pendant laquelle la moyenne est calculée. La Fig. 1 présente certaines données relatives à l'instabilité mesurée en fonction de la durée d'intégration et ce, pour plusieurs étalons de fréquence de types différents. La dérive de fréquence n'est pas représentée sur ces courbes. On n'a pas cherché à prolonger les courbes au-delà des durées indiquées dans la figure, étant donné que, pour la plupart des appareils, on ne dispose pas de données à long terme suffisantes.

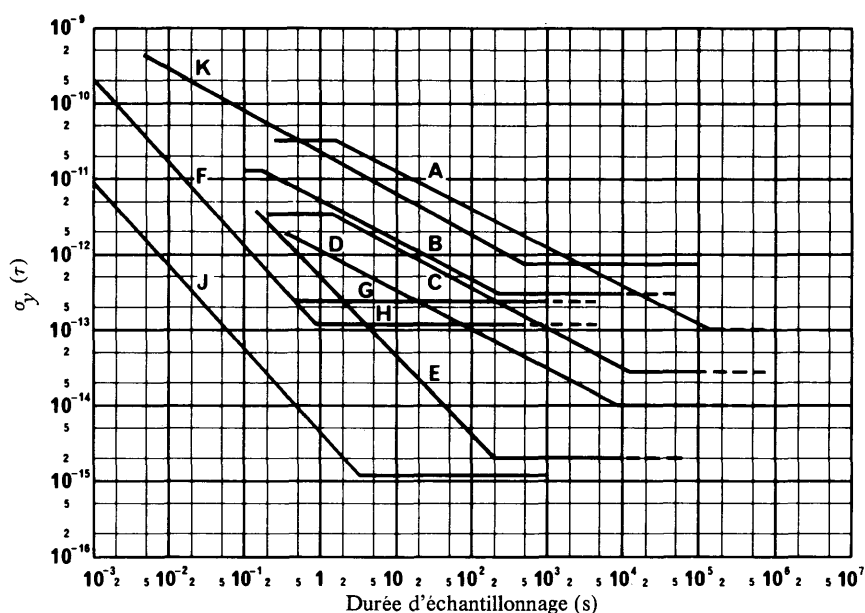


FIGURE 1 – Instabilités types déduites de mesures effectuées sur plusieurs types d'étalons. Les données sont extraites de publications et de spécifications

- | | |
|--|---|
| A : étalon commercial à jet de césium | F : maser à rubidium, oscillateur à quartz ($f_h = 1$ kHz) |
| B : étalon commercial à cellule de gaz de rubidium | G : oscillateur à quartz |
| C : étalon commercial au césium de haute précision | H : maser au rubidium |
| D : étalon de laboratoire au césium | J : oscillateur à cavité supraconductrice ($f_h = 10$ kHz) |
| E : maser à hydrogène ($f_h = 10$ Hz) | K : cellule à gaz de césium |

La Fig. 1 montre que, pour des temps d'échantillonnage courts ($\tau < 1$ s), les oscillateurs à quartz et les oscillateurs à cavité supraconductrice, ou les masers au rubidium sont les plus stables. A moyen terme ($1 \text{ s} < \tau < 10\,000$ s), le maser à hydrogène et l'oscillateur à cavité supraconductrice ont une stabilité supérieure à celle de tout autre étalon actuellement disponible. Sur la Fig. 2 pour le domaine temporel et sur la Fig. 3 pour le domaine fréquentiel, on a représenté les résultats de mesures d'instabilité pour divers étalons de fréquence atomiques couramment disponibles. Les courbes de $S_y(f)$ sont toutes normées pour $\nu_0 = 5$ MHz et $f_h = 10$ kHz, sauf dans le cas du maser à hydrogène pour lequel $f_h = 10$ Hz. L'oscillateur à quartz avait été choisi parmi des appareils conformes à l'état actuel de la technique. Les étalons de fréquence atomiques passifs servent à montrer l'influence de constantes de temps d'une boucle d'asservissement comprises entre 60 s et 300 ms. Les étalons à jet de césium sont actuellement ceux qui ont la meilleure stabilité à long terme ($\tau > 10\,000$ s) bien que les étalons passifs à hydrogène puissent présenter de meilleures caractéristiques dans le proche avenir. Les étalons à cellule de gaz de rubidium et de césium ne sont jamais supérieurs, quelle que soit la durée pendant laquelle la moyenne est calculée; toutefois, comme l'indique le Tableau I, ils présentent une bonne stabilité, à quoi s'ajoutent un faible encombrement et un prix avantageux [Rovera et autres, 1976; Rovera et Beverini, 1977].

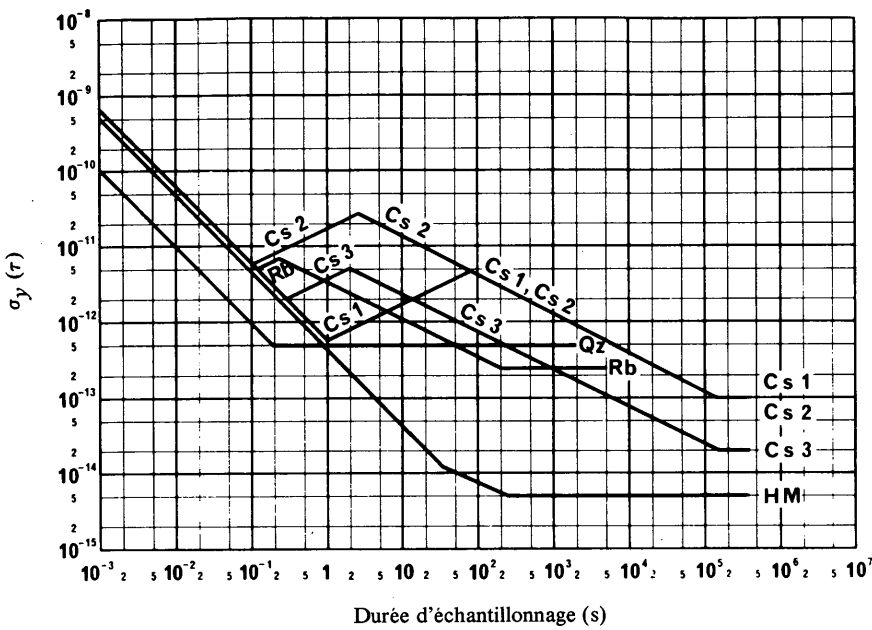


FIGURE 2 – Mesure de l'instabilité de fréquence d'étalons de fréquence atomiques types et d'un oscillateur à quartz spécialement choisi (stabilité dans le temps)

OSC	Constante de temps de la boucle d'asservissement (s)	f _h (kHz)
Cs 1: (grande constante de temps), jet de césium	60	10
Cs 2: (petite constante de temps), jet de césium	2	10
Cs 3: (constante haute performance), jet de césium	2	10
Rb: maser au rubidium	0,3	10
Qz: oscillateur à quartz	—	10
HM: maser à hydrogène	—	0,01

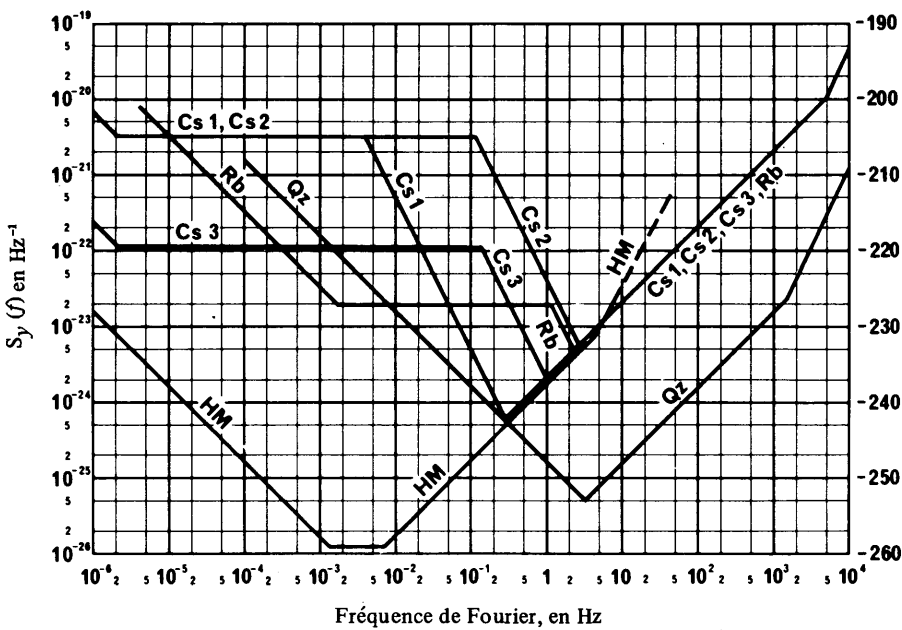


FIGURE 3 – Mesure de l'instabilité de fréquence d'étalons de fréquence atomiques types et d'un oscillateur à quartz spécialement choisi (stabilité en fonction de la fréquence)

OSC	f _h (Hz)
Cs 1: (grande constante de temps), jet de césium	10 ⁴
Cs 2: (petite constante de temps), jet de césium	10 ⁴
Cs 3: (constante haute performance), jet de césium	10 ⁴
Rb: maser au rubidium	10 ⁴
Qz: oscillateur à quartz	10 ⁴
HM: maser à hydrogène	10

Une instabilité de fréquence de 6×10^{-14} sur 128 s a été obtenue avec un quartz à électrodes non adhérentes en mode passif [Stein et autres, 1978; Besson et Peier, 1980].

L'IEN (Istituto Elettrotecnico Nazionale) effectue depuis plusieurs années des travaux de recherche dans la gamme submillimétrique au moyen d'atomes de magnésium [Strumia, 1972]. Ces travaux pourraient éventuellement se traduire par un étalon primaire d'une précision de l'ordre de 10^{-13} [De Marchi et autres, 1983]. Au début de 1983, des résonances ont été observées [Godone et autres, 1983; Bava et autres, 1983] aux fréquences 601 277 160 kHz et 601 278 866 kHz, respectivement pour ^{24}Mg et ^{26}Mg . L'incertitude sur la détermination de fréquence atteinte jusqu'ici est de l'ordre de ± 4 kHz (7×10^{-9}); des travaux sont en cours pour évaluer la possibilité d'obtenir un étalon de fréquence de laboratoire fondé sur ce dispositif.

7. Application aux systèmes

Le Tableau II présente à la fois les données de stabilité et les données d'exploitation tout en indiquant d'autres caractéristiques des appareils. Pour chaque appareil figurant au Tableau II, on peut considérer que les données sont réalisables dans un seul et même modèle. Les valeurs indiquées au Tableau II sont basées sur un choix de combinaisons actuellement disponibles; toutefois, d'autres combinaisons sont également possibles. Les valeurs ont été choisies en fonction des applications aux aéronefs et aux engins spatiaux.

Les Tableaux I et II et la Fig. 1 montrent que, dans le domaine des étalons de fréquence atomiques, le choix doit être le résultat d'une optimisation entre les différentes possibilités: coût, volume et caractéristiques requises. Lorsqu'on étudie l'application d'oscillateurs de précision à un système, il convient tout d'abord de déterminer la stabilité requise de l'appareil; on étudiera ensuite les conditions d'environnement dans lequel l'étalon doit fonctionner et, enfin, la disponibilité, les dimensions, le poids, le coût et les autres caractéristiques qui conviennent, de l'appareil. Il arrive parfois qu'un ingénieur chargé de réaliser un système se rende compte que l'étalon possédant toutes les caractéristiques nécessaires n'existe pas sur le marché. Dans ce cas, il a le choix entre trois solutions: soit modifier les paramètres de son système de manière à pouvoir se contenter d'un modèle d'étalon disponible, soit choisir une combinaison de ces étalons qui réponde à ses besoins, soit enfin lancer un programme de recherche pour mettre au point l'étalon qui lui est nécessaire. Il est important pour lui de se rendre compte qu'une combinaison des étalons disponibles peut répondre à ses besoins: supposons, par exemple, qu'un système donné exige une très bonne stabilité à long terme et d'excellentes caractéristiques d'horloge, mais en même temps une très grande pureté spectrale, c'est-à-dire une très bonne stabilité à court terme. Supposons par ailleurs qu'il n'existe aucune restriction du point de vue du prix, du poids ou des dimensions. Une combinaison optimale pour ce cas consisterait à mettre en œuvre un oscillateur à quartz associé à un étalon de fréquence à hydrogène ou à jet de césium. Cette notion de systèmes est un outil très puissant au stade de la conception; on peut la mettre en œuvre techniquement sans compromettre la qualité de fonctionnement des composants individuels. Les seules véritables restrictions sont peut-être l'encombrement et le prix. Il peut arriver que, la plupart des étalons de fréquence étant déjà des combinaisons de plusieurs technologies (par exemple, un étalon au césium comprend un oscillateur à quartz et il en est de même pour un maser à hydrogène), une modification peu importante comme le remplacement de l'oscillateur à quartz existant par un oscillateur à quartz de meilleure qualité et une légère modification des constantes de temps du système répondent aux besoins de l'ingénieur chargé de réaliser le système.

TABLEAU 1* – Performances types et caractéristiques physiques pratiques des principaux étalons de fréquence atomiques

Étalon de fréquence	Reproductibilité intrinsèque	Incertitude	Stabilité			Volume (dm ³)	Masse de l'appareil (kg)	Consommation (W)	Disponibilité dans le commerce	Prix estimé en 1977 (x 1000 \$)
			A court terme (1 s)	Palier de scintillation	Dérive annuelle					
Maser à ammoniac	5×10^{-11}	5×10^{-11}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-10}	50	50	50	Non	40
Maser de laboratoire à hydrogène	10^{-12}	10^{-12}	5×10^{-13}	$2-5 \times 10^{-15}$	$< 10^{-13}$	1000	250	100	Non	250
Maser à hydrogène (petites dimensions)	10^{-12}	10^{-12}	5×10^{-13}	5×10^{-15}		100	45	30	Non	250
Maser à hydrogène (passif)	10^{-12}	10^{-12}	2×10^{-12}	$< 2 \times 10^{-15}$	$< 2 \times 10^{-13} *$	1000	250	100	Non	250
Maser au rubidium 87	(¹)	(¹)	10^{-13}	10^{-13}		30	30	50	Non	100
Étalon de laboratoire au césium	10^{-13}	1×10^{-13}	10^{-12}	10^{-14}	$< 10^{-13}$	2000	500	100	Non	500
Étalon commercial au césium (²)	5×10^{-12}	7×10^{-12}	5×10^{-12}	5×10^{-14}	$< 10^{-12}$	20	30	30	Oui	25
Cellule au rubidium (hautes performances)	(¹)	(¹)	7×10^{-12}	4×10^{-13}	10^{-10}	20	30	30	Oui	5-10
Cellule au rubidium (simplifiée)	(¹)	(¹)	10^{-11}	5×10^{-13}	10^{-9}	2	2	15	Oui	4
Cavité supraconductrice	(¹)	(¹)	10^{-14}	6×10^{-16}	(³)	2000	250	1000	Non	100
Laser stabilisé sur l'iode 127 (petites dimensions)	10^{-11}	10^{-11}	10^{-11}	10^{-12}		30	40	50	Non	200
Laser stabilisé sur le méthane (petites dimensions)	10^{-11}	10^{-11}	3×10^{-13}	3×10^{-14}		30	40	50	Non	100
Laser stabilisé sur le gaz carbonique	10^{-10}	10^{-10}	5×10^{-13}	10^{-13}		60	100	200	Non	100

* Sur la base de la référence: Audoin et Vanier [1976].

(¹) La spécification ne s'applique pas.(²) Appareil à haute performance.(³) Renseignement non disponible.

TABLEAU II – Choix d'appareils disponibles. D'autres combinaisons de valeurs sont également possibles. Les valeurs ont été choisies en prévision d'une éventuelle application aux aéronefs et engins spatiaux

Appareil	Carac- téris- tique	Coût rela- tif	Volume(*) (dm ³)	Masse (kg)	Consom- mation (W)	Stabilité			Retour à la fréquence précédente ⁽²⁾	Environnement			
						Sur une seconde	Palier	Dérive (par jour)		Tempér. (par K)	Accél. (par g)	Pression (par mbar)	Champ magnétique (par A/m)
Quartz		0,1	1	0,5	3	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	—	—
Rb (cellule à gaz)		0,5	1	1,0	15	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹² (¹)	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹² (³)	10 ⁻¹³	8 × 10 ⁻⁶
Cesium (tube)		1,0	10	20,0	30	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴ (¹)	10 ⁻¹²	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁵	8 × 10 ⁻⁷
H (maser)		8,0	100	40,0	20	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁴ (¹)	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹² (³)	10 ⁻¹⁵	8 × 10 ⁻⁷

(¹) Ces valeurs ont été observées sur certains appareils mais, dans la plupart des cas, on peut s'attendre à de plus faibles dérives de fréquence.

(²) Changement type sans réalignement.

(³) Estimation.

(*) Volume d'un appareil sans batteries.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABASHEV, Iou. G., ELKIN, G. A., PURTOV, V. I. et FILONOV, N. N. [1980] Konstrouktivnye osobennosti i resultaty predvaritelnykh issledovaniy tsezievoi atomno-louchevoi oustanovki MTs-2. Issledovania v oblasti izmerenyi vremeni i tchastoty (Caractéristiques de construction et résultats d'études préliminaires du dispositif à jet atomique de césium MTs-2. Etude des mesures de temps et de fréquence). Sbornik Naouchnykh Troudov (Collection de travaux scientifiques), *VNIIFTRI*, 3-5.
- ALLAN, D. W. [février 1966] Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 2, 221-230.
- ARDITI, M. et PICQUE, J. L. [1980] A caesium beam atomic clock using laser optical pumping. Preliminary tests. *J. de Phys. (Lett.)*, Vol. 41, L-381.
- AUDOIN, C. et VANIER, J. [1976] Atomic frequency standards and clocks. *J. Phys. E. Sci. Instr.*, Vol. 9, 697-720.
- AUDOIN, C., VIENNET, J. et LESAGE, P. [1981] Hydrogen maser: active or passive? *J. de Phys.*, Vol. 42, Supplément C-8, 159-170.
- AVILA, G., DE CLERCQ, E., DE LABACHELLERIE, M. et CÉREZ, P. [juin 1985] Microwave Ramsey resonances from a laser diode optically pumped cesium resonator. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 139-143.
- BARNES, J. A., JONES, R. H., TRYON, P. V. et ALLAN, D. W. [décembre 1982] Noise models for atomic clocks. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 295-307.
- BAVA, E., DE MARCHI, A., GODONE, A., ROVERA, G. D. et GIUSFREDI, G. [1983] Isotopic Shift Measurement of the $^3P_1 - ^3P_0$ fine structure transition of ^{24}Mg and ^{26}Mg . *Optics Comm.*, Vol. 47, 3, 193-195.
- BECKER, G. [1973] Frequenzvergleiche mit dem primären Zeit- und Frequenznormal CS1 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zwischen 1969 und 1973 (Comparaisons de fréquence avec l'étalon primaire de temps et de fréquence Cs1 du PTB entre 1969 et 1973). *PTB-Mitt.*, Vol. 83, 319.
- BECKER, G. [1974] Das primäre Zeit- und Frequenznormal CS1 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (L'étalon primaire de temps et de fréquence CS1 du PTB). Proc. International Congress of Chronometry, CIC 74-A 1.1.
- BECKER, G. [décembre 1976] Recent progress in primary Cs beam frequency standards at the PTB. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-25, 4, 458.
- BECKER, G. [1979] Das Cäsium, Zeit- und Frequenznormal der PTB als primäre Uhr (L'étalon de temps et de fréquence à jet de césium du PTB comme horloge primaire). Proc. International Congress of Chronometry, CIC 79-A 1.5.
- BECKER, G. et HETZEL, P. [1973] PTB Jahresbericht 1972 (Rapport annuel), 124.
- BESSON, R. et PEIER, U. R. [1980] Further advances on BVA quartz resonators. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphie, Pa., Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 175 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- BLACKMAN, R. B. et TUKEY, J. W. [1959] *The Measurement of Power Spectra*. Dover Publications Inc., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- BOLLINGER, J. J., WINELAND, D. J., ITANO, W. M., BERGQUIST, J. C. et PRESTAGE, J. D. [novembre 1984] Frequency and time standards based on stored ions. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, Etats-Unis d'Amérique).
- BOULANGER, J.-S., DOUGLAS, R. J., VANIER, J., MUNGALL, A. G., LI, Y. S. et JACQUES, C. [1984] On the accuracy of cesium beam primary frequency standards. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, Etats-Unis d'Amérique).
- BRENNER, D. [1969] Flexible bulb method of measuring wall shift of the hydrogen laser. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, Vol. 14, 943, § 006.
- BRENNER, D. [1970] Absolute frequency of the hydrogen maser using a flexible storage bulb. *J. Appl. Physics*, Vol. 41, 2942.
- BRILLET, A. [1981] Evaluation of light shifts in an optically pumped cesium beam frequency standard. *Metrologia*, 17, 147-150.
- CRAMPTON, S. B. et WANG, H. T. M. [29-31 mai 1974] Density-dependent shifts of hydrogen maser standards. Proc. 28th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 355-361 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- CRAMPTON, S. B., WANG, H. T. M. et BARRETT, J. L. [décembre 1976] Problems in hydrogen maser design and suggested improvements. Proc. 8th Annual. Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting. (US Naval Research Laboratory, Washington, DC) 351-354.
- CUTLER, L. S., GIFFARD, R. P. et MCGUIRE, M. D. [décembre 1981] A trapped mercury 199 ion frequency standard. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 563-578.
- DAVENPORT, W. B. et ROOT, W. L. [1958] *An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise*. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- DEBELY, P. E. [1970] Hydrogen masers with deformable bulb. *Rev. Sci. Instr.*, Vol. 41, 1290.
- DE CLERCQ, E. et CÉREZ, P. [1983] Evaluation of the light shifts in a frequency standard based on Raman induced Ramsey resonance. *Optics Comm.*, Vol. 45, 91-94.
- DE MARCHI, A., BAVA, E., GODONE, A. et GIUSFREDI, G. [mars 1983] Merits and limitations of submillimeter wavelength frequency standards based on a Mg (Ca) metastable beam. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-32, 1, 191-197.

- DEMIDOV, N. A., EZLOV, E. M., FEDOROV, V. A. et ULYANOV, A. A. [1978] Issledovanie stenotchnogo sdviga tchastoty v vodorodnom generatore dlya novykh materialov. Issledovania v oblasti vremeni i tchastoty (Etude de l'effet de paroi de la fréquence dans un générateur à hydrogène pour de nouveaux matériaux. Etudes dans le domaine du temps et de la fréquence). Sbornik Troudov (Recueil de travaux) *VNIIFTRI*, 37(67), 81-85.
- DERBYSHIRE, A., DRULLINGER, R. E., FELDMAN, M., GLAZE, D. J., HILLARD, D., HOWE, D. A., LEWIS, L. L., PASCARU, I. et STANCIULESCU, D. [mai 1985] Laser requirements for optically pumped cesium standards. Proc. 39th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- DESAINTFUSCIEN, M., VIENNET, J., AUDOIN, C. et VANIER, J. [1975] Temperature dependence of spin exchange frequency shifts in H-H collisions. *J. de Phys. (Lett.)*, Vol. 36, 281-284.
- DICKS, J. G. et STRAYER, D. M. [1984] Development of the super-conducting cavity maser as a stable frequency source. Proc. 38th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 435 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- ELKINE, G. A., ABASHEV, Iou. G., BARYSHEV, V. N. et PURTOV, V. I. [1983] Tsezievye atomno-loutchevye repery tchastot (Etalons de fréquence à jet atomique de césium). *Izm. Tekhn.*, 6.
- ELKINE, G. A. et ZHESTKOVA, N. D. [1979] Smechtchenie tchastoty vodorodnogo generatora iz-za stolknoveny atomov mejdou soboi (Glissement de la fréquence d'un générateur à hydrogène dû à la collision des atomes entre eux). *Izm. Tekhn.*, 9, 36-37.
- ELKINE, G. A., ZHESTKOVA, N. D. et YAKOVLEV, Iou. N. [1980] Vosproizvodimost tchastoty vodorodnykh generatorov na dlitelnykh intervalakh vremeni. Issledovania v oblasti izmereny vremeni i tchastoty (Reproductibilité de la fréquence de générateurs à hydrogène sur de longs intervalles de temps. Recherches dans le domaine des mesures de temps et de fréquence). Sbornik Naoutchnykh Troudov (Collection de travaux scientifiques), *VNIIFTRI*, 6-8.
- GAYGEROV, B. A., ELKINA, L. P. et PUSHKIN, S. B. [1982] Issledovanie metrologicheskikh kharakteristik grouppy vodorodnykh standartov (Etude des caractéristiques métrologiques d'un groupe d'étalons à hydrogène). *Izm. Tekhn.*, 27-28.
- GODONE, A., DE MARCHI, A., ROVERA, G. D., BAVA, E. et GIUSFREDI, G. [1983] Frequency measurement of the $^3P_1 - ^3P_0$ fine structure transition of ^{24}Mg . *Phys. Rev. A*, Vol. 28, 4, 2562-2564.
- GUINOT, B. [1974] Rapport annuel du Bureau international de l'heure (BIH).
- HELLWIG, H. et BELL, H. [1972] Some experimental results with an atomic hydrogen storage beam frequency standard. *Metrologia*, Vol. 8, 96-98.
- HELLWIG, H., JARVIS, S., Jr., HALFORD, D. et BELL, H. E. [juin 1973] Evaluation and operation of atomic frequency standards using time domain velocity selection modulation. *Metrologia*, Vol. 9, 107-112.
- IEEE [février 1966] Numéro spécial: «Frequency Stability». *Proc. IEEE*, Vol. 54, 2, 101-338.
- ILJINE, V. G., ELKINE, G. A., ABASHEV, Iou. et PURTOV, V. I. [1976] Metrologitchesky tsezievy reper tchastoty MTs-1 (Etalon de fréquence métrologique au césium MTs-1). *Izm. Tekhn.*, 10, 43-47.
- JARDINO, M., DESAINTFUSCIEN, M., BARILLET, R., VIENNET, J., PETIT, P. et AUDOIN, C. [1980] Mercury Ion Frequency Standard: Preliminary results, Proc. 34th Annual Symposium on Frequency control, Philadelphie, Pa., Etats-Unis d'Amérique, (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 353 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- JIMÉNEZ, J. J. et SEPTIER, A. [12-14 juin 1973] S and X band superconducting cavity stabilized oscillators. Proc. 27th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 406-413 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- JONES, R. H. et TRYON, P. V. [janvier-février 1983] Estimating time from atomic clocks. *NBS J. Res.*, Vol. 88, 1, 17-24.
- KOBAYASHI, M., NAKAGIRI, K., URABE, S., SHIBUKI, M. et SABURI, Y. [décembre 1978] Design of and preliminary results on a cesium-beam standard at the Radio Research Laboratories. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-27, 4, 343-348.
- KOGA, Y. [1984] An improved method of measuring the Zeeman shift in cesium beam frequency standards. *Japan J. Appl. Phys.*, Vol. 23, 1, 97-100.
- KOLMOGOROV, A. N. [1941] *DAN SSSR*, Vol. 32, 19, Voir aussi Vol. 30, 299 (1941).
- KOMIYAMA, B. [1985] A 9.2 GHz superconducting cavity stabilized oscillator. Proc. 39th Annual Symposium on Frequency Control. (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- LESAGE, P., AUDOIN, C. et TETU, M. [1979] Amplitude noise in passively and actively operated masers. Proc. 33rd Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 515-535 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- LESAGE, P., AUDOIN, C. et TETU, M. [1980] Measurement of the effect of thermal noise on the amplitude of oscillation of a maser oscillator. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 311-315.
- MALAKHOV, A. N. [1966] Spectral-correlational analysis of signals with nonintegrable spectra. *Radiofizika*, Vol. 9, 595.
- MORIKAWA, T., OHTA, Y. et KIUCHI, H. [1984] Development of hydrogen masers for K-3 VLBI system. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, Etats-Unis d'Amérique).
- MORRIS, D. [décembre 1978] Time-dependent frequency shifts in the hydrogen maser. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-27, 4, 339-343.

- MORRIS, D. et NAKAGIRI, K. [1976] The frequency stability of a pair of auto-tuned hydrogen masers. *Metrologia*, Vol. 12, 1-6.
- MUNGALL, A. G. [1978] A New concept in atomic time keeping: the continuously operating long-beam primary cesium clock. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-27, 330.
- MUNGALL, A. G. et COSTAIN, C. C. [1977] NRC CsV primary clock performance. *Metrologia*, Vol. 13, 105-107.
- MUNGALL, A. G. et COSTAIN, C. C. [1983] Performance of the four NRC long-beam primary cesium clocks CsV, CsVIA, CsVIB and CsVIC, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-32, 1, 224-227.
- MUNGALL, A., DAAMS, H., MORRIS, D. et COSTAIN, C. C. [1976] Performance and operation of the NRC primary caesium clock, CsV. *Metrologia*, Vol. 12, 129-139.
- MUNGALL, A. G., DAAMS, H. et BOULANGER, J.-S. [1980] Design and performance of the new 1 m NRC primary cesium clocks. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 4, 291-297.
- MUNGALL, A. G., DAAMS, H. et BOULANGER, J.-S. [1981] Design, construction and performance of the NRC CsVI primary cesium clocks. *Metrologia*, Vol. 17, 123-145.
- NAKADAN, Y. et KOGA, Y. [juin 1985] Recent progress in Cs beam frequency standards at the NRLM. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 133-135.
- NAKAGIRI, K., SHIBUKI, M., URABE, S., ISHIZU, M., OHTA, Y., MORIKAWA, T. et SABURI, Y. [1984] Accuracy evaluation of the RRL primary cesium beam frequency standard. Proc. 38th Annual Symposium on Frequency Control. Philadelphie, PA, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 447-451 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- NASA [1983] Hydrogen maser comparison test — Vol. 1. Executive Summary, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, Etats-Unis d'Amérique.
- NBS [1974] NBS Monograph 140: Time and Frequency: Theory and Fundamentals. (Available from Superintendent of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, Catalog No. C13.140, Stock #0303-01202).
- OHTA, Y., YOSHIMURA, K., SHIBUKI, M., NAKAGIRI, K., MORIKAWA, T., KOBAYASHI, M. et SABURI, Y. [1974] On an automatic cavity tuner for hydrogen frequency standard. *Rev. Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 20, 39-58.
- PERCIVAL, D. B. [1976] A heuristic model of atomic clock behavior. Proc. 30th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 414-419 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- PETERS, H. E., MCGUNIGAL, T. E. et JOHNSON, E. H. [22-24 avril 1968] Hydrogen standard work at Goddard Space Flight Center. Proc. 22nd Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 464-493 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- PETIT, P., DESAINTEFUSCIEN, M. et AUDOIN, C. [1980] Temperature Dependence of the Hydrogen Maser wall shift in the temperature range 295-395 K. *Metrologia*, Vol. 16, 7.
- PETIT, P., VIENNET, J., BARILLET, R., DESAINTEFUSCIEN, M. et AUDOIN, C. [1974] Development of hydrogen masers as frequency standards at the Laboratoire de l'Horloge Atomique. *Metrologia*, Vol. 10, 61-67.
- PETIT, P., VIENNET, J., BARILLET, R., DESAINTEFUSCIEN, M. et AUDOIN, C. [26-30 mai 1975] Etalons de fréquence à hydrogène atomique. Colloque International sur l'Electronique et la Mesure. Paris, France, 111-119.
- REINHARDT, V. [1973] Flexible bulb — large storage box hydrogen maser. Proc. 5th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting, (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, Etats-Unis d'Amérique).
- REINHARDT, V. et PETERS, H. [28-30 mai 1975] An improved method for measuring the magnetic inhomogeneity shift in hydrogen masers. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth NJ 07703), (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- ROVERA, G. et BEVERINI, N. [5-9 septembre 1977] Frequency stability of the optically pumped passive caesium frequency standard. Proc. EUROMEAS '77, Sussex University, 83.
- ROVERA, G., DE MARCHI, A. et VANIER, J. [1976] The optically pumped passive caesium frequency standard: Basic theory and experimental results on buffer gas frequency shifts. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 3, 203-210.
- RUEGER, L. J. [novembre 1981] Characteristics of the NASA research hydrogen maser. *J. Inst. Electron. Telecomm. Engrs.*, Vol. 27, 11, 493-500.
- SABURI, Y., KOBAYASHI, M. et YOSHIMURA, K. [9-11 juillet 1974] Travaux récents sur le maser à hydrogène aux RRL (Japon). Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), 7^e Session. S87-S91. Bureau international des poids et mesures, Sèvres, France.
- STEIN, S. R. [28-30 mai 1975] Application of superconductivity to precision oscillators. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 321-328 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- STEIN, S. R., MANNEY, C. M., WALLS, F. L., GRAY, J. E. et BESSON, R. [1978] A system approach to high performance oscillators. Proc. 32nd Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 527 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- STRUMIA, F. [1972] A proposal for a new absolute frequency standard, using a Mg or Ca atomic beam. *Metrologia*, Vol. 8, 85-90.
- TETU, M., TREMBLAY, P., LESAGE, P., PETIT, P. et AUDOIN, C. [1981] Frequency stability of maser oscillators operated with enhanced cavity Q. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 667-684.

- TURNEAURE, J. P. et STEIN, S. R. [2-6 juin 1975] An experimental limit on the time variation of the fine structure constant. Proc. 5th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, Paris, France.
- URABE, S., OHTA, Y. et SABURI, Y. [1984] Improvement in a hydrogen maser by a new state selection. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-33, 2, 117-121.
- UZGIRIS, C. E. et RAMSEY, N. F. [1970] Multiple-dash hydrogen maser with reduced wall shift. *Phys. Rev. A*, Vol. 1, 429.
- VANIER, J., BOULANGER, J.-S. et MUNGALL, A. G. [1984] The Millman effect in cesium beam atomic frequency standards: further considerations. *Metrologia*, Vol. 20, 101-105.
- VANIER, J. et LAROUCHE, R. [1978] A comparison of the wall shift of TFE and FEP teflon coatings in the hydrogen maser. *Metrologia*, Vol. 14, 31.
- VANIER, J., LAROUCHE, R. et AUDOIN, C. [28-30 mai 1975] The hydrogen maser wall shift problem. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 371-383 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- VESSOT, R. et LEVINE, M. [octobre 1970] A method for eliminating the wall shift in the hydrogen maser. *Metrologia*, Vol. 6, IV, 116-117.
- VESSOT, R. et autres [août 1971] Recent developments affecting the hydrogen maser as frequency standard. NBS Special Publication 343. Precision measurements and fundamental constants, 22-37.
- VESSOT, R. F. C., MATTISON, E. M., IMBIER et ZHAI, Z. C. [1984] Performance data of US Naval Observatory VLG-11 hydrogen masers since September 1983. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, Etats-Unis d'Amérique).
- VLBI RESEARCH DEVELOPMENT GROUP, RRL [1984] The First US-JAPAN VLBI test observation by use of K-3 system of the Radio Research Laboratories. *J. Radio Res. Labs.*, Vol. 31, 132, 31-37.
- WALLS, F. L. et HELFWIG, H. [2-4 juin 1976] A new kind of passively operating hydrogen frequency standard. Proc. 30th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electr. Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 473-481 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- WALLS, F. L. et PERSSON, K. B. [juin 1984] A new miniaturized passive hydrogen maser. Proc. 38th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 416-420 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- WINELAND, D. J., ALLAN, D. W., GLAZE, D. Y., HELFWIG, H. W. et JARVIS, S. Jr. [décembre 1976] Results on limitations in primary cesium standard operation. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 4, 453-458.
- WINKLER, G. M. R., HALL, R. G. et PERCIVAL, D. B. [octobre 1970] The US Naval Observatory clock time reference and the performance of a sample of atomic clocks. *Metrologia*, Vol. 6, IV, 126-134.
- YASUDA, Y. et YOSHIMURA, K. [novembre 1964] Measurement of short term frequency instability and frequency spectra of highly stable oscillators. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 11, 58.
- ZHESTKOVA, N. D. et ELKINE, G. A. [1979] Vliyanie neodnorodnogo magnitnogo polya na tchastotou vodorodnogo generatora (Influence d'un champ magnétique non homogène sur la fréquence d'un générateur à hydrogène). *Izm. Tekhn.*, 9, 37-38.
- ZITSEWITZ, P. W. et RAMSEY, N. F. [1971] Studies of the wall shift in the hydrogen maser. *Phys. Rev. A*, Vol. III, 51.

BIBLIOGRAPHIE

- AUDOIN, C., VIENNET, J., CYR, N. et VANIER, J. [1982] Influence of modulation frequency in rubidium cell frequency standards. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 87-110.
- BOLLINGER, J. J., ITANO, W. M. et WINELAND, D. J. [1983] Laser cooled 9_{Be^+} accurate clock. Proc. 37th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphie, PA, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- CHIU, M., BATES, A. B., RUEGER, L. J., REINHARDT, V. S., DACHEL, P., KUNSKI, R., KRUEGER, R. et WARDRIP, S. C. [1982] The NASA/GSFC hydrogen maser program: a review of recent data. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- CUTLER, L. S., GIFFARD, R. P. et McGUIRE, M. D. [1983] Mercury - 199 trapped ion frequency standard: Recent theoretical progress and experimental results. Proc. 37th Annual Symposium on Frequency Control. Philadelphie, PA, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- DIALS, M. et WERT, L. [décembre 1982] A commercial hydrogen maser, progress report. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- ITANO, W. M. et WINELAND, D. J. [septembre 1981] Precision measurement of the ground-state hyperfine constant of 25_{Mg^+} . *Phys. Rev. A*, Vol. 24, 1364-1373.
- JARDINO, M., DESAINTFUSCIEN, M. et PLUMELLE, F. [1981] *J. de Phys.*, Vol. 42, Supplément C-8, 327-338.
- PETERS, H. E. [4-6 juin 1972] Hydrogen as an atomic beam standard. Proc. 26th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 230-241 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).

VANIER, J., RACINE, G., KUNSKI, R. et PICARD, M. [1980] Progress report on hydrogen maser development at Laval University. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, Etats-Unis d'Amérique) 807-824.

WALLS, F. L. [1976] Design and results from a prototype passive hydrogen maser frequency standard. Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (US Naval Research Laboratory, Washington, DC).

RAPPORT 439-4

EFFETS RELATIVISTES DANS UN SYSTÈME DE TEMPS-COORDONNÉE TERRESTRE

(Programme d'études 3C/7)

(1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Les comparaisons de temps se font maintenant avec une grande précision; il est donc nécessaire d'adopter un ensemble de conventions et une trame de référence coordonnée pour tenir compte d'une façon cohérente des effets relativistes. Les répéteurs ou horloges atomiques utilisés dans les satellites et les avions à réaction permettront bientôt d'établir un réseau d'étalons de temps répartis sur toute la surface du globe; les grandes distances qui entrent en jeu sont une raison supplémentaire pour mettre en place des procédures bien définies, permettant de tenir compte des effets relativistes dans les comparaisons de temps. Dans le présent Rapport, on propose l'adoption de trames de référence locales, géocentriques, à utiliser dans ces comparaisons de temps.

A sa 9^e session (23-25 septembre 1980), le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) a reconnu cette nécessité et a proposé au Comité international des poids et mesures (CIPM):

- que le TAI est une échelle de temps-coordonnée définie dans un repère de référence géocentrique ayant comme unité d'échelle la seconde du SI telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation; et
- que par conséquent, il peut être étendu dans l'état actuel du savoir-faire et avec une exactitude suffisante à un point quelconque, fixe ou mobile, au voisinage du géoïde en appliquant les corrections du premier ordre de la relativité générale, c'est-à-dire les corrections pour les différences de potentiel de la pesanteur et les différences de vitesse ainsi que pour la rotation de la Terre.

Le présent Rapport est cohérent avec la proposition du CCDS, mais il étend les procédures proposées jusqu'à des altitudes qui englobent l'orbite des satellites géostationnaires. Les formules suivantes, qui représentent les débits des horloges, ont une précision meilleure que 10^{-14} .

Lorsqu'on transfère le temps d'un point P à un point Q, l'opération peut être considérée soit dans une trame de référence géocentrique rotative, attachée à la Terre (cas R), soit dans une trame géocentrique locale inertielle, non rotative (cas N).

2. Transport des horloges

2.1 Cas R

Dans un transfert de temps entre un point P et un point Q, le temps-coordonnée cumulé pendant le transfert a pour expression:

$$\Delta t = \int_P^Q ds \left[1 - \frac{\Delta U(\vec{r})}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right] + \frac{2\omega}{c^2} A_E \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière; ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre; v , la vitesse de déplacement de l'horloge par rapport au sol; $\vec{r}$ est un vecteur dont l'origine se trouve au centre de la Terre et dont l'extrémité se déplace en même temps que l'horloge de P à Q; A_E est la projection équatoriale de l'aire balayée pendant le transfert de temps par le vecteur $\vec{r}$ dont l'extrémité se déplace de P à Q; $\Delta U(\vec{r})$ est la différence de potentiel entre la position de l'horloge définie par $\vec{r}$ et le géoïde, vue dans un système de coordonnées fixe attaché à la Terre, avec la convention que $\Delta U(\vec{r})$ est positif lorsque l'horloge se trouve au-dessus du géoïde; enfin, ds est l'accroissement du temps propre cumulé sur l'horloge portable. Cet accroissement représente le temps cumulé sur

l'horloge portable normalisée, mesuré dans la trame de référence qui se déplace avec l'horloge. A_E est mesuré dans un système de coordonnées fixe attaché à la Terre. Au fur et à mesure que A_E est balayé, on considère que cette grandeur est positive si la projection du trajet de l'horloge sur le plan équatorial progresse vers l'est. Si la hauteur h de l'horloge est inférieure à 24 km au-dessus du géoïde, on peut, en première approximation, remplacer $\Delta U(\vec{r})$ par gh , où g est l'accélération totale de la pesanteur (y compris l'accélération du mouvement de rotation de la Terre) évaluée sur le géoïde. Cette approximation est valable pour tous les transferts aériens et terrestres. Pour les valeurs de h supérieures à 24 km, la différence de potentiel $\Delta U(\vec{r})$ doit être calculée avec plus de précision, à savoir:

$$\Delta U(\vec{r}) = -GM_e \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a_1} \right) - \frac{1}{2} \omega^2 (r^2 \sin^2 \theta - a_1^2) + \frac{J_2 GM_e}{2a_1} \left[1 + \left(\frac{a_1}{r} \right)^3 (3 \cos^2 \theta - 1) \right] \quad (2)$$

où a_1 est le rayon de la Terre à l'équateur; r est le module du vecteur $\vec{r}$; θ est la colatitute; GM_e , le produit de la masse de la Terre par la constante de gravitation; et J_2 , le coefficient du moment du quadripôle terrestre, $J_2 = +1,083 \times 10^{-3}$.

2.2 Cas N

Soit à opérer un transfert de temps d'un point P à un point Q, au moyen d'une horloge, le temps-coordonnée qui s'écoule pendant le déplacement de l'horloge a pour expression:

$$\Delta t = \int_P^Q ds \left[1 - \frac{U(\vec{r}) - U_g}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right] \quad (3)$$

où $U(\vec{r})$ est le potentiel au point où se trouve l'horloge et v la vitesse de déplacement de l'horloge, ces deux grandeurs étant prises (contrairement à l'équation (1)) dans une trame de référence géocentrique non rotative; U_g est le potentiel sur le géoïde, compte tenu de l'influence du mouvement de rotation de la Terre sur le potentiel. On notera que $\Delta U(\vec{r}) \neq U(\vec{r}) - U_g$ puisque $U(\vec{r})$ ne tient pas compte de l'influence de la rotation de la Terre. Cette formule s'applique aussi à des horloges se trouvant sur l'orbite des satellites géostationnaires, mais ne devrait pas être utilisée pour des distances dépassant environ 50.000 km du centre de la Terre.

3. Signaux électromagnétiques

3.1 Cas R

Du point de vue d'une trame géocentrique rotative, attachée à la Terre, le temps-coordonnée qui s'écoule entre l'émission et la réception d'un signal électromagnétique a pour expression:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_P^Q d\sigma \left[1 - \frac{\Delta U(\vec{r})}{c^2} \right] + \frac{2\omega}{c^2} A_E \quad (4)$$

où $d\sigma$ est l'accroissement de la longueur normale, ou longueur propre, sur le trajet de transmission; $\Delta U(\vec{r})$ est le potentiel au point $\vec{r}$ sur le trajet de transmission, diminué du potentiel du géoïde (voir la formule (3), dans un système de coordonnées fixe attaché à la Terre; et A_E est l'aire de la surface limitée par la projection équatoriale du triangle dont les sommets sont:

- le centre de la Terre,
- le point P d'émission du signal,
- le point Q de réception du signal.

L'aire A_E est positive lorsque le trajet parcouru par le signal a une composante orientée vers l'est. Le deuxième terme de la formule est égal à une nanoseconde environ, pour une trajectoire Terre-satellite géostationnaire-Terre. Dans le troisième terme, on a $2\omega/c^2 = 1,6227 \times 10^{-6}$ ns/km²; ce terme peut introduire des centaines de nanosecondes pour des valeurs courantes de A_E . L'accroissement de la longueur propre, $d\sigma$, peut être pris égal à la longueur mesurée à l'aide de tiges rigides normalisées, au repos dans le système en rotation; cela revient à mesurer une longueur en prenant $c/2$ fois la durée de transmission (normalisée par rapport au vide) d'un signal électromagnétique aller et retour, émis de P vers Q et envoyé en retour sur le même trajet de transmission.

3.2 Cas N

Dans une trame géocentrique non rotative (locale, inertielle), le temps-coordonnée qui s'écoule entre l'émission et la réception d'un signal électromagnétique a pour expression:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_P^Q d\sigma \left[1 - \frac{U(\vec{r}) - U_g}{c^2} \right] \quad (5)$$

où $U(\vec{r})$ et U_g sont définis comme dans l'équation (3) et $d\sigma$ est l'accroissement de longueur normale, ou longueur propre, sur le trajet de transmission. Les valeurs de $d\sigma$ ne sont pas les mêmes dans la formule (4) et dans la formule (5); elles diffèrent légèrement parce que les trames de référence dans lesquelles elles sont mesurées tournent l'une par rapport à l'autre.

4. Exemples

En raison d'effets relativistes, une horloge située sur un emplacement surélevé apparaîtra plus haute en fréquence et présentera par rapport à l'échelle TAI une différence normalisée de fréquences:

$$\frac{\Delta U_T}{c^2}$$

où ΔU_T est la différence du potentiel total positif (gravitationnel et centrifuge) et c la vitesse de la lumière. Près du niveau de la mer, la formule est:

$$\frac{g(\varphi)h}{c^2} \quad (6)$$

avec $g(\varphi) = (9,780 + 0,052 \sin^2 \varphi) \text{ m/s}^2$, φ étant la latitude géographique, $g(\varphi)$ l'accélération totale au niveau de la mer (gravitationnel et centrifuge) et h la hauteur au-dessus du niveau de la mer. Il faut passer par la formule (6) pour comparer les sources primaires de la seconde (SI) d'une part avec l'échelle TAI et, d'autre part, entre elles. Par exemple à 40° de latitude, la marche de l'horloge varie de $+1,091 \times 10^{-13}$ par km de hauteur au-dessus du niveau de la mer.

Si une horloge se déplace par rapport à la surface de la Terre avec une vitesse v ayant une composante v_E en direction de l'est, la différence normalisée de la fréquence de l'horloge en mouvement par rapport à celle d'une horloge au repos au niveau de la mer est:

$$-\frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{g(\varphi)h}{c^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \omega \cdot r \cdot \cos \varphi \cdot v_E \quad (7)$$

Dans cette formule, ω est la vitesse angulaire de rotation de la Terre ($7,292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$); r est la distance de l'horloge au centre de la Terre (le rayon de la Terre étant de 6378,140 km); c , la vitesse de la lumière ($2,997\,924\,58 \times 10^5 \text{ km/s}$) et φ la latitude géographique.

Par exemple, si une horloge se déplace vers l'est à la vitesse de 270 m/s, à la latitude 40° et à une altitude de 9 km, la différence normalisée de fréquence de l'horloge en mouvement par rapport à celle d'une horloge au repos au niveau de la mer est de:

$$-4,06 \times 10^{-13} + 9,82 \times 10^{-13} - 1,072 \times 10^{-12} = -4,96 \times 10^{-13}$$

Le choix d'une trame-coordonnée est purement arbitraire, mais pour définir le temps-coordonnée, il faut choisir une trame précise. Dans le cas d'un système terrestre, il est recommandé de choisir une trame topocentrique. D'après cette trame, si une horloge B est synchronisée avec une horloge A (les deux horloges étant stationnaires sur la Terre) par un signal radioélectrique voyageant de A à B, ces deux horloges présenteront dans le temps-coordonnée une différence:

$$B - A = -\frac{\omega}{c^2} \int_P r^2 \cos^2 \varphi d\lambda \quad (8)$$

où φ est la latitude; λ , la longitude (comptée positivement vers l'est); et P , le trajet suivant lequel les signaux radioélectriques se propagent de A vers B. Si les deux horloges sont synchronisées par une horloge portative voyageant de A à B, la différence sera de:

$$B - A = \int_P dt \left(\frac{\Delta U_T}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right) - \frac{\omega}{c^2} \int_P r^2 \cos^2 \varphi d\lambda \quad (9)$$

où v est la vitesse au sol de l'horloge portative et P , le trajet parcouru par cette horloge de A à B.

Dans ce cas aussi, la différence peut atteindre plusieurs dixièmes de microseconde. Il est recommandé d'utiliser les formules (8) et (9) pour effectuer les corrections nécessaires dans le cas de synchronisation d'horloge à grande distance. Comme les formules (8) et (9) dépendent du trajet, il faut en tenir compte dans tout système cohérent de temps-coordonnée.

Si une horloge est transportée d'un point A en un point B puis ramenée en A par un trajet différent, à une vitesse infiniment petite, et avec $h = 0$, son heure différera de celle d'une horloge qui serait restée en A de:

$$\Delta t = - \frac{2\omega A_E}{c^2} \quad (10)$$

A_E étant l'aire de la projection sur le plan de l'équateur terrestre de l'aire délimitée par le trajet aller et retour de l'horloge. A_E est considérée comme positive si le trajet, vu du pôle Sud, est parcouru dans le sens des aiguilles d'une montre.

Si par exemple:

$$2\omega/c^2 = 1,6227 \times 10^{-6} \text{ ns/km}^2$$

l'heure d'une horloge transportée vers l'est autour de la Terre à une vitesse infiniment petite, et avec $h = 0$, à l'équateur différera de celle d'une horloge restée au repos de $-207,4$ ns.

BIBLIOGRAPHIE

- ASHBY, N. [1975] An earth-based coordinate clock network. NBS Tech. Note 659, 34, SD Catalogue No. C13.45:659. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, Etats-Unis d'Amérique.
- ASHBY, N. et ALLAN, D. [1979] Practical applications of relativity for a global coordinate time scale. *Radio Sci.*, Vol. 14, 649-669.
- BECKER, G. [1974] Time scales relativity. Report of Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, and acts of the second Cagliari Meeting on Time Determination, Dissemination and Synchronization, 1974, Ed.: Astron. Inst. of Cagliari, Italie.
- BECKER, G., FISCHER, B., KRAMER, G. et MÜLLER, E. K. [1967] Die Definition der Sekunde und die allgemeine Relativitätstheorie (The definition of the second and the theory of general relativity). *PTB-Mitt.*, 77, 111.
- BESSON, J. [1970] Comparison of national time standards by simple overflight. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-19, 4, 227-232.
- BIH [1973] Rapports annuels du Bureau international de l'heure, Paris, France.
- BIH Circulaire D. Bureau international de l'heure, Paris, France.
- CCDS [18-19 juin 1970] Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, 5^e session. Bureau international des poids et mesures, Sèvres, France.
- COHEN, J. M., MOSES, H. E. et ROSENBLUM, A. [1983] Clock transport synchronisation in noninertial frames and gravitational fields. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 51, 17, 1501-1502.
- FARLEY, F. J. M., BAILEY, J. et PICASSO, E. [6 janvier 1968] Experimental verifications of the theory of relativity. *Nature*, Vol. 217, 17-18.
- FRISCH, D. H. et SMITH, J. H. [1963] Measurement of the relativistic time dilation using μ -mesons. *Amer. J. Phys.*, Vol. 31, 342.
- GRANVEAUD, D. M. et GUINOT, B. [1972] Atomic time scales. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-21, 4, 396.
- GUINOT, B. [1969] Formation de l'échelle de temps coordonnée par le Bureau international de l'heure (BIH). Actes du Colloque international de chronométrie, A-20, série A, Paris, France.
- HAFELE, J. C. et KEATING, R. E. [1972] Around-the-world atomic clocks: predicted relativistic time gains. *Science*, Vol. 177, 4044, 166-170.

- HUDSON, G. E. [1964] Spacetime coordinate systems. Actes du Congrès international de chronométrie, Lausanne, Suisse.
- HUDSON, G. E., ALLAN, D. W., BARNES, J. A., HALL, R. G., LAVANCEAU, J. D. et WINKLER, G. M. R. [mai 1969] A coordinate frequency and time system. Proc. 23rd Annual Symposium on Frequency Control, Com. E, Atlantic City, NJ, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- IVES, H. et STILLWELL, G. J. [1938] *Opt. Soc. Am.*, **28**, 215.
- KING-HELE, D. G. [1980] The gravity field of the Earth. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, Londres, Vol. A294, 317-328.
- MISNER, C., THORNE, K. et WHEELER, J. [1973] *Gravitation*. Freeman and Company, San Francisco, Etats-Unis d'Amérique.
- POUND, R. V. et REBKA, G. A. Jr. [1960] Apparent weight of photons. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 4, 337.
- POUND, R. V. et SNIDER, J. L. [1964] Effect of gravity on nuclear resonance. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 13, 539.
- RAPP, R. H. [1974] Current estimates of mean earth ellipsoid parameters. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 1, 1, 35-48.
- REINHARDT, V. [3-5 décembre 1974] Relativistic effects of the rotation of the Earth on remote clock synchronization. Proc. 6th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting NASA/DOD (US Naval Research Laboratory, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique).
- REINHARDT, V. S., PREMO, D. A., FITZMAURICE, M. W., WARDRIP, S. C. et ARVENKA, P. O. [1978] Nanosecond time transfer via shuttle laser ranging experiment. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., Etats-Unis d'Amérique, 319-342.
- RUEGER, L. J. et BATES, A. G. [juillet-août 1979] Nova satellite experiment. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 707-714.
- RUTMAN, J. [16-21 janvier 1978] Application of space techniques to time and frequency dissemination and synchronization. Proc. European Workshop on Space Oceanography, Navigation, and Geodynamics (SONG), Schloss-Elmau, République fédérale d'Allemagne, ESAPS-137.
- SABURI, Y. [1976] Observed time discontinuity of clock synchronization in rotating frame of the Earth. *J. Radio Res. Labs.*, Vol. 23, **112**, 255-265.
- SABURI, Y., YAMAMOTO, M. et HARADA, K. [1976] High-precision time comparison via satellite and observed discrepancy of synchronization. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, **4**, 473.
- UAI [1973] 15^e Assemblée générale, Rapport de la Commission 31, Union Astronomique internationale, Sydney, Australie.
- VESSOT, R. F. C. [1974] Lectures on frequency stability of clocks in the gravitational redshift experiment. *Experimental Gravitation*, 111-162. Ed. B. Bertotti, School of Physics Enrico Fermi, Academic Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- VESSOT, R. F. C. et LEVINE, M. W. [1979] A test of the equivalence principle using a space-borne clock. *General Relativity and Gravitation*, Vol. 10, **3**, 181-204.

RAPPORT 579-3

ALGORITHMES D'ÉCHELLES DE TEMPS ET PROBLÈMES D'ÉTABLISSEMENT DE MOYENNES ASSOCIÉS

(Programme d'études 1D/7)

(1974-1978-1982-1986)

1. Uniformité

Dans la plupart des laboratoires, l'échelle de temps locale indépendante est obtenue à partir d'ensembles d'étalons commerciaux au césium, et elle est maintenue uniforme sans référence à des étalonnages par étalons primaires de laboratoire. Pour obtenir une bonne uniformité, on applique aux divers étalons des corrections de la marche prévue ainsi que des coefficients de pondération (poids).

La prévision la plus simple et la plus répandue concernant la marche est la valeur moyenne observée pendant un intervalle de temps passé (prévision linéaire) relative à l'ensemble d'horloges. Toutefois, ce mode de prévision ne se justifie théoriquement que pour une modulation de fréquence par un bruit blanc; en particulier, ce n'est pas une prévision optimale pour la modulation de fréquence par un bruit de scintillation, qui peut être prédominante dans le problème de l'évaluation des échelles de temps. Le National Bureau of Standards a élaboré une méthode de prévision récurrente quasi optimale pour un modèle réaliste de fluctuations de fréquence [Allan et Grey, 1971; Allan et autres, 1973].

Des méthodes de pondération raffinées sont appliquées par le National Bureau of Standards [Allan et Grey, 1971; Allan et autres, 1973] et par la Commission Nationale de l'Heure, en France. Dans certains cas, on peut se contenter d'un procédé de pondération plus simple: on considère que toute horloge est affectée d'un «poids 1» sauf en cas de fonctionnement défectueux, où elle reçoit un «poids 0».

On a recours également à une méthode de formation de moyennes sur les horloges, avec des hypothèses différentes concernant le comportement de ces horloges et la notion d'échelle de temps uniforme [Winkler et autres, 1970]. Ces méthodes mettent en œuvre des procédés itératifs, avec des corrections qui compensent les contributions des horloges présentant des écarts excessifs par rapport au comportement prévu.

Des études faites au «Physikalisch-Technische Bundesanstalt» (PTB) et dans d'autres laboratoires ont montré que les modèles aléatoires ne suffisent peut-être pas à caractériser complètement les performances à long terme. Il peut y avoir des dérives de fréquence systématiques et des sauts de fréquence. Des études ont été faites pour détecter ces effets non aléatoires [Ganter, 1973]. Elles ont fait ressortir la nécessité d'un étalonnage précis des horloges.

Au Royaume-Uni, on propose d'essayer d'utiliser une échelle de temps combinant les possibilités de plusieurs établissements, à l'origine National Physical Laboratory (NPL) et Royal Greenwich Observatory (RGO). Il s'agirait d'un système intermédiaire entre deux cas extrêmes (un système central et un système réparti) qui offrirait les avantages des deux du point de vue de la disponibilité et de la fiabilité. La centralisation des calculs d'échelle de temps ainsi que les améliorations appropriées des liaisons nécessaires satisferaient aux besoins de précision [Gibbs, 1980].

Les RRL (Radio Research Laboratories) (Japon) ont présenté une méthode améliorée pour le calcul de l'échelle de temps à l'aide d'horloges pondérées [Imae, 1979; RRL, 1978]. En utilisant pour chaque horloge un facteur de pondération, obtenu à partir des variances à long terme ($\tau \geq 10$ jours) et à court terme ($\tau \leq 1$ jour), il est possible d'améliorer la stabilité de l'échelle de temps à court terme et à long terme. Lors d'une simulation sur ordinateur, il a été démontré que le calcul de l'échelle de temps peut être considérablement amélioré si l'erreur systématique des variances de l'horloge est compensée avant que ces variances soient utilisées pour déterminer les divers facteurs de pondération [Yoshimura, 1980].

Il apparaît que la stabilité d'une échelle de temps utilisant les facteurs de pondération compensés pour l'erreur systématique des variances d'horloge correspondant à la stabilité à long terme et à court terme est d'environ 2×10^{-13} , par rapport au TAI établi par Loran-C (9970-M) pour des temps d'établissement de moyennes compris entre 10 et 300 jours, pour 4 étalons de fréquence commerciaux à césium (Cs 2 et Cs 3).

L'échelle de temps atomique de l'observatoire de Shanghai et celle de l'observatoire de Shaanxi ont été établies respectivement en 1978 et 1979, à l'aide d'un ensemble d'horloges au rubidium. On utilise comme références d'étalonnage pour l'échelle de temps atomique de l'observatoire de Shanghai un étalon à jet de césium et trois masers à hydrogène et, pour l'échelle de temps atomique de l'observatoire de Shaanxi, deux masers à hydrogène. Toutes les horloges atomiques utilisées dans ces deux observatoires ont été conçues et fabriquées en République populaire de Chine [Chuang et al., 1980 et 1981; Shaanxi Observatory, 1979].

Les échelles de temps atomiques des observatoires de Shanghai et Shaanxi ont été comparées entre elles et avec d'autres échelles de temps atomiques en Chine par l'intermédiaire de liaisons télévisuelles et d'horloges transportables et avec des échelles de temps UTC, à l'étranger, au moyen de liaisons par satellite et à l'aide de transmissions sur ondes kilométriques (système Loran-C) et sur ondes myriamétriques. L'instabilité – à long terme de l'échelle de temps atomique de l'observatoire de Shanghai pour un temps d'échantillonnage de 30 jours est de: $(3 \text{ à } 4) \times 10^{-13}$ par rapport à UTC (USNO) sur une période de 2 ans ayant débuté en 1978. La stabilité à long terme de l'échelle de temps atomique de l'observatoire de Shaanxi est comparable à celle de l'observatoire de Shanghai.

L'échelle de temps atomique de l'Institut national de métrologie de la Chine a été établie depuis 1980. Cette échelle de temps atomique est supportée par un ensemble de 4 étalons de fréquence commerciaux (HP-5061A) que l'on calibre par rapport à deux étalons primaires de laboratoire (Cs 2 et Cs 3) à césium. Pendant plus d'un an de fonctionnement continu, l'exactitude de TA(NIM) a été déterminée comme $1 \times 10^{-12}(1\sigma)$. L'uniformité de TA(NIM) est $\sigma_y(\tau = 10 \text{ jours}) \leq 1,0 \times 10^{-13}$ (cette valeur étant déterminée par des comparaisons internes).

En France, une méthode de comparaison par télévision, exploitée depuis 1968, permet d'utiliser les données d'une douzaine d'horloges à césium réparties dans différents laboratoires pour calculer l'échelle de temps atomique français TA(F). Une méthode de pondération statistique, utilisant pour critère la stabilité à long terme de chacun des étalons, est utilisée pour former l'échelle moyenne, chaque poids pouvant varier de 0 à 1. Le poids moyen s'est amélioré de 0,4-0,5 en 1972-73 à 0,8-0,98 en 1981-82. La stabilité de l'échelle de temps TA(F) par rapport au TAI est de l'ordre de $\pm 3 \times 10^{-13}$ depuis 1972. Au 1^{er} janvier 1977, la fréquence du TA(F) a été diminuée de 15×10^{-13} de façon à assurer le meilleur accord possible avec la seconde du SI. Elle a fluctué, en 1983, entre -3 et -5×10^{-13} . N'étant pas déduit d'un étalon primaire de laboratoire, le TA(F) a une exactitude donnée par la fréquence moyenne des horloges commerciales utilisées.

En juin 1982, le National Bureau of Standards et le BIH ont co-parrainé le 2^e Colloque international sur les algorithmes d'échelles de temps atomiques au siège du NBS (Boulder). Parmi les sujets examinés, citons:

- processus de garde-temps;
- système de mesure de phase de haute précision automatisé [Stein et autres, 1982];
- histoire et structure de ALGOS;
- méthode à probabilité maximale pour l'estimation des paramètres des horloges et l'élaboration d'un algorithme pour filtres de Kalman basé sur ces paramètres en vue d'obtenir une dispersion minimale du temps dans un ensemble [Jones et Tryon, 1983];
- utilisation de statistiques extrêmement fiables dans la formation d'échelles de temps;
- comparaisons internationales d'horloges au niveau de précision de 10 ns dans les conditions de visibilité commune des satellites GPS [Davis et autres, 1981];
- un système d'ensemble horloge en temps réel au NBS; et
- rapports sur les garde-temps dans divers laboratoires internationaux.

2. Exactitude

Les méthodes mentionnées ci-dessus sont susceptibles de donner lieu à des écarts de fréquence importants à long terme. Il faut appliquer des corrections de fréquence pour maintenir la concordance entre l'unité de l'échelle de temps et la seconde.

Un des problèmes à résoudre consiste à évaluer la correction de fréquence quand on dispose de plusieurs étalonnages de la fréquence de l'échelle de temps par rapport aux étalons primaires. Yoshimura [1972], Azoubib et autres [1977] ont établi les formules qui donnent les poids à appliquer aux étalonnages correspondant aux modèles habituels de bruits aléatoires dans les échelles de temps.

Au National Research Council (Canada), les horloges commerciales au césium ont été étalonnées deux fois par semaine avec CsIII [Mungall, 1971] jusqu'au 28 décembre 1975. Depuis lors, le TA(NRC) a été calculé avec seulement une correction gravitationnelle de 0,97 ns/jour, directement à partir du signal de sortie de l'étalon primaire de temps et de fréquence CsV. Pendant huit ans, l'évaluation annuelle a montré que l'horloge conservait sa précision estimée de 5×10^{-14} . En 1979, on a mis en service continu trois petits étalons primaires, CsVIA, B et C, qui fonctionnent en tant qu'horloges. L'évaluation a montré que les horloges CsVI se maintenaient généralement dans les limites de $\pm 5 \times 10^{-14}$ par rapport à CsV, la limite extrême étant 1×10^{-13} . En revanche, leurs champs magnétiques et les différences de phase de leur cavité ont tendance à être moins stables que pour CsV; il a fallu faire des évaluations à intervalles de 6 mois environ pour garantir leur limite de précision de $1,5 \times 10^{-13}$ [Mungall et Costain, 1983]. Avec ces évaluations plus fréquentes, on ne peut pas considérer que l'ensemble ait un comportement statistique; d'autre part, on n'utilise pas d'algorithme pour combiner les sorties de ces horloges. Des rapports réguliers sur chaque horloge sont communiqués au BIH. Le NBS (National Bureau of Standards) procède, presque annuellement, à une évaluation complète de son étalon primaire, et les résultats sont utilisés dans un algorithme de pilotage pour le contrôle du TA(NBS) [Allan et autres, 1975]. Cet algorithme de pilotage a un double avantage: il introduit la stabilité à court terme (de l'ordre des jours et des semaines) de l'ensemble horloge du NBS et il permet d'avoir une stabilité à long terme déterminée par la précision de l'étalon primaire. Par conséquent, la marche du TA(NBS) est toujours pilotée vers la seconde SI.

Jusqu'en 1978, l'échelle de temps atomique TA(PTB) de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt de Braunschweig était établie sur la base de la moyenne pondérée d'un ensemble d'horloges du commerce [Hübner, 1979]. Quatre fois par an en moyenne, on effectuait un étalonnage de fréquence de TA(PTB) à l'aide de l'étalon primaire CsI. Depuis que CsI fonctionne en permanence, c'est-à-dire depuis 1978, TA(PTB) est déduit directement de l'étalon primaire. Les paramètres de fonctionnement les plus importants de CsI sont mesurés à intervalles réguliers. L'inversion du faisceau est effectuée toutes les cinq à six semaines [Becker, 1979]. Depuis 1978, la différence de fréquence relative entre l'échelle de temps atomique TA(NRC) du National Research Council du Canada et l'échelle de temps atomique TA(PTB), toutes deux déduites directement d'étalons primaires, est demeurée inférieure à 7×10^{-14} sur une moyenne de 80 jours.

3. Temps atomique international (TAI)

Jusqu'au mois d'août 1973, le TAI a été formé par la moyenne de 7 temps atomiques locaux indépendants. Becker et Hubner [1973] ont étudié la pondération de ces échelles; plusieurs méthodes de pondération ont été essayées par ces auteurs et également par le Bureau international de l'heure (BIH) [Granveaud et Guinot, 1972]. En raison des difficultés liées à l'assignation de poids aux échelles de temps, le BIH, en juin 1973, a commencé à utiliser directement les données fournies par les horloges elles-mêmes, avec une méthode de prévision et de pondération qui est décrite dans le Rapport annuel du BIH pour 1973. Depuis le 1^{er} janvier 1977, on applique une procédure de pilotage destinée à assurer la concordance entre l'unité d'échelle du TAI et les réalisations de la seconde SI au niveau de la mer (voir le Rapport annuel du BIH pour 1977).

Au début de 1981, le BIH a décidé de modifier les règles de pondération des horloges participant au TAI; une sélection plus sévère des horloges a été introduite. Le détail de cette nouvelle pondération est donné dans le Rapport annuel du BIH pour 1981.

Le BIH a étudié, pour le type d'algorithme du TAI, le problème des entrées/sorties d'horloges; il a montré qu'elles apportent un bruit faible mais non négligeable de l'ordre de 1×10^{-14} pour une période d'échantillonnage de 50 jours [Granveaud, 1982].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLAN, D. W., GLAZE, D. J., MACHLAN, H. E., WAINWRIGHT, A. E., HELLWIG, H., BARNES, J. A. et GREY, J. E. [12-14 juin 1973] Proc. 27th Annual Symposium on Frequency Control, (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703, Etats-Unis d'Amérique), 334 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- ALLAN, D. W. et GREY, J. E. [1971] Comments on the October 1970 Metrologia paper «The US Naval Observatory clock time reference and the performance of sample atomic clocks». *Metrologia*, Vol. 7, 79.
- ALLAN, D., HELLWIG, H. et GLAZE, D. [1975] An accuracy algorithm for an atomic time scale. *Metrologia*, Vol. 11, 133-138.
- AZOUBIB, J., GRANVEAUD, M. et GUINOT, B. [1977] Estimation of the scale unit duration of time scales. *Metrologia*, Vol. 13, 87.
- BECKER, G. [1979] Das Cäsium-Zeit-und Frequenznormal CS1 der PTB als primäre Uhr (Utilisation comme horloge primaire de l'étalon de temps et de fréquence CS1 au césium du PTB), 10^e Congrès international de chronométrie, Genève, Vol. 2, 33-40.
- BECKER, G. et HUBNER, U. [1973] Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) Annual Report for 1972, 125.
- CHUANG, C. H. et JAIR, T. C. [1980 et 1981] Atomic Time and Frequency standards development at Shanghai Observatory Chine. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 3, 158-162 and Vol. IM-30, 1, 80.
- DAVIS, D., WEISS, M., CLEMENTS, A. et ALLAN, D. [décembre 1981] Unprecedented syntonization and synchronization accuracy via simultaneous viewing with GPS receivers and construction characteristics of an NBS/GPS receiver. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 527-547.
- GANTER, W. [1973] NBS Tech. Note N° 636, Boulder, CO, Etats-Unis d'Amérique.
- GIBBS, J. E. [1980] Towards a United Kingdom atomic time scale. DES Memorandum N° 33, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW11 OLW, Angleterre.
- GRANVEAUD, M. [24-25 juin 1982] Response of TAI-like algorithms to random and non-random variations, Proc. 2nd Symposium on Atomic Time Scale Algorithms. Boulder, CO, Etats-Unis d'Amérique.
- GRANVEAUD, D. M. et GUINOT, B. [1972] Atomic time scales. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-21, 4, 396.
- HÜBNER, U. [1979] Der Algorithmus zur Berechnung der gesetzlichen Zeitskala der Bundesrepublik Deutschland (L'algorithme de calcul de l'échelle de temps légale de la République fédérale d'Allemagne), 10^e Congrès international de chronométrie, Genève, Vol. 2, 71-75.
- IMAE, M. [1979] A technique of mean atomic time scale generation by caesium clocks. *Rev. Radio Res. Labs., Japan*, Vol. 25, 49-57.
- JONES, R. et TRYON, P. V. [janvier-février 1983] Estimating time from atomic clocks. *NBS J. of Research*, Vol. 80, 17-24.
- MUNGALL, A. G. [1971] Atomic time scales. *Metrologia*, Vol. 7, 146.
- MUNGALL, A. G. et COSTAIN, C. C. [1983] Performance of the four NRC long-beam primary cesium clocks CsV, CsVIA, CsVIB and CsVIC. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-32, 1, 224-227.
- RRL [1978] Radio Research Laboratories, (Japon). Standard frequency and time service bull., Annual Report for 1978.
- SHAANXI OBSERVATORY [octobre 1979] Bulletin du service des fréquences étalon et des signaux horaires.
- STEIN, S., GLAZE, D., LEVINE, J., GRAY, J., HILLIARD, D., HOWE, D. et ERB, L. [juin 1982] Performance of an automated high accuracy phase measurement system. Proc. 36th Annual Symposium on Frequency Control, (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) 314-321 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- WINKLER, G. M. R., HALL, R. G. et PERCIVAL, D. B. [octobre 1970] The US Naval Observatory clock time reference and the performance of sample atomic clocks. *Metrologia*, Vol. 6, 126.
- YOSHIMURA, K. [1972] Technical Note N° 626, Boulder, CO, Etats-Unis d'Amérique.
- YOSHIMURA, K. [1980] Calculation of unbiased clock-variances in uncalibrated atomic time scale algorithms. *Metrologia*, Vol. 16, 133-139.

RAPPORT 580-2

CARACTÉRISATION DU BRUIT DE FRÉQUENCE ET DE PHASE

(Programme d'études 3B/7)

(1974-1978-1986)

1. Introduction

Les techniques permettant de caractériser et de mesurer les instabilités de fréquence et de phase des générateurs de fréquence et des signaux radioélectriques reçus ont une importance fondamentale pour les utilisateurs des étalons de fréquences et de signaux horaires.

En 1964 a été créé un sous-comité «Stabilité de fréquence» au sein du 14^e Comité des étalons de l'IEEE; par la suite, en 1966, il a été placé au sein du Comité technique fréquence et temps de la Société «Instrumentation et Mesure» (SIM) pour préparer une norme de l'IEEE sur la stabilité de fréquence. En 1969, ce sous-comité a publié un document dans lequel sont proposées des définitions pour les mesures des instabilités de fréquence et de phase des générateurs de fréquence. Les mesures recommandées ont été en général acceptées par les utilisateurs de fréquences et de signaux horaires du monde entier. Certains des grands constructeurs spécifient maintenant l'instabilité de leurs étalons en utilisant les paramètres recommandés.

Les modèles d'instabilité peuvent comprendre des processus aléatoires stationnaires et non stationnaires ainsi que des processus systématiques. En ce qui concerne les processus aléatoires apparents, des progrès considérables ont été faits [IEEE-NASA, 1964; IEEE, 1972] pour caractériser ces processus à l'aide de modèles statistiques. En revanche, on ne doit pas établir de modèles statistiques pour les changements systématiques de fréquences tels que les dérives, mais ces processus doivent être décrits sous une forme analytique convenable à partir de mesures effectuées par rapport à un étalon de référence approprié, par exemple par une régression linéaire pour déterminer un modèle de dérive de fréquence linéaire. Le partage entre les composantes systématiques et les composantes aléatoires n'est ni toujours facile, ni toujours évident. Les effets systématiques deviennent en général prédominants à long terme et il est donc extrêmement important de les spécifier de manière à obtenir une caractérisation complète de la stabilité du signal. Le présent Rapport indique les méthodes pour caractériser les processus aléatoires et certains des types importants de processus systématiques.

Depuis lors, d'autres travaux intéressants ont été faits. Par exemple, Baugh [1971] a utilisé les propriétés de la variance de Hadamard — une méthode d'évaluation dans le domaine temporel des bandes latérales discrètes de modulation de fréquence — qui est particulièrement utile pour les fréquences de Fourier inférieures à 10 Hz environ; une analyse mathématique de cette technique a été effectuée par Sauvage et Rutman [1973]. Rutman [1972] a suggéré d'autres mesures dans le domaine temporel tout en approuvant d'une façon générale les recommandations du sous-comité. De Prins et autres [1969] et De Prins et Cornelissen [1971] ont proposé d'autres mesures des instabilités de fréquence dans le domaine fréquentiel, en insistant particulièrement sur les moyennes d'échantillon de spectres discrets. Le Chapitre 8 d'une monographie du National Bureau of Standards est consacré aux «Propriétés statistiques de l'analyse des données temps-fréquence» [Blair, 1974]. Ce chapitre expose des méthodes de mesures et des applications des mesures des instabilités de fréquence et de phase des générateurs de fréquence dans les domaines fréquentiel et temporel. On y indique également les méthodes de conversion entre différentes mesures de stabilité de fréquence ainsi que les relations de conversion entre les différentes mesures du domaine fréquentiel au domaine temporel et vice versa. L'effet du nombre fini de mesures sur la précision de la détermination de la variance à deux échantillons a pu être spécifié [Lesage et Audoin, 1973, 1974 et 1976]; [Yoshimura, 1978]. Des modèles du type Box-Jenkins ont été appliqués à l'interprétation des mesures de la stabilité de fréquence [Barnes, 1976; Percival, 1976]; ces modèles ont ensuite été révisés [Winkler, 1976].

Lindsey et Chie [1976] ont généralisé la valeur efficace de l'écart de fréquence normé et la variance à deux échantillons en vue d'obtenir une gamme plus large de mesures de la stabilité des oscillateurs dans le domaine temporel. Ils ont mis au point des mesures qui caractérisent l'instabilité aléatoire de la phase dans le domaine temporel et la stabilité de fréquence du signal d'un oscillateur, en utilisant les fonctions de structure de Kolmogorov. Ces mesures sont reliées à la mesure de la stabilité dans le domaine fréquentiel $S_y(f)$ par l'intermédiaire de la transformée de Mellin. Avec cette théorie, on tient compte des dérives de type polynômial, ce qui permet de résoudre en partie certains problèmes théoriques de convergence dus au spectre du type lois de puissance. Les auteurs montrent aussi le rapport étroit de ces mesures avec la valeur efficace de l'écart normé [Cutler et Searle, 1966] et avec la variance à deux échantillons [Allan, 1966]. Enfin, ils montrent que d'autres paramètres provenant de l'ensemble de mesures de la stabilité qui ont été mises au point sont importants pour évaluer la qualité de fonctionnement et définir les spécifications des systèmes pour des applications telles que le radar, les communications et l'ingénierie des systèmes de poursuite.

D'autres types de variance à nombre d'échantillons limité ont été examinés [Baugh, 1971; Lesage et Audoin, 1975; Boileau et Picinbono, 1976] et une revue des méthodes classiques et nouvelles a été publiée [Rutman, 1978].

Les instabilités de fréquence et de phase peuvent être caractérisées par des processus aléatoires qui peuvent être représentés sous forme statistique soit dans le domaine fréquentiel de Fourier, soit dans le domaine temporel [Blackman et Tukey, 1959]. On a les relations suivantes entre l'écart de fréquence normé instantané $y(t)$ par rapport à la fréquence nominale ν_0 et la fluctuation de la phase instantanée $\varphi(t)$ autour de la phase nominale $2\pi\nu_0 t$:

$$y(t) \equiv \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi\nu_0} \quad (1)$$

$$x(t) = \frac{\varphi(t)}{2\pi\nu_0}$$

où $x(t)$ est la variation de phase exprimée en unités de temps.

2. Domaine fréquentiel de Fourier

Dans le domaine fréquentiel de Fourier, la stabilité de fréquence peut être définie par plusieurs densités spectrales unilatérales (la fréquence de Fourier va de 0 à ∞) telles que:

$$S_y(f) \text{ de } y(t), S_\varphi(f) \text{ de } \varphi(t), S_{\dot{\varphi}}(f) \text{ de } \dot{\varphi}(t), S_x(f) \text{ de } x(t), \text{ etc.}$$

Il existe entre ces densités spectrales les relations suivantes:

$$S_y(f) = \frac{f^2}{\nu_0^2} S_\varphi(f) \quad (2)$$

$$S_{\dot{\varphi}}(f) = 4\pi^2 f^2 S_\varphi(f) \quad (3)$$

$$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi\nu_0)^2} S_\varphi(f) \quad (4)$$

Les densités spectrales à loi de puissance constituent souvent des modèles utiles pour décrire les fluctuations aléatoires dans les oscillateurs de précision. Dans la pratique, on a observé que ces fluctuations aléatoires se composent de cinq processus de bruit indépendants. On aura donc l'expression:

$$S_y(f) = \begin{cases} \sum_{\alpha=-2}^{+2} h_\alpha f^\alpha & \text{pour } 0 < f < f_h \\ 0 & \text{pour } f > f_h \end{cases} \quad (5)$$

où les valeurs de h_α sont des constantes, celles de α sont des nombres entiers et f_h est la fréquence de coupure supérieure d'un filtre passe-bas. Les formules (2), (3) et (4) sont correctes et cohérentes pour les bruits stationnaires, y compris le bruit de phase. On élimine la divergence pour les hautes fréquences par le filtrage introduit dans la formule (5). L'identification et la caractérisation des cinq processus de bruit sont indiquées dans le Tableau I et représentées sur la Fig. 1. En pratique, deux ou trois processus de bruit seulement suffisent à décrire les fluctuations de fréquence aléatoires d'un oscillateur donné; les autres peuvent être négligés.

3. Domaine temporel

L'instabilité aléatoire de fréquence dans le domaine temporel peut être définie par des variances d'échantillon. La mesure recommandée est l'écart type à deux échantillons, qui est la racine carrée de la variance à deux échantillons à temps mort nul $\sigma_y^2(\tau)$ [von Neumann et autres, 1941; Allan, 1966; Barnes et autres, 1971]:

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2} \right\rangle \quad (6)$$

où:

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt = \frac{x_{k+1} - x_k}{\tau} \quad \text{et} \quad t_{k+1} = t_k + \tau \quad (\text{échantillons adjacents})$$

$\langle \rangle$ indique une moyenne calculée sur un temps infini. x_k et x_{k+1} sont des mesures résiduelles de temps effectuées aux instants t_k et $t_{k+1} = t_k + \tau$, avec $k = 0, 1, 2, \dots$, $1/\tau$ étant le taux d'échantillonnage fixe qui donne un temps mort nul entre les mesures de fréquence. Par le terme «résiduelles», on entend que les effets systématiques connus sont éliminés.

Si l'on définit le taux d'échantillonnage initial par $1/\tau_0$, on a alors montré [Howe et autres, 1981] qu'en général on peut obtenir une meilleure évaluation de $\sigma_y(\tau)$ en utilisant ce qu'on appelle des «évaluations de recouvrement». Cette évaluation est obtenue au moyen de l'expression (7).

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2m} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i)^2 \quad (7)$$

où N est le nombre de mesures des écarts de temps espacées de τ_0 ($N = M + 1$ où M est le nombre de mesures de fréquence de durée d'échantillon τ_0) et $\tau = m\tau_0$. Les intervalles de confiance correspondants [Howe et autres, 1981], qui sont traités au § 6, sont inférieurs à ceux que l'on obtient en utilisant l'expression (12) et l'évaluation est encore non biaisée.

S'il existe un temps mort entre les mesures d'écart de fréquence et si on ne tient pas compte de ce fait lors du calcul de l'expression (6), on a montré que les valeurs de stabilité qu'on a déterminées (qui ne sont plus des variances d'Allan), seront biaisées (sauf pour le bruit blanc de fréquence) étant donné que les mesures de fréquence ont été regroupées pour évaluer la stabilité pour $m\tau_0$ ($m > 1$). Ce biais a été étudié et des tables pour sa correction, publiées [Barnes, 1969; Lesage, 1983].

Si l'on représente $\sigma_y(\tau)$ en fonction de τ pour un étalon de fréquence, on obtient les éléments représentés schématiquement sur la Fig. 1. La première composante avec $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1/2}$ (bruit blanc de fréquence) et/ou $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1}$ (bruit blanc ou scintillation de phase) représente les caractéristiques fondamentales de bruit de l'étalon. Dans le cas où $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1}$, il n'est pas commode de déterminer de façon pratique si l'oscillateur est perturbé par du bruit blanc de phase ou du bruit de scintillement de phase. D'autres techniques sont proposées ci-dessous. Il s'agit là d'une limitation de l'utilité de $\sigma_y(\tau)$ lorsque l'on cherche à étudier la nature des sources de bruit présentes dans l'oscillateur. Une analyse dans le domaine fréquentiel est plus appropriée pour les fréquences de Fourier supérieures à environ 1 Hz. Cette loi en τ^{-1} et/ou $\tau^{-1/2}$ continue lorsque la durée d'intégration augmente, jusqu'à ce que le «palier» de scintillation soit atteint, où $\sigma_y(\tau)$ est indépendant de τ . Ce comportement est observé pour presque tous les étalons de fréquence; il dépend de l'étalon de fréquence donné mais on ne connaît pas encore bien les origines physiques de ce phénomène. Parmi les causes probables de ce «palier» de scintillation, on peut citer les fluctuations de tension d'alimentation, les fluctuations du champ magnétique, les changements dans les composants de l'étalon et les modifications dans la puissance hyperfréquence. Finalement, on voit d'après la courbe que la stabilité se dégrade lorsque la durée d'intégration augmente. Cela se produit en règle générale pour des durées allant de quelques heures à plusieurs jours, selon le type de l'étalon.

On a [Allan et Barnes, 1981] mis au point une «variance d'Allan modifiée», $MOD \sigma_y^2(\tau)$ qui a la propriété de donner des fonctions de τ différentes pour du bruit blanc de phase et du bruit de scintillation de phase. Les fonctions $MOD \sigma_y(\tau)$ sont respectivement $\tau^{-3/2}$ et τ^{-1} . Les relations entre $\sigma_y(\tau)$ et $MOD \sigma_y(\tau)$ ont aussi expliquées dans [Allan et Barnes, 1981; IEEE, 1983; Lesage et Ayi, 1984]. $MOD \sigma_y(\tau)$ est évalué en utilisant l'expression suivante:

$$MOD \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2 m^2 (N-3m+1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left[\sum_{i=j}^{m+j-1} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i) \right]^2 \quad (8)$$

où N est le nombre de mesures de temps espacé de τ_0 et $\tau = m\tau_0$ la durée d'échantillonnage. Les propriétés de l'évaluation et la confiance qu'on peut avoir en elle sont examinées dans [Lesage et Ayi, 1984]. Jones et Tyron [1983] et Barnes et autres [1982] ont mis au point des méthodes pour approcher au maximum la réalité de l'évaluation de $\sigma_y(\tau)$ pour des modèles particuliers de bruit blanc de fréquence et de bruit de fréquence à trajet aléatoire qui sont apparus comme de bons modèles pour une durée d'observation supérieure à quelques secondes dans le cas des étalons à jet de césium.

4. Conversion entre les domaines fréquentiel et temporel

En règle générale, si la densité spectrale de la fluctuation de la fréquence normée $S_y(f)$ est connue, on peut calculer la variance à deux échantillons en utilisant l'expression suivante [Barnes et autres, 1971; Rutman, 1972]:

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^4 \pi \tau f}{(\pi \tau f)^2} df \quad (9)$$

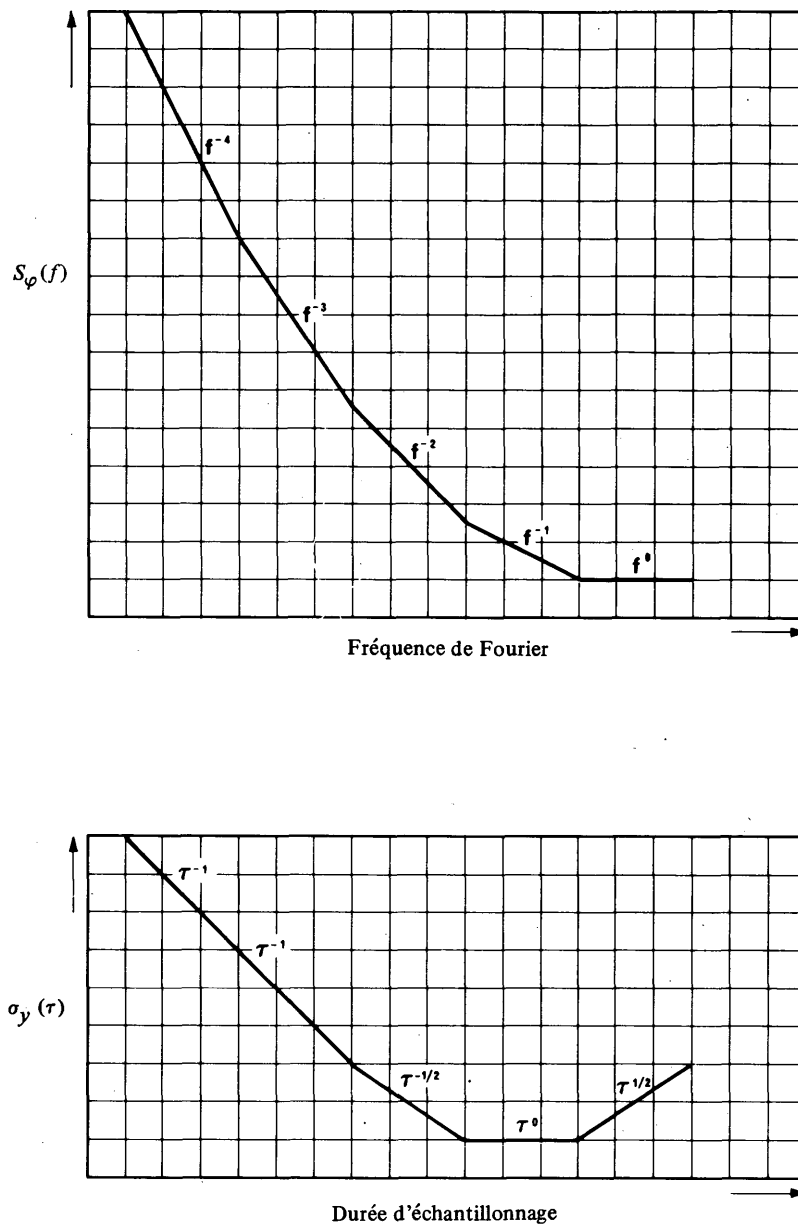


FIGURE 1 — Caractéristiques de pente des cinq processus de bruit indépendants à densités spectrales en lois de puissance (échelles logarithmiques)

Plus précisément, en ce qui concerne le modèle en loi de puissance donné par l'expression (5), la mesure dans le domaine temporel suit également une loi de puissance, établie par Cutler à partir des expressions (5) et (9):

$$\sigma_y^2(\tau) = h_{-2} \frac{(2\pi)^2}{6} \tau + h_{-1} 2 \log_e 2 + h_0 \frac{1}{2\tau} + h_1 \frac{1,038 + 3 \log_e (2\pi f_h \tau)}{(2\pi)^2 \tau^2} + h_2 \frac{3f_h}{(2\pi)^2 \tau^2} \quad (10)$$

Note. — Le facteur 1,038 dans le quatrième terme de l'équation (10) est différent de la valeur donnée dans la plupart des publications antérieures.

Les valeurs de h_α sont des caractéristiques du bruit de fréquence de l'oscillateur. On remarquera que pour les valeurs entières de α (comme c'est semble-t-il souvent le cas), on a $\mu = -\alpha - 1$ pour $-3 \leq \alpha \leq 1$, et $\mu \sim -2$, pour $\alpha \geq 1$, avec $\sigma_y^2(\tau) \sim \tau^\mu$.

Ces relations de conversion ont été vérifiées expérimentalement [Brandenberger et autres, 1971] et par le calcul [Chi, 1977]. Le Tableau II donne les coefficients de la conversion entre les mesures de la stabilité de fréquence, du domaine temporel au domaine fréquentiel et du domaine fréquentiel au domaine temporel.

Les caractéristiques de pente des cinq processus de bruit indépendants sont représentées dans les domaines fréquentiel et temporel sur la Fig. 1 (échelles logarithmiques).

5. Techniques de mesure

La densité spectrale des fluctuations de phase $S_\phi(f)$ peut être mesurée de manière approximative à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase et d'un analyseur d'onde à basse fréquence [Meyer, 1970; Walls et autres, 1976]. Un mélangeur à double équilibrage sert de détecteur de phase dans une boucle à verrouillage de phase légèrement couplée. Le système de mesure emploie les composants électroniques disponibles les plus modernes. On prend également comme référence un très bon oscillateur. Pour les très basses fréquences de Fourier (bien en dessous de 1 Hz), on a eu recours à des techniques numériques [Atkinson et autres, 1963; De Prins et autres, 1969; Babitch et Oliverio, 1974]. De nouvelles méthodes de mesure de la stabilité de temps (phase) et de fréquence ont été élaborées et donnent une précision de ± 1 picoseconde [Allan et Daams, 1975]. On a également mis au point des méthodes permettant de mesurer la densité spectrale du bruit de phase avec une sensibilité de 30 dB supérieure à celle que l'on obtenait avec les techniques antérieures [Walls et autres, 1976].

Plusieurs systèmes de mesure comportant des compteurs de fréquence peuvent être utilisés pour déterminer la stabilité dans le domaine temporel avec ou sans temps mort de mesure [Allan, 1974; Allan et Daams, 1975]. Un système sans compteur a aussi été développé [Rutman, 1974; Rutman et Sauvage, 1974]. Les mesures de fréquence sans temps mort peuvent être faites par échantillonnage des intervalles de temps plutôt que par mesure directe de la fréquence. On a également examiné les problèmes que l'on rencontre en présence de temps mort entre mesures de fréquences et on a recommandé certaines solutions pour résoudre ces problèmes [Blair, 1974; Allan et Daams, 1975; Ricci et Peregrino, 1976]. Gros Lambert et autres [1974] ont mesuré les spectres discrets.

6. Limites de confiance des mesures dans le domaine temporel

Une méthode d'acquisition de données consiste à mesurer les variations de temps x_j à des intervalles τ_0 . Par cette méthode, $\sigma_y(\tau)$ peut être estimé pour toute valeur de $\tau = n\tau_0$ (n est un nombre entier positif), étant donné que l'on peut employer les valeurs x_j pour lesquelles j est égal à nk . On peut faire une estimation de $\sigma_y(\tau)$ à partir d'un ensemble de données avec un nombre M de mesures de $\bar{y}_j$, en procédant de la manière suivante:

$$\hat{\sigma}_y(n\tau_0) = \hat{\sigma}_y(\tau) \cong \left| \frac{1}{2(M-1)} \sum_{j=1}^{M-1} (\bar{y}_{j+1} - \bar{y}_j)^2 \right|^{1/2} \quad (11)$$

ou sous une forme équivalente:

$$\hat{\sigma}_y(\tau) \cong \left| \frac{1}{2\tau^2(M-1)} \sum_{j=1}^{M-1} (x_{j+2} - 2x_{j+1} + x_j)^2 \right|^{1/2} \quad (12)$$

Ainsi, on peut établir d'une manière très simple, à partir d'un seul ensemble de mesures, la variation de $\sigma_y(\tau)$ en fonction de τ . Pour un ensemble de mesures donné, il est évident que M diminue à mesure que n augmente.

Pour un bruit de type gaussien, l'intervalle de confiance (ou la limite d'erreur) d'une valeur particulière de $\sigma_y(\tau)$ obtenue à partir d'un nombre fini d'échantillons est donné par [Lesage et Audoin, 1973]:

$$\text{Intervalle de confiance } I_\alpha \cong \sigma_y(\tau) \cdot \kappa_\alpha \cdot M^{-1/2} \text{ pour } M > 10 \quad (13)$$

où:

M : nombre total de mesures utilisées pour l'estimation,

α : valeur définie dans la section précédente,

$\kappa_2 = \kappa_1 = 0,99$,

$\kappa_0 = 0,87$,

$\kappa_{-1} = 0,77$,

$\kappa_{-2} = 0,75$.

A titre d'exemple, pour un modèle gaussien avec $M = 100$, $\alpha = -1$ (bruit de scintillation de fréquence) et $\sigma_y(\tau = 1 \text{ seconde}) = 10^{-12}$, on peut écrire:

$$I_\alpha \simeq \sigma_y(\tau) \cdot \kappa_\alpha \cdot M^{-1/2} = \sigma_y(\tau) \cdot (0,77) \cdot (100)^{-1/2} = \sigma_y(\tau) \cdot (0,077) \quad (14)$$

ce qui donne:

$$\sigma_y(\tau = 1 \text{ seconde}) = (1 \pm 0,08) \times 10^{-12} \quad (15)$$

Une autre méthode d'estimation incluant notamment le temps mort entre paires de mesures a également été mise au point [Yoshimura, 1978]. Elle fait apparaître l'influence de l'autocorrélation des fluctuations de fréquence.

7. Conclusion

Les méthodes statistiques qui permettent de décrire l'instabilité de fréquence et de phase ainsi que le modèle correspondant de densité spectrale en loi de puissance suffisent à décrire l'instabilité à court terme de l'oscillateur. L'expression (9) montre que la densité spectrale peut être convertie, sans introduire aucune ambiguïté en une mesure temporelle. Toutefois, l'inverse n'est pas vrai dans tous les cas, mais il est vrai pour les spectres à loi de puissance souvent utilisés pour établir des modèles d'oscillateurs de précision.

Le modèle décrit ne traite pas les variations non aléatoires. Elles peuvent être soit périodiques, soit systématiques. Les variations périodiques devront être analysées grâce aux méthodes connues d'analyse harmonique. Quant aux variations systématiques, elles sont décrites par une dérive linéaire ou d'un ordre supérieur.

TABLEAU I — Caractéristiques fonctionnelles des cinq processus de bruit indépendants pour l'instabilité de fréquence des oscillateurs

Description du processus de bruit	Caractéristiques de pente de la courbe log log			
	Domaine fréquentiel		Domaine temporel	
	$S_y(f)$	$S_\phi(f)$ ou $S_x(f)$	$\sigma^2(\tau)$	$\sigma(\tau)$
	α	$\beta \equiv \alpha - 2$	μ	$\mu/2$
Bruit de fréquence à marche aléatoire	-2	-4	1	1/2
Bruit de scintillation de fréquence	-1	-3	0	0
Bruit blanc de fréquence	0	-2	-1	-1/2
Bruit de scintillation de phase	1	-1	-2	-1
Bruit blanc de phase	2	0	-2	-1

$$S_y(f) = h_\alpha f^\alpha$$

$$S_\phi(f) = v_0^2 h_\alpha f^{\alpha-2} = v_0^2 h_\alpha f^\beta \quad (\beta \equiv \alpha - 2)$$

$$S_x(f) = \frac{1}{4\pi^2} h_\alpha f^{\alpha-2} = \frac{1}{4\pi^2} h_\alpha f^\beta$$

$$\sigma^2(\tau) \sim |\tau|^\mu$$

$$\sigma(\tau) \sim |\tau|^{\mu/2}$$

TABLEAU II — Conversion des mesures de stabilité de fréquence entre les densités spectrales dans le domaine fréquentiel et la variance dans le domaine temporel et vice versa (pour $2\pi f_h \tau \gg 1$)

Description du processus de bruit	$\sigma_y^2(\tau) =$	$S_y(f) =$	$S\phi(f) =$
Bruit de fréquence à marche aléatoire	$A [f^2 S_y(f)] \tau^1$	$\frac{1}{A} [\tau^{-1} \sigma_y^2(\tau)] f^{-2}$	$\frac{V_0^2}{A} [\tau^{-1} \sigma_y^2(\tau)] f^{-4}$
Bruit de scintillation de fréquence	$B [f S_y(f)] \tau^0$	$\frac{1}{B} [\tau^0 \sigma_y^2(\tau)] f^{-1}$	$\frac{V_0^2}{B} [\tau^0 \sigma_y^2(\tau)] f^{-3}$
Bruit blanc de fréquence	$C [f^0 S_y(f)] \tau^{-1}$	$\frac{1}{C} [\tau^1 \sigma_y^2(\tau)] f^0$	$\frac{V_0^2}{C} [\tau^1 \sigma_y^2(\tau)] f^{-2}$
Bruit de scintillation de phase	$D [f^{-1} S_y(f)] \tau^{-2}$	$\frac{1}{D} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^1$	$\frac{V_0^2}{D} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^{-1}$
Bruit blanc de phase	$E [f^{-2} S_y(f)] \tau^{-2}$	$\frac{1}{E} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^2$	$\frac{V_0^2}{E} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^0$

$$A = \frac{4\pi^2}{6} \qquad D = \frac{1,038 + 3 \log_e (2\pi f_h \tau)}{4\pi^2}$$

$$B = 2 \log_e 2 \qquad E = \frac{3f_h}{4\pi^2}$$

$$C = 1/2$$

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLAN, D. W. [février 1966] Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 221-230.

ALLAN, D. W. [décembre 1974] The measurement of frequency and frequency stability of precision oscillators. Proc. 6th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting NASA/DOD (US Naval Research Laboratory, Washington, DC) 109-142.

ALLAN, D. W. et BARNES, J. A. [mai 1981] A modified «Allan Variance» with increased oscillator characterization ability. Proc. 53th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 470-476. Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique.

ALLAN, D. W. et DAAMS, H. [mai 1975] Picosecond time difference measurement system. Proc. of the 29th Annual Symposium on Frequency Control, 404-411.

ATKINSON, W. K., FEY, L. et NEWMAN, J. [février 1963] Spectrum analysis of extremely low-frequency variations of quartz oscillators. *Proc. IEEE*, Vol. 51, 2, 379.

BABITCH, D. et OLIVERIO, J. [1974] Phase noise of various oscillators at very low Fourier frequencies. Proc. of the 28th Annual Symposium on Frequency Control, 150-159.

BARNES, J. A. [janvier 1969] Tables of bias functions, B_1 and B_2 , for variances based on finite samples of processes with power law spectral densities. Tech. Note No. 375. National Bureau of Standards, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.

BARNES, J. A. [août 1976] Models for the interpretation of frequency stability measurements. NBS Technical Note 683.

BARNES, J. A., CHI, A. R., CUTLER, L. S., HEALEY, D. J., LEESON, D. B., MCGUNIGAL, T. E., MULLEN, J. A., SMITH, W. L., SYDNOR, R., VESSOT, R. F. et WINKLER, G. M. R. [mai 1971] Characterization of frequency stability. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-20, 105-120.

BARNES, J. A., JONES, R. H., TRYON, P. V., et ALLAN, D. W. [décembre 1982] Noise models for atomic clocks. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 295-307.

BAUGH, R. A. [1971] Frequency modulation analysis with the Hadamard variance. Proc. 25th Annual Symposium on Frequency Control, 222-225.

BLACKMAN, R. B. et TUKEY, J. M. [1959] The measurement of power spectra. (Dover Publication, Inc., New York, NY).

- BLAIR, B. E. (Ed.) [mai 1974] Time and frequency: theory and fundamentals. NBS Monograph No. 140. (US Government Printing Office, Washington, DC 20402).
- BOILEAU, E. et PICINBONO, B. [mars 1976] Statistical study of phase fluctuations and oscillator stability. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. 25, 1, 66-75.
- BRANDENBERGER, H., HADORN, F., HALFORD, D. et SHOAF, J. H. [1971] High quality quartz crystal oscillators: frequency-domain and time-domain stability. Proc. 25th Annual Symposium on Frequency Control, 226-230.
- CHI, A. R. [décembre 1977] The mechanics of translation of frequency stability measures between frequency and time-domain measurements. Proc., 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, MD, Etats-Unis d'Amérique.
- CUTLER, L. S. et SEARLE, C. L. [février 1966] Some aspects of the theory and measurement of frequency fluctuations in frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 136-154.
- DE PRINS, J. et CORNELISSEN, G. [octobre 1971] Analyse spectrale discrète. Eurocon (Lausanne, Suisse).
- DE PRINS, J., DESCORNET, G., GORSKI, M. et TAMINE, J. [décembre 1969] Frequency-domain interpretation of oscillator phase stability. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-18, 251-261.
- GROSLAMBERT, J., OLIVIER, M. et UEBERSFELD, J. [décembre 1974] Spectral and short-term stability measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 4, 518-521.
- HOWE, D. A., ALLAN, D. W., et BARNES, J. A. [mai 1981] Properties of signal sources and measurement methods. Proc. 35th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA, Etats-Unis d'Amérique (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) 669-717 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- IEEE [mai 1972] Special issue on time and frequency. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 5.
- IEEE [1983] *Frequency Stability: Fundamentals and Measurement*, 77-80. Ed. V. F. Kroupa. IEEE Press Books.
- IEEE-NASA [novembre 1964] Proceedings of Symposium on short-term frequency stability. NASA Publication SP 80.
- JONES, R. H. et TRYON, P. V. [janvier-février 1983] Estimating time from atomic clocks. *NBS J. Res.*, Vol. 88, 1, 17-24.
- LESAGE, P. [1983] Characterization of frequency stability: Bias due to the juxtaposition of time interval measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-32, 1, 204-207.
- LESAGE, P. et AUDOIN, F. [juin 1973] Characterization of frequency stability: uncertainty due to the finite number of measurements. *IEEE Trans. on Instr. Meas.*, Vol. IM-22, 1, 103.
- LESAGE, P. et AUDOIN, C. [mars 1974] Correction to: Characterization of frequency stability: uncertainty due to finite number of measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 1, 103.
- LESAGE, P. et AUDOIN, F. [mai 1975] A time domain method for measurement of the spectral density of frequency fluctuations at low Fourier frequencies. Proc. of the 29th Annual Symposium on Frequency Control, 394-403.
- LESAGE, P. et AUDOIN, C. [septembre 1976] Correction to: Characterization of frequency stability: uncertainty due to the finite number of measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 3.
- LESAGE, P. et AYI, T. [décembre 1984] Characterization of frequency stability: Analysis of modified Allan variance and properties of its estimate. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-33, 4, 332-336.
- LINDSEY, W. C. et CHIE, C. M. [décembre 1976] Theory of oscillator instability based upon structure functions. *Proc. IEEE*, Vol. 64, 1662-1666.
- MEYER, D. G. [novembre 1970] A test set for the accurate measurements of phase noise on high-quality signal sources. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-19, 215-227.
- PERCIVAL, D. B. [juin 1976] A heuristic model of long-term atomic clock behavior. Proc. of the 30th Annual Symposium on Frequency Control.
- RICCI, D. W. et PEREGRINO, L. [juin 1976] Phase noise measurement using a high resolution counter with on-line data processing. Proc. of the 30th Annual Symposium on Frequency Control.
- RUTMAN, J. [février 1972] Comment on characterization of frequency stability. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-21, 2, 85.
- RUTMAN, J. [mars 1974] Characterization of frequency stability: a transfer function approach and its application to measurements via filtering of phase noise. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 1, 40-48.
- RUTMAN, J. [septembre 1978] Characterization of phase and frequency instabilities in precision frequency sources: fifteen years of progress. *Proc. IEEE*, Vol. 66, 9, 1048-1075.
- RUTMAN, J. et SAUVAGE, G. [décembre 1974] Measurement of frequency stability in the time and frequency domains via filtering of phase noise. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 4, 515, 518.
- SAUVAGE, G. et RUTMAN, J. [juillet-août 1973] Analyse spectrale du bruit de fréquence des oscillateurs par la variance de Hadamard. *Ann. des Télécom.*, Vol. 28, 7-8, 304-314.
- VON NEUMANN, J., KENT, R. H., BELLINSON, H. R. et HART, B. I. [1941] The mean square successive difference. *Ann. Math. Stat.*, 12, 153-162.
- WALLS, F. L., STEIN, S. R., GRAY, J. E. et GLAZE, D. J. [juin 1976] Design considerations in state-of-the-art signal processing and phase noise measurement systems. Proc. of the 30th Annual Symposium on Frequency Control.
- WINKLER, G. M. R. [décembre 1976] A brief review of frequency stability measures. Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (US Naval Research Laboratory, Washington, DC), 489-528.
- YOSHIMURA, K. [mars 1978] Characterization of frequency stability: Uncertainty due to the autocorrelation of the frequency fluctuations. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, IM-27, 1, 1-7.

BIBLIOGRAPHIE.

- ALLAN, D. W. et autres [1973] Performance, modeling and simulation of some cesium beam clocks. *Proc. 27th Annual Symposium on Frequency Control*, 334-346.
- FISCHER, M. C. [décembre 1976] Frequency stability measurement procedures. *Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting* (US Naval Research Laboratory, Washington, DC), 575-618.
- HALFORD, D. [mars 1968] A general mechanical model for $|f|^\alpha$ spectral density noise with special reference to flicker noise $1/|f|$. *Proc. IEEE* (Corres.), Vol. 56, 3, 251-258.
- MANDELROT, B. [avril 1967] Some noises with $1/f$ spectrum, a bridge between direct current and white noise. *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. IT-13, 2, 289-298.
- RUTMAN, J. et UEBERSFELD, J. [février 1972] A model for flicker frequency noise of oscillators. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 2, 233-235.
- VANIER, J. et TETU, M. [1978] Time domain measurement of frequency stability: a tutorial approach. *Proc. 10th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting*, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, 247-291.
- VESSOT, R. [1976] Frequency and Time Standards. Chap. 5.4 Methods of Experimental Physics, Academic Press, 198-227.
- VESSOT, R., MUELLER, L. et VANIER, J. [février 1966] The specification of oscillator characteristics from measurements made in the frequency domain. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 2, 199-207.
- WINKLER, G. M. R., HALL, R. G. et PERCIVAL, D. B. [octobre 1970] The US Naval Observatory clock time reference and the performance of a sample of atomic clocks. *Metrologia*, Vol. 6, 4, 126-134.

RAPPORT 738-2

**LES GÉNÉRATEURS DE FRÉQUENCES ÉTALON DANS LES GAMMES SUBMILLIMÉTRIQUE,
INFRAROUGE ET VISIBLE DU SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE**

(Question 53/1)

(1978-1982-1986)

1. Introduction

En janvier 1976, un nouveau texte sur l'utilisation du spectre au-dessus de 40 GHz et notamment dans les régions submillimétrique, infrarouge et visible, a été approuvé par correspondance et est devenu la Question 53/1 attribuée à la Commission d'études 1. Toutefois, l'attention de toutes les autres Commissions a été attirée sur cette nouvelle Question.

La Commission d'études 7 est directement concernée dans la mesure où les systèmes de télécommunication et de repérage qui seront développés à l'avenir dans ces zones du spectre électromagnétique nécessiteront des générateurs ultra-stables à ces fréquences optiques. En outre, comme cela est déjà le cas aux fréquences plus basses, les normes techniques internationales qui seront définies pour maintenir ces systèmes en bon fonctionnement auront des répercussions directes sur la qualité des sources de fréquences étalon à utiliser.

Compte tenu de ces remarques générales sur les problèmes à étudier au CCIR et des progrès réalisés en métrologie des fréquences optiques, la Commission d'études 7, au cours de sa réunion intérimaire de février 1976, a jugé opportun d'élaborer un nouveau Rapport sur les générateurs de fréquences étalon dans la gamme optique du spectre. Dans ce Rapport, le terme «optique» qualifiera toute fréquence supérieure à environ 300 GHz ($\lambda \lesssim 1$ millimètre). Le terme TéraHertz (THz) sera très utilisé: $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$.

La nouvelle définition du mètre, qui est définie comme étant la distance parcourue par la lumière dans le vide en $\frac{1}{299\,792\,458}$ s (Comptes rendus des séances de la 17^e Conférence générale des poids et mesures, Paris [1983]), présente un intérêt particulier en ce qui concerne les mesures de fréquences dans le domaine visible du spectre. La mesure absolue de la fréquence permet donc de calculer la longueur d'onde à l'aide de l'équation $\lambda = c/f$ sans incertitude supplémentaire (vitesse de la lumière $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$).

Ce Rapport vient en complément du Rapport 364 traitant du comportement des générateurs de fréquences étalon radioélectriques et micro-ondes. Rappelons que le Rapport 580 décrit les paramètres utilisés pour décrire l'instabilité de fréquence et de phase des générateurs de fréquences étalon.

2. La métrologie des fréquences optiques

Les progrès considérables de cette métrologie depuis une douzaine d'années résultent du développement de techniques permettant:

- de stabiliser très efficacement la fréquence émise par certains lasers fonctionnant en régime entretenu (CW);
- de mesurer avec précision la valeur absolue des fréquences optiques, les mesures étant rapportées à la seconde du Système International d'Unités.

Ce Rapport présente les principaux résultats obtenus dans ces deux domaines; compte tenu du très grand nombre de publications, on ne citera généralement pour chaque laboratoire et chaque problème considéré qu'une seule référence récente.

Parallèlement à la mesure absolue des fréquences optiques effectuée dans quelques laboratoires seulement, de nombreux laboratoires caractérisent l'instabilité de fréquence des lasers en mesurant, sur un battement obtenu entre deux lasers, la racine carrée $\sigma_y(\tau)$ de la variance à deux échantillons sans temps mort (voir Rapport 580). La Fig. 1 présente les courbes types $\sigma_y(\tau)$ pour les principaux lasers stabilisés.

3. Stabilisation en fréquence des lasers

Des méthodes de stabilisation en fréquence très efficaces ont dû être mises en œuvre avant de pouvoir considérer le laser comme un générateur de fréquence étalon [Giacomo, 1970]. Parmi celles-ci, l'asservissement de la fréquence du laser sur une référence constituée par un pic d'absorption saturée obtenu grâce à une coïncidence entre la fréquence laser et une fréquence d'absorption moléculaire [Lee et Skolnick, 1967] a été très utilisé, notamment avec les lasers CO_2 (vers 30 THz; $\lambda = 10 \mu\text{m}$) et He-Ne (88 THz; $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ et 474 THz; $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$).

D'une façon générale, les stabilités obtenues sont comparables à celles des étalons atomiques classiques (voir Fig. 1 de ce Rapport et Fig. 1 du Rapport 364), mais aucun laser stabilisé ne possède aujourd'hui une exactitude comparable à celle de l'étalon primaire à jet de césium (10^{-13}).

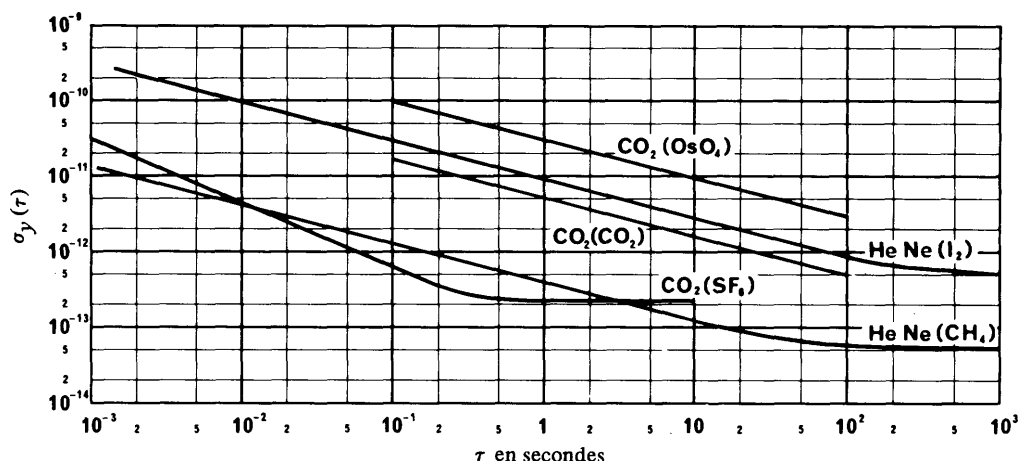


FIGURE 1 – Instabilité de fréquence type des principaux lasers à gaz stabilisés

3.1 Lasers CO_2

La stabilisation du laser CO_2 par absorption saturée dans une cuve externe a été étudiée en utilisant pour référence des molécules de SF_6 [Clairon et Henry, 1974; Ouhayoun et Bordé, 1976; Gusev et autres, 1975] et de OsO_4 [Kompanets et autres, 1976]. Une instabilité de 3×10^{-13} pour $\tau = 1 \text{ s}$ et une reproductibilité de 3×10^{-11} ont été obtenues avec le SF_6 . Cette technique ne permet la stabilisation que sur un nombre très limité de raies du laser en coïncidence avec une raie d'absorption moléculaire.

Des études théoriques et expérimentales détaillées des molécules lourdes SF_6 et OsO_4 d'intérêt métrologique ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre à très haute résolution [Bordé et autres, 1980].

Une technique utilisant la fluorescence saturée dans la molécule de CO_2 elle-même a été développée [Freed et Javan, 1970] puis améliorée [Freed, 1975 et 1977]. Elle permet d'obtenir environ 7×10^{-12} pour $\tau = 1 \text{ s}$ et 2×10^{-10} pour la reproductibilité. Malgré des performances plus limitées, cette technique a été utilisée dans de nombreux laboratoires du fait de son aptitude à stabiliser la fréquence de n'importe quelle raie du laser CO_2 (plus de cent raies entre environ 28 et 32 THz). Le laser N_2O , dans la même région du spectre, peut être stabilisé par une technique similaire [Whitford et autres, 1976].

Outre les raies régulières du laser $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, de nombreuses autres raies peuvent être obtenues, soit avec d'autres isotopes [Freed et autres, 1976], soit en utilisant des niveaux d'énergie supérieurs [Siemens et Whitford, 1977].

Du fait de ses nombreuses qualités (puissance, stabilité, nombreuses raies), le laser CO_2 est un outil fondamental dans la quasi-totalité des expériences de synthèse de fréquences infrarouges.

3.2 Lasers He-Ne

La stabilisation du laser He-Ne a été étudiée dans de nombreux laboratoires en utilisant le méthane (CH_4) ou l'iode (I_2) comme molécules de référence pour stabiliser respectivement les raies à 88 THz et à 474 THz (raie rouge).

Le laser He-Ne (CH_4) possède une stabilité de 3×10^{-13} pour $\tau = 1$ seconde, et une reproductibilité d'environ 10^{-11} [Barger et Hall, 1969; Hellwig et autres, 1972; Shimoda, 1973; Brillet et autres, 1974; Baird et Hanes, 1974; Bagaev et Chebotayev, 1975; Kramer et autres, 1975; Ohi et Akimoto, 1976].

Le laser He-Ne (CH_4) stabilisé sur une composante E de transition v_3 P(7) du méthane possède une reproductibilité de fréquence d'environ 5×10^{-13} [Malychev et autres, 1980].

Le laser He-Ne (I_2) conduit à 10^{-11} pour $\tau = 1$ s et environ 2×10^{-11} pour la reproductibilité [Hanes et autres, 1973; Helmcke et Bayer-Helms, 1974; Cérez et autres, 1974; Wallard, 1974; Bertinotto et autres, 1976; Shimoda et Tako, 1976; Tanaka et autres, 1977]. Pour $0,1 \text{ s} < \tau < 100 \text{ s}$, la stabilité de ce laser a été récemment améliorée d'un facteur 10 [Cérez et autres, 1977]. Les signaux d'absorption saturée détectés dans une cuve d'absorption externe $^{127}\text{I}_2$ ont aussi été appliqués pour stabiliser un laser au moyen d'un modulateur optique externe [Tanaka et Morinaga, 1979]; une reproductibilité de 2×10^{-12} a été signalée en liaison avec l'utilisation d'une cuve d'absorption externe à iode [Cérez et autres, 1980].

Des lasers analogues ont également été développés et étudiés au Bureau international des poids et mesures (BIPM) dans le cadre de la métrologie des longueurs.

On a stabilisé la raie 260 THz en doublant le rayonnement dans la cavité et en détectant l'absorption saturée de la lumière jaune 520 THz dans l'iode [Hanes, 1979].

La limitation de la reproductibilité des lasers He-Ne stabilisés par absorption saturée, qui résulte des pertes par diffraction dépendant de la fréquence a été étudiée et des solutions ont été proposées pour minimiser cet effet [Le Floch et autres, 1982] [Cérez et Felder, 1983].

3.3 Autres lasers

Le laser à argon ionisé (582 THz; $\lambda = 0,514 \mu\text{m}$) a été stabilisé par absorption saturée dans l'iode en cuve externe ($\sigma_y(1 \text{ s}) \approx 10^{-13}$) [Camy et autres, 1976; Spieweck et autres, 1980], ainsi qu'en utilisant un jet moléculaire d'iode: $\sigma_y(1 \text{ s}) \approx 10^{-11}$, reproductibilité $1,5 \times 10^{-12}$ [Hackel et autres, 1976].

Le laser He-Xe ($\lambda = 3,51 \mu\text{m}$) a été stabilisé par absorption saturée dans le formaldéhyde (H_2CO) avec $\sigma_y(100 \text{ s}) = 1 \times 10^{-14}$ [Ohtsu et autres, 1981]; la mesure de la longueur d'onde dans le vide, pour ce laser, a donné la valeur $3\,507\,979,48 \pm 0,39 \text{ pm}$ [Tako et autres, 1980].

La stabilisation des lasers à colorant est également étudiée dans plusieurs laboratoires [Barger et autres, 1976; Man et autres, 1977]. La possibilité d'accorder la fréquence de ces lasers permet de choisir une molécule de référence pour ses propriétés métrologiques et non pour la coïncidence accidentelle entre une fréquence d'absorption et une fréquence laser. En particulier, ils pourraient être utilisés pour la mesure d'une fréquence visible.

Les lasers moléculaires à pompage optique par laser CO_2 permettent d'obtenir des centaines de raies dans l'infrarouge lointain et sont susceptibles d'applications importantes en métrologie des fréquences [Petersen et autres, 1975; Weiss et Kramer, 1976; Bava et autres, 1977a] et notamment lorsque leur fréquence aura été stabilisée efficacement. Avec des lasers libres, les instabilités suivantes ont été obtenues: $\sigma_y(0,05 \text{ s}) \approx 2 \times 10^{-12}$ pour la raie à $70 \mu\text{m}$, $\sigma_y(0,05 \text{ s}) \approx 4 \times 10^{-12}$ pour la raie à $118 \mu\text{m}$ du laser CH_3OH [Plainchamp, 1979] et $\sigma_y(1 \text{ s}) \approx 1,8 \times 10^{-9}$ pour la raie à $394 \mu\text{m}$ du laser HCOOH [Godone et autres, 1978]. L'utilisation de l'effet Stark donne à ces lasers des possibilités d'accord et de modulation de fréquence plus grandes [Stein et Van de Stadt, 1977; Benedetti et autres, 1977] et permet également d'asservir en phase de tels lasers [Dahmani et Clairon, 1983a]. Les limitations de stabilité de fréquence dues à l'instabilité du laser de pompage ont été étudiées [Dahmani et Clairon, 1983b].

La stabilisation en fréquence a été également effectuée avec une diode-laser PbSnTe sur une raie du méthane dans la bande $7,7 \mu\text{m}$; on a obtenu une stabilité de $4,3 \times 10^{-11}$ sur une durée de 15 s [Ohi, 1980].

Certains lasers à fréquence suffisamment basse, tel que le laser HCN à 890 GHz, peuvent être stabilisés par verrouillage sur un harmonique d'un étalon de fréquence radioélectrique [Wells, 1973] avec $\sigma_y(1 \text{ s}) \approx 10^{-12}$.

Au moyen d'une synchronisation de phase sur une harmonique d'un étalon de fréquence primaire, les lasers HCN (890 GHz) et D_2O (3,6 THz) sont synchronisés sur l'étalon avec une précision d'environ 10^{-13} [Domnin et autres, 1980].

De nombreuses nouvelles raies d'émission laser par des molécules diatomiques de sodium et de lithium ont été observées [Man-Pichot et Brillet, 1980]. Elles présentent une stabilité de fréquence intrinsèque favorable à la réalisation d'étalons secondaires de fréquence et de longueurs d'onde dans le visible.

4. La mesure des fréquences optiques

La réalisation de diodes non-linéaires capables de générer des harmoniques et d'effectuer des battements de fréquences dans la gamme optique du spectre, a permis d'étendre la limite supérieure des fréquences directement mesurables à environ 520 THz ($\lambda = 0,58 \mu\text{m}$). Des études comparatives sur les différentes diodes utilisables ont été publiées [Pyée et Auvray, 1975; Knight et Woods, 1976]. Le Tableau I rappelle quelques étapes importantes de la mesure des fréquences optiques. Les valeurs recommandées pour les fréquences laser par le Comité international des poids et mesures (CIPM) en 1983 pour la réalisation du mètre sont indiquées au Tableau II. Le Tableau III résume les principales propriétés des diodes à pointe utilisables en multiplicatrices de fréquence dans l'infrarouge.

La mesure d'une fréquence optique inconnue est effectuée par une technique hétérodyne: la diode reçoit simultanément le signal à mesurer et des signaux de fréquences déjà mesurées; de par sa non-linéarité, elle génère une fréquence de battement suffisamment basse pour être mesurée directement; il est alors possible de calculer la fréquence inconnue.

A la suite du travail de pionnier effectué au MIT sur la mesure des fréquences laser et sur les diodes à pointe métal-isolant-métal (MIM) [Hocker et autres, 1967 et 1968], la mise en œuvre de chaînes de lasers a permis de mesurer successivement la fréquence des lasers HCN (890 GHz), H₂O (10 THz), CO₂ (30 THz) et He-Ne (CH₄) à 88 THz, chaque mesure s'appuyant sur la précédente grâce à une relation harmonique entre les fréquences [Evenson et autres, 1973; Blaney et autres, 1977; Clairon et autres, 1980; Domnin et autres, 1980].

La précision et l'exactitude de la mesure d'une fréquence optique sont, dans le meilleur des cas, limitées respectivement par les stabilités et les exactitudes des deux sources qui se trouvent aux extrémités de la chaîne de multiplication, par exemple l'étalon primaire à césium et le laser He-Ne (CH₄) dans le cas de la mesure à 88 THz.

TABLEAU I – Principales mesures de fréquences optiques
(liste non exhaustive montrant la progression depuis 1967)

Année	Laser (λ en μm)	Fréquence (en THz)	Précision (valeur relative)
1967	HCN (337)	0,890 759 5	$\pm 10^{-7}$
1968	H ₂ O (118)	2,527 954	
1969	D ₂ O (84)	3,557 143	$\pm 6 \times 10^{-7}$
1970	H ₂ O (28) CO ₂ (10,6)	10,718 073 28,306 251	$\pm 2 \times 10^{-7}$ $\pm 9 \times 10^{-7}$
1972	He-Ne (3,39)	88,376 245	$\pm 5 \times 10^{-7}$
1973	CO ₂ (10,18) CO ₂ (9,33) He-Ne (CH ₄) (3,39)	29,442 483 315 32,134 266 891 88,376 181 627	$\pm 9 \times 10^{-10}$ $\pm 8 \times 10^{-10}$ $\pm 6 \times 10^{-10}$
1974	CO (5,3)	56,168 515	$\pm 7 \times 10^{-8}$
1975	Xe (2,03)	147,915 850	$\pm 10^{-7}$
1977	Ne (1,52)	196,780 269	$\pm 1,3 \times 10^{-7}$
1979	CO ₂ (OsO ₄) (10,53)	28,464 676 938 5	$\pm 3 \times 10^{-11}$
1980	He-Ne (CH ₄) (3,39)	88,376 181 618	$\pm 1,6 \times 10^{-10}$
1981	He-Ne (CH ₄ -F ₂) (3,39)	88,376 181 603 4	$\pm 1,6 \times 10^{-11}$
1981	He-Ne (CH ₄ -E) (3,39)	88,373 149 033 0	$\pm 2 \times 10^{-11}$
1982	Dye (I ₂) (0,576)	520,206 808 547	$1,6 \times 10^{-10}$

TABLEAU II — Valeurs recommandées pour les fréquences laser
par le CIPM en 1983 pour la réalisation du mètre

Laser	Fréquence (THz)	Incertitude relative (3 σ)
Laser He-Ne, stabilisé par absorption saturée au CH ₄ (transition ν_3 , P (7), composante F ₂ ³)	88,376 181 608	$\pm 1,3 \times 10^{-10}$
Laser à colorant (ou laser He-Ne avec doublage de fréquence), stabilisé par absorption saturée au ¹²⁷ I ₂ (transition 17-1, P (62), composante o)	520,206 808 51	$\pm 6 \times 10^{-10}$
Laser He-Ne, stabilisé par absorption saturée au ¹²⁷ I ₂ (transition 11-5, R (127), composante i)	473,612 214 8	$\pm 10 \times 10^{-10}$
Laser He-Ne, stabilisé par absorption saturée au ¹²⁷ I ₂ (transition 9-2, R (47), composante o)	489,880 355 1	$\pm 11 \times 10^{-10}$
Laser Ar ⁺ stabilisé par absorption saturée au ¹²⁷ I ₂ (transition 43-0, P (13), composante a ₃)	582,490 603 6	$\pm 13 \times 10^{-10}$

TABLEAU III — Principales propriétés des diodes à pointe utilisables en multiplicatrices
de fréquence

Nature de la diode à pointe	Fréquence maximale atteinte par génération d'harmoniques	Ordre de multiplication correspondant et source de départ	Ordre de multiplication le plus élevé	Fréquence supérieure atteinte et source correspondance
Métal-semiconducteur (tungstène-silicium)	3,56 THz laser D ₂ O	4 laser HCN	23	1,58 THz laser DCN
Schottky (As-Ga type <i>n</i>)	2,52 THz laser CH ₃ OH	33 source micro-onde	33	2,52 THz laser CH ₃ OH
Métal-Isolant-Métal (tungstène-nickel)	88,4 THz ⁽¹⁾ laser He-Ne	3 laser CO ₂	12	10,7 THz laser H ₂ O
Josephson ⁽²⁾ (niobium-niobium)	3,8 THz laser H ₂ O	401 source micro-onde	825	0,89 THz laser HCN

(¹) Une fréquence voisine de 520 THz peut être atteinte par addition de fréquences sans génération d'harmoniques.

(²) Fonctionne à la température de l'hélium liquide.

L'utilisation de lasers à pompage optique comme oscillateurs de transfert a permis d'améliorer la précision initiale des mesures à 88 THz de 6×10^{-10} jusqu'à environ 3×10^{-11} à 10^{-10} .

Une chaîne asservie en phase et comportant deux lasers à pompage optique à HCOOH et CH₃OH comme oscillateurs de transfert a permis une nouvelle mesure sur le laser à CO₂ (OsO₄) vers 29 THz avec une précision d'environ $1,5 \times 10^{-12}$.

Vers les fréquences plus élevées, une raie du laser à Xe à 148 THz a été mesurée à l'aide d'une diode MIM par additions et battement de fréquences sans génération d'harmoniques, ainsi qu'une raie à 197 THz du néon [Evenson et autres, 1977]. L'utilisation de cristaux non linéaires a été nécessaire pour atteindre le domaine visible.

Par ailleurs, les nombreuses raies du laser CO₂ permettent, en utilisant deux tels lasers et une diode MIM, de synthétiser commodément un peigne de fréquences très serré entre les micro-ondes et environ 100 THz, ce qui autorise la mesure de toute fréquence située dans cette gamme par rapport aux raies du laser CO₂ considéré alors comme étalon secondaire [Petersen et autres, 1975].

La mesure de la valeur absolue de la fréquence de diverses transitions de OsO₄ au voisinage de 28 THz a été entreprise [Clairon et autres, 1981].

Au National Bureau of Standards des Etats-Unis d'Amérique, la composante hyperfine o de la transition ¹²⁷I₂ 17-1 P(62) à 520 THz (576 nm) dans l'iode a été mesurée par rapport au laser He-Ne 88 THz stabilisé au CH₄. On s'est servi d'un laser CO₂ à 26 THz, d'un laser couleur central à 130 THz et d'un laser He-Ne à 260 THz comme oscillateurs de transfert. La fréquence I₂ mesurée était de 520,206 808 547 THz avec une incertitude totale de $1,6 \times 10^{-10}$. La fréquence mesurée du laser 1,15 nm ²⁰Ne stabilisé par déplacement de Lamb était de 260,103 249 26 THz, avec une incertitude totale de $3,1 \times 10^{-10}$.

A la suite de la réalisation d'une synchronisation de phase mutuelle sur l'étalon primaire des lasers d'une chaîne multiplicatrice, on a créé un réseau de fréquences étalons jusqu'à la région des 30 THz et on a mesuré avec une grande précision les valeurs des fréquences des étalons optiques CO₂ (O₅O₄) et He-Ne (CH₄) sur les composantes F₂² et E. La précision de ces mesures est d'environ 3×10^{-11} pour un laser CO₂ (O₅O₄) [Domnin et autres, 1980] et d'environ $1,6 \times 10^{-11}$ (composante F₂²) et 2×10^{-11} (composante E) pour un laser He-Ne (CH₄) [Domnin et autres, 1981a, b].

On a fait la démonstration d'une méthode entièrement nouvelle pour étendre la chaîne de fréquence de l'étalon Cs jusqu'à 30 THz, en utilisant exclusivement des lasers CO₂; cette méthode a servi à faire des mesures absolues de la fréquence de cinq raies de CO₂ [Whitford, 1980]. La chaîne a été soumise à un verrouillage de phase sur la fréquence Cs pendant des durées allant jusqu'à 20 min [Whitford, 1984a, b].

On a mesuré les fréquences laser des bandes chaudes de ¹²C¹⁶O₂ et de ¹³C¹⁶O₂ et des bandes de séquence ¹³C¹⁶O₂ et ¹²C¹⁸O₂ par hétérodynage avec les fréquences laser régulières connues de CO₂ [Petersen et autres, 1981, 1984; Siemsen, 1980, 1981].

On a construit un laser continu NH₃ pompé par un laser CO₂ et on a mesuré 30 fréquences de ¹⁴NH₃ et ¹⁵NH₃ stabilisées par déplacement de Lamb au moyen d'un hétérodynage avec les fréquences connues d'un laser CO₂ [Siemsen et Reid, 1985].

Un rapport a été présenté pour la première fois sur la mesure directe de fréquence d'une transition visible [Baird et autres, 1979]. Il s'agissait de la transition des composantes hyperfines de l'iode dans le jaune (520 THz), sur une fréquence égale au double de la fréquence connue d'un laser He-Ne 260 THz.

Dans le cadre des objectifs principaux évoqués ci-dessus (amélioration de la précision, mesures de fréquences toujours plus élevées, plus grande commodité de synthèse des fréquences infrarouges), de nombreux laboratoires travaillent à développer tel ou tel point. Citons par exemple: l'étude approfondie des chaînes de multiplication de fréquence entre 5 MHz et l'infrarouge lointain [Bava et autres, 1977b]; l'utilisation de diodes Schottky [Fetterman et autres, 1974; Pyée et Auvray, 1975]; l'utilisation de jonctions Josephson [McDonald et autres, 1972; Blaney et Knight, 1974; Lourtioz et autres, 1977]; le développement de diodes MIM à couches minces [Davis et autres, 1977]; la proposition d'une méthode originale pour la mesure de la raie rouge du laser He-Ne par mélange de rayonnements infrarouges dans un gaz [Chebotayev et autres, 1976].

Pour conclure, rappelons que si les lasers stabilisés constituent d'excellents étalons secondaires de fréquence, leur utilisation en horloge repose sur le développement de nouveaux dispositifs capables de générer commodément des tops-seconde à partir des fréquences appartenant au domaine des térahertz.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAGAEV, S. N. et CHEBOTAYEV, V. P. [1975] Frequency stability and reproducibility of the 3.39 μm He-Ne laser stabilized on the methane line. *Appl. Phys.*, 7, 71-76.
- BAIRD, K. M., EVENSON, K. M., HANES, G. R., JENNINGS, D. A. et PETERSEN, F. R. [1979] Extension of absolute-frequency measurements to the visible: frequencies of ten hyperfine components of iodine. *Optics Lett.*, Vol. 4, 263-264.
- BAIRD, K. M. et HANES, G. R. [1974] Stabilization of wavelengths from gas lasers. *Rep. Prog. Phys.*, Vol. 37, 927-950.
- BARGER, R. L. et HALL, J. L. [1969] Pressure shift and broadening of methane line at 3.39 μm studied by laser-saturated molecular absorption. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 22, 4-8.
- BARGER, R. L., WEST, J. B. et ENGLISH, T. C. [5-7 juillet 1976] Laser frequency stabilization using saturated absorption of the 6573 Å line of calcium. Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium, 83-106, Copper Mountain, CO., Etats-Unis d'Amérique.
- BAVA, E., DE MARCHI, A. et GODONE, A. [1-3 juin 1977a] A narrow output linewidth multiplier chain for precision frequency measurements in the 1 THz region. Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, US Army Electronics Command, Fort Monmouth, NJ 07703, Atlantic City, Etats-Unis d'Amérique (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006).

- BAVA, E., DE MARCHI, A., GODONE, A., BENEDETTI, R., INGUSCIO, M., MINGUZZI, P., STRUMIA, F. et TONELLI, M. [1977b] Frequency measurement on the 496 μm line of a CH_3F FIR laser. *Optics Com.*, Vol. 21, 1, 46-48.
- BENEDETTI, R., DI LIETO, A., INGUSCIO, M., MINGUZZI, P., STRUMIA, F. et TONELLI, M. [1-3 juin 1977] Frequency modulation of a far infrared CH_3F laser by Stark effect. Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, US Army Electronics Command, Fort Monmouth, NJ 07703, Atlantic City, Etats-Unis d'Amérique (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006).
- BERTINETTO, F., REBAGLIA, B., LIVERANI, M. et GUALINI, S. [1976] Present development of iodine-stabilized He-Ne lasers at the IMGC. *Alta Frequenza*, Vol. XLIV, 10, 569.
- BLANEY, T. G., BRADLEY, C. C., EDWARDS, G. J., JOLLIFFE, B. W., KNIGHT, D. J. E., ROWLEY, W. R. C., SHOTTON, K. C. et WOODS, P. T. [1977] Measurement of the speed of light: I. Introduction and frequency measurement of a carbon dioxide laser. *Proc. Roy. Soc.*, A 355, 61-88.
- BLANEY, T. G. et KNIGHT, D. J. E. [1974] Direct 825th harmonic mixing of a 1 GHz source with an HCN laser in a Josephson junction. *J. of Phys.*, 1882.
- BORDÉ, C., OUHAYOUN, M., VAN LERBERGHE, A., SALOMON, C., AVRILLIER, S., CANTREL, C. D. et BORDE, J. [1980] High resolution saturation spectroscopy with CO_2 lasers. Application to the bands of SF_6 and OsO_4 . *Laser Spectroscopy IV*. Proc. 4th International Conf., Rottach Egern, République fédérale d'Allemagne (édité par H. Walter et K. W. Rothe, Springer-Verlag, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique).
- BRILLET, A., CÉREZ, P. et CLERGEOT, H. [1974] Frequency stabilization of He-Ne lasers by saturated absorption. *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. QE-10, 526-528.
- CAMY, G., DECOMPS, B., GARDISSAT, J. et BORDÉ, C. [5-7 juillet 1976] Frequency stabilization of Argon lasers at 582,49 THz using saturated absorption in $^{127}\text{I}_2$. Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium, 153-166, Copper Mountain, Co., Etats-Unis d'Amérique. Publié également dans *Metrologia*, 1977, Vol. 13, 3, 145-148.
- CÉREZ, P., BRILLET, A., HAJDUCOVIC, S. et MAN, C. [1977] Iodine stabilized He-Ne lasers with a hot wall iodine cell. *Optics Com.*, Vol. 21, 3.
- CÉREZ, P., BRILLET, A. et HARTMANN, F. [1974] Metrological properties of the R(127) line of iodine studied by laser saturate absorption. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 4, 526.
- CÉREZ, P., BRILLET, A., MAN-PICHOT, C. et FELDER, R. [1980] He-Ne lasers stabilized by saturated absorption in iodine at 612 nm. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 4, 352-354.
- CÉREZ, P. et FELDER, R. [mai 1983] Gas-lens effect and cavity design of source frequency stabilized He-Ne lasers. *Appl. Opt.*, Vol. 22, 8, 1251-1256.
- CHEBOTAYEV, V. P., KLEMENTYEV, V. M. et MATYUGIN, A. [1976] Frequency synthesis of the 0.63 μm radiation by mixing of three IR radiation frequencies in a gas. *Appl. Phys.*, 11, 163-165.
- CLAIRON, A., DAHMANI, B. et RUTMAN, J. [1980] Accurate absolute frequency measurements on stabilized CO_2 and He-Ne infrared lasers. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 4, 268-272.
- CLAIRON, A. et HENRY, L. [1974] Stabilisation des lasers CO_2 par l'absorption saturée. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, France, Vol. 279, Série B, 419.
- CLAIRON, A., VAN LERBERGHE, A., BREANT, C., CAMY, G. et BORDÉ, C. [décembre 1981] A new absolute frequency reference grid in the 28 THz range. *J. de Phys.*, Colloque C-8, Supplement to No. 12, Vol. 42, 127-135.
- CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES [octobre 1983] Comptes rendus de la 17^e Conférence, Paris, France.
- DAHMANI, B. et CLAIRON, A. [28 juin-1 juillet 1983a] Optically pumped FIR lasers phase-locked by Stark effect applied to precise optical frequency measurements. Document présenté à la Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM '83) Boulder, CO, Etats-Unis d'Amérique. Publié également dans *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-32, 1, 150-154.
- DAHMANI, B. et CLAIRON, A. [14-18 février 1983b] Frequency stability limitations of optically pumped lasers due to pump laser instability through dispersion effect. Document présenté à la Seventh International Conference on Infra-red and Millimetre Waves, Marseille, France. Sera aussi publié dans *Infra-red and Millimetre Waves*. Ed. K. J. Button, Academic Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- DAVIS, C. F., ELCHINGER, G., SÁNCHEZ, A., LIU, G. et JAVAN, A. [1-3 juin 1977] Optical Electronics, extension of microwave techniques into the optical region. Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, US Army Electronics Command, Fort Monmouth, NJ 07703, Atlantic City, Etats-Unis d'Amérique. (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006).
- DOMNIN, Yu. S., KOSHELYAEVSKY, N. B., TATARENKOV, V. M. et SHUMYATSKY, P. S. [1980] Precise frequency measurements in submillimetre and infra-red region. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 4, 264-267.
- DOMNIN, Yu., S., KOSHELYAEVSKY, N. B., TATARENKOV, V. M. et SHUMYATSKY, P. S. [1981a] Izmerenie tchastoty He-Ne (CH_4) lazera (He-Ne (CH_4) laser frequency measurements). *JETP Lett.*, Vol. 34, 2, 175-178.
- DOMNIN, Yu., S., KOSHELYAEVSKY, N. B., MALYSHEV, Yu. M., TATARENKOV, V. M. et TITOV, A. N. [22-24 septembre 1981b] Izmerenie raznostnoi tchastoty mejdou He-Ne lazerami, stabilizirovannymi po F_2^2 i E-komponentam metana perekhoda $v_3 P(7)$. (Mesure de la différence de fréquence entre des lasers He-Ne stabilisés sur les composantes F_2^2 et E d'une transition du méthane $v_3 P(7)$). Sbornik tezisov Vsesoyuznoi Konferentsii «Metrologia v radioelektronike» (Proc. Vth All-Union Conference on Metrology in Radioelectronics) Moscou, URSS.
- EVENSON, K. M., JENNINGS, D. A., PETERSEN, F. R. et WELLS, J. S. [1977] Laser frequency measurements: a review, limitations, extension to 197 THz. *Laser Spectroscopy III*, Springer-Verlag, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

- EVENSON, K. M., WELLS, J. S., PETERSEN, F. R., DANIELSON, B. L. et DAY, G. W. [1973] Accurate frequencies of molecular transitions used in laser stabilisation: the 3.39 μm transition in CH_4 and the 9.33 and 10.18 μm transitions in CO_2 . *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 22, 192-195.
- FETTERMAN, H. R., CLIFTON, B. J., TANNENWALD, P. E. et PARKER, C. D. [1974] Submillimeter detection and mixing using Schottky diodes. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 24, 70-72.
- FREED, C. [28-30 mai 1975] Frequency stabilization of CO_2 lasers. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control, US Army Electronics Command, Fort Monmouth, NJ 07703, Etats-Unis d'Amérique, 330-337 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006).
- FREED, C. [1-3 juin 1977] Progress in CO_2 laser stabilization. Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, US Army Electronics Command, Fort Monmouth, NJ 07703, Etats-Unis d'Amérique (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006).
- FREED, C. et JAVAN, A. [1970] Standing wave saturation resonances in the CO_2 10.6 μm transitions in a low-pressure room-temperature absorber gas. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 17, 2, 53-56.
- FREED, C., O'DONNELL, R. G. et ROSS, A. H. M. [1976] Absolute frequency calibration of the CO_2 isotope laser transitions. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 4, 431-437.
- GIACOMO, P. [1970] Laser et métrologie. *Bull. d'Information du Bureau national de métrologie*, Fasc. 1, 7-9.
- GODONE, A., WEISS, C. O. et KRAMER, G. [mai 1978] FM noise measurements on an optically pumped FIR laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. QE-14, 5, 339-342.
- GUSEV, V. M., KOMPANETS, O. N., KUKUDZHANOV, A. R., LETOKHOV, V. S. et MIKHAILOV, E. L. [mai 1975] Stabilization of the emission frequency of a CO_2 laser to within 10-12 with the aid of narrow SF_6 and OsO_4 resonances. *Sov. J. Quant. Electron.*, Vol. 4, 11, 1370-1372.
- HACKEL, L., HACKEL, R. et EZEKIEL, S. [5-7 juillet 1976] Molecular beam stabilized multiwatt Argon lasers. Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium, 107-113, Copper Mountain, CO, Etats-Unis d'Amérique.
- HANES, G. R. [1979] Doubly resonant intracavity generation of second harmonic of 1153-nm radiation with stabilization on hyperfine structure components of $^{127}\text{I}_2$. *Appl. Opt.*, Vol. 18, 3970-3974.
- HANES, G. R., BAIRD, K. M. et DE REMIGIS, J. [1973] Stability, reproducibility and absolute wavelength of a 633 nm He-Ne laser stabilized to an iodine hyperfine component. *Appl. Opt.*, Vol. 12, 1600-1605.
- HELLWIG, H., BELL, H. E., KARTASCHOFF, P. et BERGQUIST, J. C. [1972] Frequency stability of methane-stabilized He-Ne lasers. *J. Appl. Physics*, Vol. 43, 2, 450-452.
- HELMCKE, J. et BAYER-HELMS, F. [1974] He-Ne laser stabilized by saturated absorption in I_2 . *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 4, 529.
- HOCKER, L. O., JAVAN, A., RAMACHANDRA RAO, D., FRENKEL, L. et SULLIVAN, T. [1967] Absolute frequency measurement and spectroscopy of gas laser transitions in the far infrared. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 10, 5, 147-149.
- HOCKER, L. O., SOKOLOFF, D. R., DANEU, V., SKOZE, A. et JAVAN, A. [1968] Frequency mixing in the infrared and far-infrared using a metal-to-metal point contact diode. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 12, 12, 401-402.
- KNIGHT, D. J. et WOODS, P. T. [1976] Application of nonlinear devices to optical frequency measurement. *J. Physics E. Sci. Instr.*, Vol. 9, 898-916.
- KOMPANETS, O. N., KUKUDZHANOV, A. R., LETOKHOV, V. S. et MIKHAILOV, E. L. [5-7 juillet 1976] Frequency stabilized CO_2 -Laser using OsO_4 saturation resonances. Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium, 167-181, Copper Mountain, CO, Etats-Unis d'Amérique.
- KRAMER, G., WEISS, C. O. et HELMCKE, J. [1975] Laser frequency stabilization by means of saturation dispersion. *Z. Nat. Forsch.*, 30 a 1128.
- LEE, P. L. et SKOLNICK, M. L. [1967] Situated neon absorption inside a 6238A laser. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 10, 303.
- LE FLOCH, A., LENORMAND, Y. M., LE NAOUR, R. et TACHE, J. P. [1982] A critical geometry for lasers with internal lenslike effects. *J. de Phys. (Lettres)*, Tome 43, L.493-498.
- LOURTIOZ, J. M., ADDE, R., VERNET, G. et HENAU, J. C. [1977] Harmonic mixing with Josephson point contacts. *Rev. de Phys. Appl.*, Vol. 12, 487.
- MALYSHEV, Yu. M., OVCHINNIKOV, S. N., RASTORGUEV, Yu. G., TATARENKOV, V. M. et TITOV, A. N. [1980] O vosproizvodimosti tchastoty kvantovogo repera na E-komponente molekuly metana. (Reproductivité d'une fréquence de référence de quantum sur une composante E de la molécule de méthane.) *Kvantovaya Elektronika*, Vol. 7, 3, 655-657.
- MAN, C. N., CÉREZ, P., BRILLET, A. et HARTMANN, F. [15 juillet 1977] A frequency stabilized CW dye laser for spectroscopic and metrological applications. *J. de Phys. (Lettres)*, Tome 38, L.287-289.
- MAN-PICHOT, C. N. et BRILLET, A. [1980] Precise measurement and assignment of CW laser emission lines from optically pumped Na_2 and Li_2 molecules. *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. QE-16, 1103-1108.
- MCDONALD, D. G., RISLEY, A. S., CUPP, J. D., EVENSON, K. M. et ASHLEY, J. E. [1972] Four-hundredth-order harmonic mixing of microwave and infrared laser radiation using a Josephson junction and a maser. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 20, 296-299.
- OHI, M. [1980] Frequency stabilization of a PbSnTe laser on a methane line in the ν_4 band. *Japan J. Appl. Phys.*, Vol. 19, L541.
- OHI, M. et AKIMOTO, Y. [1976] Improvements in methane-stabilized laser. *Japan J. Appl. Phys.*, Vol. 15, 9, 1853-1854.
- OHTSU, M., KATSURAGI, S. et TAKO, T. [juin 1981] Performance of frequency-offset-locked He-Xe laser at 3.51 μm . *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. QE, 6, 1100-1106.
- OUHAYOUN, M. et BORDÉ, C. [5-7 juillet 1976] Frequency stabilization of CO_2 lasers through saturated absorption in SF_6 . Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium, 145-151, Copper Mountain, CO, Etats-Unis d'Amérique. Publié également dans *Metrologia*, 1977, Vol. 13, 3, 149-150.

- PETERSEN, F. R., EVENSON, K. M., JENNINGS, D. A., WELLS, J. S., GOTO, K. et JIMÉNEZ, J. J. [1975] Far-infrared frequency synthesis with stabilized CO₂ lasers: accurate measurement of the water vapor and methyl alcohol laser frequencies. *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. QE-11, 838-843.
- PETERSEN, F. R., WELLS, J. S., MAKI, A. G. et SIEMSEN, K. J. [1981] Heterodyne frequency measurements of ¹³CO₂ laser hot band transitions. *Appl. Opt.*, Vol. 20, 3635-3640.
- PETERSEN, F. R., WELLS, J. S., SIEMSEN, K. J., ROBINSON, A. M. et MAKI, A. G. [1984] Heterodyne frequency measurements and analysis of CO₂ laser not band transitions. *J. Molecular Spectroscopy*, Vol. 105, 324-330.
- PLAINCHAMP, P. M. [1979] Frequency instability measurements of the CH₃OH optically pumped laser at 70.5 and 118 μm. *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. QE-15, 9, 860-864.
- PYÉE, M. et AUVRAY, J. [1975] Génération et comparaison des fréquences dans le domaine submillimétrique et infrarouge. *Bull. d'information du Bureau national de métrologie*, Vol. 6, 19, 11-22.
- SHIMODA, K. [1973] Frequency shifts in methane-stabilized lasers. *J. Appl. Phys.*, Vol. 44, 1393.
- SHIMODA, K. et TAKO, T. [5-7 juillet 1976] Recent results on laser frequency stabilization in Japanese institutes. Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium, 187-203, Copper Mountain, CO, Etats-Unis d'Amérique.
- SIEMSEN, K. J. [1980] The sequence bands of the carbon-13 isotope CO₂ laser. *Optics Com.*, Vol. 34, 3, 447-450.
- SIEMSEN, K. J. [1981] Sequence bands of the isotope ¹²C¹⁸O₂ laser. *Optics Lett.*, Vol. 6, 114-116.
- SIEMSEN, K. J. et REID, J. [décembre 1985] Heterodyne frequency measurements of ¹⁴NH₃ and ¹⁵NH₃ v₂ band transitions. *Optics Lett.*, Vol. 10, 12, 594-596.
- SIEMSEN, K. J. et WHITFORD, B. G. [1977] Heterodyne frequency measurements of CO₂ laser sequence-band transitions. *Optics. Com.*, Vol. 22, 1, 11-16.
- SPIEWECK, F., CAMY, G. et GILL, P. [1980] Beat frequency inter-comparisons of ¹²⁷I₂ stabilized ion lasers at 514,5 nm. *Appl. Phys.*, Vol. 22, 111.
- STEIN, S. R. et VAN DE STADT, H. [1-3 juin 1977] Electronic tuning and phase-lock techniques for far-infrared lasers. Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ (US Army Electronics Command, Fort Monmouth, NJ 07703, Etats-Unis d'Amérique) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006).
- TAKO, T., OHTSU, M., KATSURAGI, S., OHI, M. et AKIMOTO, Y., [1980] Wavelength measurement of an H₂CO-stabilized He-Xe laser at 3.51 μm. *Japan J. Appl. Phys.*, Vol. 19, 1683-1688.
- TANAKA, K. et MORINAGA, A. [1979] Preliminary experiment for stabilizing unmodulated He-Ne laser to an iodine hyperfine component. *J. Appl. Phys.*, Vol. 50, 38.
- TANAKA, K., SAKURAI, T. et KUROSAWA, T. [1977] Frequency stability and reproducibility of an iodine stabilized He-Ne laser. *Japan J. Appl. Phys.*, Vol. 16, 11, 2071-2072.
- WALLARD, A. J. [1974] The reproducibility of 633 nm lasers stabilized by ¹²⁷I₂. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 4, 532.
- WEISS, C. O. et KRAMER, G. [1976] A submillimeter laser for infrared frequency measurements. Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants (AMCO 5), Paris, Ed.: J. H. Sanders and A. H. Wapstra. Plenum Press, New York-Londres.
- WELLS, J. S. [1973] A stabilized HCN laser for infrared frequency synthesis. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-22, 2, 113-118.
- WHITFORD, B. G., [1980] Measurement of the absolute frequencies of CO₂ laser transitions by multiplication of CO₂ laser difference frequencies. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 3, 168-176.
- WHITFORD, B. G. [20-24 août 1984a] Phase-lock of a CO₂ laser to a frequency standard. Conf. Digest 3B4, 126-127. Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Delft, Pays-Bas.
- WHITFORD, B. G., [1984b] Simultaneous phase-lock of five CO₂ lasers to a primary Cs frequency standard. *Appl. Phys. B*, Vol. 35, 119-122.
- WHITFORD, B. G., SIEMSEN, K. J. et RICCIUS, H. D. [1976] Saturated-absorption-stabilized N₂O laser for new frequency standards. Conf. on Atomic Masses and Fundamental Constants (AMCO 5), Paris, Ed.: J. H. Sanders et A. H. Wapstra. Plenum Press, New York — Londres.
- Note.* — Les «Proceedings of the 2nd Frequency Standards and Metrology Symposium» sont disponibles au: NBS, Frequency and Time Standards Section, Boulder, CO 80302, Etats-Unis d'Amérique.

BIBLIOGRAPHIE

- CÉREZ, P., BENNETT, S. J. et AUDOIN, C. [1977] Stabilité de fréquence du laser He-Ne comportant une cuve d'iode à parois chaudes. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, séance du 12 décembre 1977.
- JENNINGS, D. A., PETERSEN, F. R. et EVENSON, K. M. [1975] Extension of absolute frequency measurements to 148 THz: frequencies of the 2.0 and 3.5 μm Xe-laser. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 26, 510-511.
- SCHWEITZER, W. G., KESSLER, E. G., DESLATTES, R. D., LAYER, H. P. et WHETSTONE, J. R. [1973] Description, performance and wavelengths of iodine stabilized lasers. *Appl. Opt.*, Vol. 12, 2927-2938.

RAPPORT 898-1 *

FONCTIONNEMENT ET FIABILITÉ DES HORLOGES DE RÉFÉRENCE

(Question 8/7 et Décision 29)

(1982-1986)

1. Introduction

Le présent Rapport constitue une réponse aux questions posées par la Commission d'études XVIII du CCITT à la Commission d'études 7 du CCIR en ce qui concerne la qualité de fonctionnement et la fiabilité des horloges de référence à utiliser dans les systèmes de télécommunications numériques. Il formule également certaines observations sur la Recommandation G.811 du CCITT.

Le § 2 du présent Rapport a pour objet de s'assurer que les questions ont été comprises et ont reçu des réponses adéquates en vue de mettre au point, dans la mesure du possible, un langage commun dans le domaine du temps et de la synchronisation.

Le § 3 contient les données actuellement disponibles sur la fiabilité de certains types d'horloge fonctionnant dans des services tels que ceux du temps-étalon et des fréquences étalon, la navigation et les télécommunications.

Le § 4 se réfère aux Rapports du CCIR concernant les techniques de mesure existantes qui permettent de comparer une horloge à l'échelle de temps de référence commune UTC.

2. Termes et définitions concernant les caractéristiques de fonctionnement des horloges

Pour faciliter la compréhension de ses textes, la Commission d'études 7 du CCIR a, dans son Rapport 730, élaboré un glossaire où sont énumérés, définis et expliqués la plupart des termes couramment utilisés dans les mesures de fréquence et de temps.

L'écart de fréquence à long terme de $\pm 1 \times 10^{-11}$ toléré dans la Recommandation G.811 est 2 fois supérieur à l'incertitude de l'UTC déterminée par le Bureau international de l'heure. L'UTC est donc, dans le présent contexte, une approximation satisfaisante d'une horloge idéale.

Etant donné la nature non stationnaire des erreurs d'intervalle de temps (TIE) des horloges actuelles sur de plus longues périodes d'observation ($T > 10$ jours), la Commission d'études 7 a fondé la plupart de ses travaux sur les concepts d'instabilité de fréquence comme phénomène de base.

L'erreur d'intervalle de temps (TIE), mentionnée dans la Recommandation G.811, peut être interprétée comme l'intégrale de l'écart de fréquence normalisé calculé pendant l'intervalle de temps S . Si l'on désigne par t_0 le début de l'intervalle S , on a :

$$TIE = x(t_0 + S) - x(t_0) = \int_{t_0}^{t_0 + S} y(t) dt \quad (1)$$

en utilisant la notation du Rapport 580. La pente indiquée par un trait tireté sur la Fig. 1/G.811 représente ainsi l'écart de fréquence moyen :

$$\bar{y}_0(t_0, S) = \frac{1}{S} \int_{t_0}^{t_0 + S} y(t) dt \quad (2)$$

Cet écart est manifestement dû à l'*instabilité de fréquence* de l'horloge, tandis que la pente moyenne à long terme est due à l'*erreur du réglage initial de fréquence* de l'horloge par rapport à la valeur nominale. L'erreur du réglage de fréquence initial dépend des techniques de mesure utilisées pour comparer l'horloge à une référence extérieure (système Loran-C ou services nationaux de temps et de fréquence, par exemple). Les caractéristiques qui définissent le fonctionnement des horloges et d'autres propriétés telles que la dimension, le poids, la consommation d'énergie, etc. sont indiquées dans le Rapport 364. Les instabilités aléatoires sont décrites à l'aide des mesures statistiques recommandées dans la Recommandation 538 et exposées dans le Rapport 580. Dans ces textes, le temps d'échantillonnage, équivalant à la période d'observation (de S secondes), est désigné par la lettre minuscule grecque τ .

* Le Directeur du CCIR est prié de porter le présent Rapport à l'attention du CCITT. Ce Rapport remplace la version précédente du Rapport 898 et le Rapport 737 qui est, en conséquence, supprimé.

On peut utiliser l'estimation ci-après, d'écart type de la TIE, fondée sur des simulations d'ordinateur [Kartaschoff, 1979] du modèle statistique d'horloge pour prévoir une erreur d'intervalle de temps probable d'une horloge ajustée et synchronisée à $t = 0$ et qu'on laisse ensuite fonctionner librement:

$$(TIE)_{est} = \frac{a}{2} t^2 + t \cdot (\sigma_{y_0}^2 + \sigma_y^2(\tau = t))^{1/2} \quad (3)$$

où:

a : dérive de fréquence linéaire normalisée par unité de temps (vieillessement);

σ_{y_0} : écart type de deux échantillons de réglage initial de fréquence et

$\sigma_y(\tau)$: écart type des deux échantillons décrivant l'instabilité aléatoire de fréquence de l'horloge.

On admet que les paramètres qui caractérisent l'horloge ne changent pas avec le temps et que l'erreur de réglage initial et les fluctuations aléatoires ultérieures de fréquence sont statistiquement indépendantes. Comme le montre la formule ci-dessus, c'est l'erreur de réglage initial de fréquence qui prédominera dans la plupart des cas.

3. Fiabilité des horloges

3.1 Généralités

La fiabilité d'un appareil est la probabilité mathématique de son fonctionnement selon certaines spécifications jusqu'à un moment donné t . Pour les appareils électroniques, la fiabilité correspond traditionnellement à la valeur statistique de la moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF).

L'estimation de la MTBF nécessite des données relatives à de nombreuses années de fonctionnement pour aboutir à des statistiques utiles. Ces données peuvent être obtenues à partir des nombreuses horloges en exploitation, comme l'indique le § 3.3. Cependant, la statistique de la MTBF ne tient pas compte de la caractéristique temporelle de la fiabilité des horloges atomiques. Le § 3.2 montre que les horloges à césium d'un ensemble d'horloges soigneusement géré qui sont exploitées depuis plus d'un an semblent plus fiables que les nouvelles horloges. Ceci peut résulter du vieillissement ou de la fin de vie de certains éléments, comme les tubes à jet ou les éléments d'optique. Dans le § 3.3, il est discuté des raisons pour lesquelles cette caractéristique n'a pas été constatée sur les très nombreuses horloges en exploitation courante.

On définit la fiabilité d'une horloge atomique en terme de durée moyenne de vie (DMV) et de période de demi-vie (DV) [Percival et Winkler, 1975]. Pour établir la statistique DMV, il faut que toutes les unités d'un jeu d'essai tombent en panne; cette statistique ne présente donc que peu d'intérêt lorsqu'on veut caractériser la fiabilité d'horloges atomiques. Toutefois, si l'on dispose de données permettant d'admettre en hypothèse une fonction de taux de défaillance, il est alors possible d'estimer ladite statistique. La statistique de la période de demi-vie est beaucoup plus utile; on peut en effet en tirer une probabilité simple: la survie d'une horloge atomique pendant une période de demi-vie est de 50%. Pour pouvoir évaluer cette durée, il suffit que la moitié d'un jeu d'horloges d'essai tombe en panne.

La meilleure statistique permettant de calculer les facteurs de fiabilité est la probabilité qu'une horloge, ayant survécu pendant une durée t , tombera en panne au moment $t + \Delta t$. Si les horloges ne sont plus soumises à l'évaluation de la fiabilité après leur première défaillance, on peut définir la fonction conditionnelle du taux de défaillance comme suit:

$$Z(t) \Delta t = - \left[\frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(t)} \right] \quad (4)$$

où $N(t)$ représente le nombre d'horloges dont on escompte qu'elles fonctionneront à un moment t et $N(0)$ représente le nombre initial d'horloges sur un ensemble donné.

Dans les mêmes conditions, on peut estimer que:

$$Z(t) = - \left[\frac{\Delta N'(t)}{N'(t) \Delta t} \right] \quad (5)$$

où $N'(t)$ représente le nombre d'horloges qui fonctionnaient au moment t et sont tombées en panne dans l'intervalle entre t et $t + \Delta t$ ou fonctionnaient encore au moment $t + \Delta t$ et $\Delta N' = N'(t + \Delta t) - N'(t)$.

Si les horloges défaillantes sont réparées puis remises en service, $Z(t)$ peut être évalué comme suit:

$$Z(t) = \frac{F}{U} \quad (6)$$

où:

F : nombre de défaillances au cours d'un intervalle de temps donné; et

U : nombre d'unités en service au cours de ce même intervalle de temps.

La légère différence conceptuelle entre les deux $Z(t)$ définis ci-dessus n'est pas significative.

Il existe des fonctions assez simples permettant d'établir un modèle de $Z(t)$ pour des régions restreintes de t .

$Z(t) = c$, c étant une constante, correspond à la loi de probabilité exponentielle. Cette expression sert à décrire des phénomènes tels que la durée de vie d'un tube électronique. On suppose alors que les défaillances, étant dues à des accidents purement aléatoires, sont indépendantes de l'âge de l'appareil. En pareil cas, on peut estimer que la MTBF est égale à la demi-vie t_{HL} .

$Z(t) = kt$, k étant une constante, repose sur l'hypothèse selon laquelle le taux de défaillance conditionnel augmente en fonction du temps. Il semble que ce modèle définisse bien le taux de défaillance d'horloges commerciales à jet de césium après plusieurs années de fonctionnement, mais non pas le taux sur toute une durée de vie.

3.2 Observations sur un ensemble d'horloges à césium soigneusement géré

Le taux de défaillance conditionnel (en janvier 1970) d'un ensemble d'horloges de l'U.S. Naval Observatory (USNO) est approximativement décrit par $Z(t) = kt$ où $k = 0,1$. La plupart de ces horloges fonctionnaient déjà depuis une année ou deux. Le Tableau I montre la durée moyenne de vie et la période de demi-vie pour divers modèles de $Z(t)$.

Le Tableau II donne des estimations de $Z(t)$ pour un ensemble d'horloges de l'USNO composé de deux modèles commerciaux différents, dont certaines sont des appareils de la première génération.

TABLEAU I — Durée moyenne de vie et période de demi-vie
pour divers modèles de $Z(t)$
(pour $Z(t)$ par an)

	$Z(t) = c$		$Z(t) = kt$
	$c = 0,1$	$c = 0,3$	$k = 0,1$
t_{DV} (années)	6,93	2,31	3,72
t_{DMV} (années)	10,00	3,33	3,96

TABLEAU II — Valeurs estimées de $Z(t)$
sur la base d'un ensemble d'horloges de l'USNO
(Probabilité, $Z(t) \Delta t$ pour $\Delta t = 1$ année, de défaillance
de l'horloge au cours de l'année suivante, étant donné
que l'horloge a duré un nombre d'années t)

t	$Z(t) \Delta t$ pour $\Delta t = 1$ année
0,0	0,31 ± 0,03
0,5	0,24 ± 0,04
1,0	0,19 ± 0,04
1,5	0,20 ± 0,04
2,0	0,21 ± 0,05
2,5	0,20 ± 0,05
3,0	0,36 ± 0,07
3,5	0,46 ± 0,08
4,0	0,47 ± 0,11

3.3 *Fiabilité de fonctionnement des horloges*

Les données sur la fiabilité de fonctionnement sont présentées pour les dispositifs ci-après:

- horloges à césium,
- horloges à rubidium,
- oscillateurs à quartz.

Il n'est pas tenu compte d'autres appareils également énumérés dans le Rapport 364 pour diverses raisons: poursuite des recherches, très petit nombre, absence de données sur la fiabilité, etc., par exemple, qui en limitent actuellement les possibilités d'application à grande échelle dans les systèmes.

Compte tenu des limites de fonctionnement spécifiées dans la Recommandation G.811 du CCITT, les critères de défaillance à appliquer se divisent en deux catégories:

Les horloges à quartz et au rubidium nécessitent un réglage initial de la fréquence et un contrôle ultérieur de la fréquence à l'aide d'une référence extérieure pour compenser la dérive de fréquence qui leur est propre. Un réglage inadéquat et une absence de contrôle se traduisant par une violation des spécifications ne peuvent être considérés comme des défaillances des appareils.

Les horloges à césium ont une incertitude systématique inférieure à $\pm 1 \times 10^{-11}$, limite spécifiée par la Recommandation G.811 du CCITT et présentent, en général, une dérive de fréquence négligeable. Une violation de cette limite peut donc être considérée comme une défaillance.

Exception faite de cette distinction, d'autres défaillances, comme la dégradation ou l'affaiblissement du signal de sortie, sont communes à tous les appareils.

Une enquête sur la fiabilité a été entreprise en janvier 1981 au moyen d'un questionnaire adressé par l'intermédiaire des délégués des administrations intéressées aux utilisateurs et aux constructeurs des pays participants. Ces délégués ont en outre rassemblé, vérifié et, selon le cas, corrigé les réponses, puis les ont envoyées au Président du Groupe de travail intérimaire 7/5 pour analyse. Les résultats consignés dans le présent Rapport sont fondés sur les données reçues jusqu'en octobre 1983. A cette date, les pays suivants avaient répondu au questionnaire: République populaire de Chine, République fédérale d'Allemagne, Etats-Unis, France, Italie, Japon, Pays-Bas, Suède, Suisse et Royaume-Uni. Le nombre total d'unités dont il est fait état s'élève à 4125, soit 1230 horloges à césium, 225 horloges à rubidium et 2670 oscillateurs à quartz.

La plupart des données portent sur une durée de 11 ans (1970 à 1980).

Les méthodes suivantes ont été appliquées pour le traitement des données:

Pour chaque modèle, les feuilles ont été groupées sur la base de la désignation des constructeurs, par exemple: HP 5061A (Cs); R&S XSRM (Rb); B 5400 (Xtal), etc.

On a séparé les rapports des constructeurs des rapports des utilisateurs.

Les valeurs suivantes ont été définies et calculées pour chaque modèle:

ΣU : somme totale des années de fonctionnement de toutes les horloges étudiées;

ΣF : total des défaillances observées pour ces unités.

On a ensuite calculé le rapport $\Sigma U / \Sigma F = MTBF$ en années en admettant que le taux de défaillance est constant sur les 11 années d'observation.

Plusieurs raisons expliquent que les taux de défaillance conditionnels, tels que définis au § 3.1, ne peuvent actuellement être évalués avec une incertitude moindre que celle de l'estimation MTBF mentionnée ci-dessus. On observe de grandes différences d'âge et de conception des modèles; de plus, pour obtenir un échantillon statistique important, on a utilisé toutes les données disponibles se rapportant à cette période de 11 ans, y compris celles concernant des horloges qui, étant tombées en panne, avaient été réparées et qui ont pu retomber une ou plusieurs fois en panne.

On observe aussi de fortes divergences dans le MTTR (temps moyen de réparation d'une unité défaillante, y compris les délais d'expédition). Les moyennes vont de 80 à 140 jours et l'importance de la situation géographique des unités a une grande influence. La moyenne générale de 90 jours environ pour le MTTR est la meilleure indication possible dans le cas des horloges Cs et Rb. On n'a pas donné de valeurs de MTTR pour les horloges à quartz.

Les Tableaux III, IV et V indiquent les estimations de la MTBF qui en résultent, calculées sur la base des données aujourd'hui disponibles.

TABLEAU III – Horloges à césium

Modèle (année)	ΣU	ΣF	MTBF (années)	MTTR (jours)	Nombre total d'unités
<i>Rapport des utilisateurs</i>					
HP5061A (1968)	3347	823	4,07 ^{+0,69} -0,52	90	492
OSA 3200 (1975/76)	96	32	3,0 ^{+0,6} -0,4	90	25
HP5061A-004 (1973)	118	44	2,68 ^{+0,41} -0,31	90	24
HP5060A ⁽¹⁾ (1965)	133	42	3,17	90	21
OSA 3000 (1976)	29	10	2,9 ^{+0,9} -0,6	90	14
HP5062 ⁽¹⁾ (1973)	1648	319 ⁽²⁾	5,2 ^{+1,0} -0,7		408
<i>Rapport des constructeurs</i> (voir commentaire § 3.3)					
OSA 3000 (1976)	285	30	9,6	35	97
OSA 3200 (1975)	679	161	4,22	50	149

⁽¹⁾ Modèle ancien, n'est plus en production.

⁽²⁾ Pour ce type d'horloge, seules les défaillances du tube à césium et les défaillances connexes ont été prises en considération.

TABLEAU IV – Horloges à rubidium

Modèle (année)	ΣU	ΣF	MTBF (années)	MTTR (jours)	Nombre total d'unités
HP5065A (1970)	159	21	7,6	120	31
FRT/FRK (1973)	584	52	11,2	90	159
XSRM (1972)	71	13	5,5	90	15
P01 (1976)	44	41	1,08	—	20

TABLEAU V — Horloges à quartz

Modèle	1 ^{ère} année	ΣU	ΣF	MTBF (années)	Nombre total d'unités	Notes
<i>Rapport des utilisateurs</i>						
B5400	1974	48	1	48	11	
B1250	1973	8	1	8	1	(¹)
B1010	1965	926	25	37	132	(¹)
HP104/105	1970	46	4	11,5	5	(²)
R&S XSC/D/S	1970	136	13	10,5	15	(²)
C60MCS	1972	223	1	200	52	
CP12MCS	1970	6316	33	191	1288	
MT	1975	834	13	64	139	
K	1975	1353	2	200	235	
<i>Rapport des constructeurs</i>						
OSA B5400	1974	1352	27	50	318	
OSA B1250	1970	214	3	71	20	(¹)
HCD HCD50	1970	4383	104	42	587	

(¹) Périmé, n'est plus fabriqué.

(²) Unités combinées en une seule réponse en raison d'une grande similitude de conception et de l'absence de biais manifeste.

Le Tableau III indique des marges de confiance (1σ) pour les estimations de MTBF. Ces marges ont été calculées comme suit:

On a utilisé les données de la population la plus nombreuse (HP5061A, 492 unités). L'addition des colonnes pour chaque année a permis d'obtenir les séquences du nombre d'unités en service (Σu_i) et de défaillances (ΣF_i). Une séquence de rapports

$$Z_i = \frac{\Sigma F_i}{\Sigma U_i}$$

a ensuite été calculée pour chaque année (1970 à 1980), comme indiqué au Tableau VI. Z_i est une estimation du taux annuel de défaillance pour la population totale d'unités d'âges divers, cette population augmentant régulièrement, le nombre d'unités mises en service chaque année dépassant celui des unités anciennes mises hors service. Un essai a montré que ces valeurs de Z_i sont distribuées selon une loi normale. La valeur médiane est $Z_m = 0,22$, avec un écart type $\sigma_z = \pm 0,094$. L'erreur relative probable de la médiane est ainsi d'environ $\pm 6\%$. L'inverse de la valeur médiane, $Z_m^{-1} = 4,35$ années, est très proche de l'estimation de la MTBF (4,07 années) indiquée par le Tableau III dans lequel les marges de confiance ont été calculées sur la base de l'estimation de l'erreur relative ci-dessus (soit 12,5%) sur le taux moyen de défaillance de $1/4,07 = 0,246$.

Les marges de confiance des autres modèles ont été calculées de manière similaire. Les données sur le HP5060A n'ont qu'un intérêt historique. Aucune estimation de ce genre n'a été faite sur les données résumées dans les Tableaux IV et V. Pour le Tableau IV, les populations sont trop faibles et les unités du Tableau V sont très variables, certaines ayant une MTBF constamment très élevée.

Le Tableau VII indique les distributions des défaillances entre les divers sous-ensembles des horloges à césium sur la base des rapports des utilisateurs et des constructeurs. Les données sur les unités HP ont été tirées de [Johnson et autres, 1980].

On peut commenter les divergences entre les rapports des utilisateurs et ceux des constructeurs, en particulier dans le Tableau III. On peut être certain que les constructeurs ont fait de leur mieux pour fournir des indications véridiques et exactes. Mais, certains utilisateurs assurent directement la réparation de défaillances secondaires sans les signaler aux constructeurs. Certaines divergences sont donc manifestement inévitables. Une amélioration de l'échange d'information sur les défaillances et les réparations servirait autant les intérêts des usagers que ceux des constructeurs.

Les données recueillies jusqu'ici ne couvrent qu'une faible partie de la population mondiale d'horloges de précision. Aucune pointe n'a été observée au cours de la première année d'exploitation des horloges à césium, c'est-à-dire que les «maladies de jeunesse» semblent avoir été gommées par l'opération de rodage effectuée par les constructeurs.

TABLEAU VI

Année	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
ΣU_i	51	70	104	162	204	255	291	328	349	370	386
ΣF_i	7	24	19	16	32	36	48	54	67	95	118
Z_i	0,137	0,343	0,183	0,099	0,157	0,141	0,165	0,165	0,192	0,257	0,306

TABLEAU VII — Horloges à césium

Modèle: HP5061A — OSA B3200 — HP5061A-004 — HP5062A — OSA 3000

Modèle	Résonateur atomique	Oscillateur à quartz	Circuits de conditionnement de fréquence	Circuits d'asservissement	Circuits de sortie	Alimentation	Autres composants	ΣU (ΣF) ⁽¹⁾
<i>Rapport des utilisateurs</i>								
HP5061A								
F_i	175	72	97	50	12	68	28	3347
%	35	14	19	10	2	14	6	(502)
OSA B3200								
F_i	38	4	0	0	8	40	15	96
%	36	4	0	0	8	38	14	(105)
HP5061A-004								
F_i	16	9	4	4	1	2	4	118
%	40	23	10	10	3	5	10	(40)
HP5062A								
F_i	213	46	41	88	69	228	102	1648
%	27	6	5	11	9	29	13	(787)
<i>Rapport des constructeurs</i>								
HP5061 ⁽²⁾								
5061-004 F_i	62	17	44	21	40	6	4	(194)
5062C %	32	9	23	11	20	3	2	
OSA 3200 F_i	20	21	15	15	9	83	1	679
%	12	13	9	9	5	51	1	(164)
OSA 3000 F_i	8	8	1	3	1	3	6	289
%	27	27	3	10	3	10	20	(30)

⁽¹⁾ Valeur généralement plus élevée que celle de ΣF indiquée dans le Tableau III, en raison de plusieurs défauts simultanés.

⁽²⁾ Nombre d'unités non déclaré.

3.4 Tests de qualification et essais de recette

On devrait mettre au point un *test spécifique de qualification* pour chaque horloge/type d'étalon, permettant d'établir des marges de fonctionnement pour s'assurer que les horloges peuvent fonctionner dans des conditions ambiantes extrêmes. En outre, la marge de fonctionnement doit être déterminée pour les situations dans lesquelles toutes les conditions limites sont simultanément présentes. Les essais portant sur l'environnement doivent comprendre les mesures suivantes, cette liste n'étant toutefois pas exhaustive:

- Température
- Vibration
- Chocs
- Champs magnétiques alternatifs
- Champs magnétiques statiques
- Interférences par conduction
- Interférences par rayonnement
- Pression atmosphérique
- Humidité

Dans une chambre à vide spécialement conçue, on a mesuré l'effet des conditions de l'environnement sur le rythme d'une horloge commerciale au césium de haute qualité. Les changements de rythme dus à des modifications de la température (par °C entre 24 et 31 °C), de l'humidité absolue (par gm^{-3} entre 7 et 18 gm^{-3}), de la pression atmosphérique (par 100 mbar entre 673 et 1007 mbar (100 mbar = 10^4 Pa)) et du champ magnétique terrestre (par 100 mOe entre -135 et 135 mOe (100 mOe = 8 Am^{-1})) ont été inférieurs à $\pm 2 \times 10^{-14}$, avec des incertitudes moyennes estimées de l'ordre de 10^{-15} . Les résultats ainsi obtenus, sur une seule horloge à césium, montrent que l'influence des changements des conditions ambiantes citées ci-dessus n'est pas assez faible pour être négligée et qu'il faut soigneusement contrôler les conditions de l'environnement pour maintenir le fonctionnement des horloges atomiques aussi uniforme que possible [Iijima et autres, 1978].

Il convient toutefois de noter que les valeurs spécifiques ne pourraient pas être généralisées en tant que coefficients de sensibilité. Elles ne sont pas les mêmes d'une horloge à l'autre et ne sont même pas fixes pour une horloge donnée puisqu'elles dépendent de l'ampleur et de la rapidité des changements du paramètre.

Une fois établies ces limites pour un modèle donné, il faut spécifier des *niveaux d'essai de recette* de manière à s'assurer que le fonctionnement de chaque appareil livré a été mesuré compte tenu des marges calculées.

Avant la livraison, pour éliminer les *défauts de fabrication*, chaque appareil doit être exposé à une gamme de vibrations aléatoires pendant au moins deux minutes dans chaque dimension de l'espace. On doit ensuite le soumettre à cinq cycles d'extrêmes de température, en le maintenant à chaque cycle pendant au moins quatre heures, puis en le vérifiant après une semaine de fonctionnement pour s'assurer que les marges de fonctionnement sont toujours respectées.

3.5 Continuité de fonctionnement

Dans la plupart des applications des étalons de temps et de fréquence, particulièrement dans le domaine des télécommunications, des conditions strictes sont imposées en ce qui concerne la continuité d'exploitation: il faut donc prévoir des sources multiples si l'on veut se prémunir contre les interruptions de fonctionnement. Un moyennneur de fréquence a été mis au point par le National Physical Laboratory (NPL) en développant un travail antérieur [McLeod et Wise, 1975]. Cet équipement fournit une fréquence de sortie qui la moyenne pondérée d'un certain nombre de fréquences (5 au maximum), le facteur de pondération appliqué à chacune pouvant varier de 0 à 5 par échelons d'une unité. Les variations des facteurs de pondération et additions ou suppressions de fréquences font l'objet d'une compensation automatique. On dispose ainsi d'un système fortement redondant qui constitue, de ce fait, une source extrêmement fiable pour un canal de télécommunication. De plus, l'amélioration de ce signal «moyen» en ce qui concerne la stabilité de fréquence par rapport à celle d'un signal isolé peut être fort intéressante dans certains cas.

Il existe d'autres possibilités d'assurer la continuité du fonctionnement, notamment l'emploi d'oscillateurs asservis synchronisés équipés d'une mémoire dans le système de commande.

3.6 Conclusions

L'enquête sur la fiabilité des horloges de précision décrite dans le § 3.3 a déjà donné d'intéressants résultats. Les estimations de la MTBF pour les horloges à césium, à rubidium et à quartz confirment la règle ancienne selon laquelle la MTBF est inversement proportionnelle à la complexité d'un dispositif. Cependant, les dispositifs les plus complexes sont aussi les plus stables en fréquence et pourraient donc nécessiter un travail de surveillance et de maintenance moindre (notamment pour ce qui est des réglages de fréquence) dans le cadre de l'exploitation d'un système. Il ne faut pas oublier que des statistiques établies sur la base de données d'origine et de conditions de fonctionnement très différentes ont une valeur limitée et peuvent être sujettes à certains biais.

Les Tableaux III et IV montrent l'importance de l'expérience de la construction quant à l'amélioration de la fiabilité. L'examen détaillé des éléments et le rodage permettent de considérablement réduire le nombre des défaillances initiales. Certaines faiblesses cachées peuvent n'apparaître qu'après quelques années de fabrication et d'exploitation. Cela étant, le niveau de la fiabilité atteinte par les horloges à césium est remarquable.

4. Techniques de mesure

Seules les mesures permettent d'assurer la conformité aux spécifications. Les méthodes actuelles de comparaison applicables au transfert et à l'émission des signaux horaires et des fréquences étalon sont passées en revue dans les Rapports 363 et 518.

Les horloges à quartz, au rubidium et à césium exigent toutes des contrôles visant à assurer un fonctionnement adéquat. Les horloges à quartz et au rubidium nécessitent un étalonnage et un réajustement périodiques afin de satisfaire aux tolérances de fréquence de la Recommandation G.811 du CCITT, ce qui n'est pas le cas des horloges à césium. Toutefois, la comparaison à long terme avec d'autres horloges de référence constitue un facteur de sécurité important pour la détection de défaillance.

Le principal problème que pose la mesure du temps d'horloge sur une certaine distance tient à l'incertitude du temps de propagation du trajet. Cette valeur détermine généralement le choix de la méthode de comparaison. Bien que le synchronisme soit réalisable et souhaitable dans un réseau étendu, du fait que les temps de propagation ne sont pas parfaitement stables, on est amené à se demander quel est le niveau de précision à prévoir. Des comparaisons bidirectionnelles d'échelles de temps permettent d'éliminer dans une grande mesure l'effet des variations du temps de propagation. On peut établir ces comparaisons assez facilement en utilisant les impulsions de synchronisation normales de liaisons de communications numériques en duplex, c'est-à-dire les liaisons qui assurent des communications simultanées dans les deux sens. Cela permet d'effectuer des mesures très précises des erreurs de base de temps, mesures qui peuvent être utilisées dans l'exploitation de réseaux de communications numériques.

Le concepteur de systèmes de communications numériques a le choix entre plusieurs solutions. On peut référer les horloges du système à une horloge maîtresse unique qui, à son tour, fait référence à l'UTC. Un système élargi peut être subdivisé en différentes parties, chacune ayant leur propre horloge maîtresse qui se réfère à l'UTC. Ces deux possibilités ont été expérimentées avec succès au Canada. Dans le premier cas, l'horloge maîtresse du réseau a été comparée à la norme de fréquence nationale au NRC (National Research Center). Dans le second cas, plusieurs horloges maîtresses ont été verrouillées en phase sur les signaux du système de navigation Loran-C.

Une décision qui revêt une grande importance au moment de la conception du système concerne le degré de confiance à accorder aux horloges, c'est-à-dire la constante de temps dans la boucle de commande de la fréquence par rapport à la qualité des horloges [Kartaschoff, 1980].

Les méthodes de comparaison par satellite offrent de grandes possibilités, surtout dans les zones où il n'existe pas d'autres signaux horaires à grande stabilité (Rapport 518).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- IJJIMA, S., FUJIWARA, K., KOBAYASHI, H. et KATO, T. [1978] Effect of environmental conditions on the rate of a caesium clock. *Ann. Tokyo Astron. Observatory*, Université de Tokyo, 2^e série, Vol. 17, 1, 50-67.
- JOHNSON, A., FORCE, M. et OSTERDOCK, T. [1980] Longevity performance of caesium clocks. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphie, Pa, Etats-Unis d'Amérique. (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).
- KARTASCHOFF, P. [septembre 1979] Computer simulation on the conventional clock model *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-28, 3, 193-197.
- KARTASCHOFF, P. [décembre 1980] Reference clock parameters for digital communications systems applications. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md, Etats-Unis d'Amérique). NASA CP 2175, 515-548.
- McLEOD, N. W. et WISE, J. [1975] Clock averaging circuit. *Electron. Lett.* Vol. 11, 18, 428-429.
- PERCIVAL, D. B. et WINKLER, G. M. R. [1975] Timekeeping and the reliability problem. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control. (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, Etats-Unis d'Amérique).

BIBLIOGRAPHIE

- ZHUANG QI XIANG [1980] Reliability research of rubidium clock. *Ann. Shanghai Observatory*. Academia Sinica, Vol. 2.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES, RÉOLUTIONS, VŒUX ET DÉCISIONS

QUESTION 1/7

ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

(1948-1951-1953-1956-1963)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications, Genève, 1979, a demandé la coordination de l'établissement et du fonctionnement d'un service de fréquences étalon et de signaux horaires à l'échelle mondiale;
- b) que plusieurs stations émettent désormais régulièrement des fréquences étalon et des signaux horaires dans les bandes attribuées par cette Conférence;
- c) que certaines régions du monde ne sont pas encore efficacement desservies;
- d) que l'emploi d'un nombre de stations plus élevé qu'il n'est techniquement nécessaire peut provoquer des brouillages qui diminueraient l'efficacité du service,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

- 1. mesures à recommander pour accroître l'efficacité du service de fréquences étalon et de signaux horaires fonctionnant actuellement dans les bandes attribuées par cette Conférence;
- 2. mesures à recommander pour la réduction des brouillages mutuels entre stations de fréquences étalon et de signaux horaires fonctionnant sur la même fréquence et dont les zones de service se recouvrent.

Note. — Voir les Recommandations 374, 376, 457, 458, 460, 485, 535, 536, les Rapports 267, 731, 896, la Résolution 14 et les Vœux 26, 28 et 71.

PROGRAMME D'ÉTUDES 1A-1/7

AMÉLIORATION D'EFFICACITÉ DU SERVICE DE FRÉQUENCES ÉTALON
ET DE SIGNAUX HORAIRES

(1965-1970)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que dans la Question 1/7 et dans la Recommandation 374 des renseignements sont demandés sur les méthodes propres à améliorer l'efficacité du service existant d'émissions de fréquences étalon et de signaux horaires;
- b) que des stations de fréquences étalon travaillent simultanément sur la même fréquence porteuse,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

- 1. rechercher les possibilités de réduire les brouillages mutuels entre les émissions du service de fréquences étalon et de signaux horaires:
 - 1.1 en réduisant la durée du programme de la modulation continue à fréquences acoustiques et des annonces;
 - 1.2 en employant une modulation qui donne les renseignements et la précision nécessaires avec la largeur de bande minimale;
 - 1.3 en décalant les fréquences émises dans les bandes attribuées et en employant une méthode de modulation convenable;
 - 1.4 en adoptant un système convenable et coordonné de partage du temps entre les émissions de fréquences étalon dans les régions où celles-ci sont sujettes à des brouillages mutuels;
 - 1.5 en évitant toute émission sans modulation de la porteuse, qui ne soit pas nécessaire pour l'exploitation du service;

- 2. réunir des données sur la façon dont les émissions de fréquences étalon dans les bandes 6 et 7 peuvent être coordonnées avec les émissions dans d'autres bandes pour assurer le meilleur service global à l'échelle mondiale.

Note. — Voir la Recommandation 537 et le Rapport 732.

QUESTION 2/7

**ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRE
DANS DE NOUVELLES BANDES DE FRÉQUENCES**

(1956-1963)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que les services d'émissions de fréquences étalon et de signaux horaires existant à l'heure actuelle ne permettent pas toujours, dans certaines régions, et notamment dans les centres industriels, d'obtenir un rapport suffisant du signal utile au niveau des bruits;
- b) que les bandes attribuées pour les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires sont plus utiles pour les besoins de la distribution à grande distance que pour la distribution locale;
- c) qu'un service de meilleure qualité est nécessaire dans certaines régions et que ce service peut être obtenu moyennant l'utilisation de fréquences de la bande 8 et de fréquences plus élevées;
- d) qu'il est possible d'effectuer des comparaisons de fréquence et de temps avec une précision élevée en utilisant des fréquences prises dans les bandes 4 et 5,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelles recommandations peut-on faire pour la distribution de fréquences étalon et de signaux horaires au-dessus de 30 MHz et au-dessous de 100 kHz environ?

Note. — Voir les Recommandations 375, 582, le Rapport 518 et les Vœux 27 et 72.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2A-2/7

**ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX
HORAIRE PAR SATELLITE**

(1963-1970-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que les progrès scientifiques et techniques incessants ont accru les exigences pour ce qui est de la précision et de la portée de service des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires;
- b) que, dans leurs travaux, plusieurs des Commissions d'études du CCIR décrivent des systèmes de radiocommunication utilisant des satellites, avec lesquels on peut compter sur une couverture étendue et une stabilité satisfaisante des signaux sur toute la surface terrestre;
- c) que les techniques de communication par satellite constituent la base des systèmes, actuels et futurs, de comparaison et de diffusion des fréquences étalon et des signaux horaires;
- d) que certains services mettant en œuvre des satellites (par exemple pour la navigation, la météorologie, les sciences de la Terre, la télévision), peuvent également être utilisés aux fins de la comparaison et la diffusion des fréquences étalon et des signaux horaires,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. facteurs techniques et mesures quantitatives dont il faut tenir compte lorsqu'on recommande des fréquences et lorsqu'on spécifie les techniques d'émission, de modulation et de réception qui présentent de l'importance pour la réalisation d'émissions de fréquences étalon et de signaux horaires par satellite;
2. conditions techniques et d'exploitation dont il faut tenir compte lorsque l'on aménage des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires à bord de satellites hôtes.

Note. — Voir les Rapports 518, 736 et la Décision 28.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2B/7

**MODES D'EXPLOITATION POUR L'ÉMISSION DE FRÉQUENCES ÉTALON
ET DE SIGNAUX HORAIRES DANS LES BANDES
D'ONDES MYRIAMÉTRIQUES ET KILOMÉTRIQUES**

(1976)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que l'utilité des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires dans les bandes d'ondes myriamétriques et kilométriques dépend des caractéristiques d'exploitation des émetteurs, des méthodes de modulation et des gabarits des signaux utilisés,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

méthodes techniques et modes d'exploitation applicables aux émetteurs et aux antennes, méthodes de modulation et gabarits de signaux pouvant être recommandés pour la diffusion des fréquences étalon et des signaux horaires sur des fréquences inférieures à 100 kHz environ.

Note. — Voir le Rapport 735.

QUESTION 3-1/7**STABILITÉ DE LA RÉCEPTION DES ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES
ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES**

(1956-1959-1963-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires sont moins stables à la réception qu'à la source en raison des phénomènes qui se produisent dans la propagation des ondes radioélectriques, dans un milieu quelconque, par exemple, l'effet Doppler, la variation diurne et les brouillages par trajets multiples;
- b) que les erreurs se produisant au cours de la propagation dépendent de l'emplacement géographique de l'émetteur et du récepteur, ainsi que de la nature et des conditions du milieu et sont généralement différentes dans les diverses régions du spectre radioélectrique;
- c) que des techniques spéciales d'émissions de fréquences étalon et de signaux horaires peuvent améliorer la précision avec laquelle elles peuvent être reçues;
- d) que la précision avec laquelle les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires peuvent être reçues peut dépendre de la conception de l'appareillage de réception,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont les causes de dégradation de la stabilité et de la précision des fréquences étalon et des signaux horaires, tels que les usagers les reçoivent;
2. quelle est la répartition statistique des valeurs de l'instabilité produite par ces causes;
3. quelles sont les techniques d'émission et de réception de fréquences étalon et de signaux horaires permettant d'obtenir les meilleurs résultats dans la réception:
 - des fréquences étalon et des signaux horaires employés par des usagers ayant besoin d'une précision moyenne;
 - des fréquences étalon et des signaux horaires employés par des usagers ayant besoin de la précision maximale possible?

Note. — Voir la Recommandation 486 et le Rapport 271.

PROGRAMME D'ÉTUDES 3A-1/7

**UTILISATION OPTIMALE DU SPECTRE DES FRÉQUENCES
POUR LES SIGNAUX HORAIRE DE HAUTE PRÉCISION**

(1959-1970)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'une plus haute précision dans la transmission des signaux horaires entraîne, avec les techniques actuelles, une augmentation de la largeur de bande;
- b) que, cependant, des techniques récemment mises au point peuvent conduire à une économie considérable sur la largeur de bande pour une précision donnée;
- c) les effets des bruits de toute nature sur les performances des systèmes,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. relations entre les largeurs de bande nécessaires et les précisions que l'on peut obtenir actuellement pour divers rapports signal/bruit rencontrés en pratique;
2. techniques à bande étroite pour la production et la transmission de repères de temps de haute précision;
3. caractéristiques des trajets radioélectriques qui limitent l'exactitude des signaux horaires à la réception et influence des paramètres de ces trajets sur le choix de la meilleure méthode.

Note. — Voir le Rapport 270.

PROGRAMME D'ÉTUDES 3C-3/7

**COMPARAISON DE DIVERSES MÉTHODES DE TRANSFERT ET DE DIFFUSION
DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRE**

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'aux termes de la Recommandation 460, les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires doivent être coordonnées;
- b) que la comparaison de fréquences étalon et de signaux horaires diffusés par différentes méthodes apporte des données utiles sur les possibilités de ces méthodes,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. comparaisons des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires diffusés par diverses méthodes;
2. analyse des différences et des fluctuations observées afin de déterminer les possibilités offertes par ces différentes méthodes.

Note. — Voir les Rapports 363, 439 et 897.

PROGRAMME D'ÉTUDES 3D-2/7

MÉTHODES DE COMPARAISONS DE PHASES FIABLES EN ONDES MYRIAMÉTRIQUES

(1970-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il faut souvent prendre une valeur moyenne basée sur des échelles de temps d'horloges éloignées ou de groupes d'horloges éloignées et qu'à cette fin on fait un large emploi de la comparaison des phases d'ondes myriamétriques;
- b) que, dans le cas de comparaisons de phases d'ondes myriamétriques, il existe actuellement un risque de perdre occasionnellement la continuité de phases à la réception et que chaque perte de la continuité des phases peut causer une erreur non négligeable;
- c) que l'emploi de dispositifs de mesure étalonnés est une condition préliminaire à l'étude fondamentale du problème de la propagation des ondes myriamétriques;
- d) qu'il est conseillé de mesurer les valeurs des phases des ondes myriamétriques au moment du jour le plus favorable au point de vue de la fiabilité de la phase du signal reçu,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. renforcement du développement et de l'application d'appareils permettant de faire des étalonnages en vue de la comparaison des phases d'ondes myriamétriques;
2. recherches sur la propagation des ondes myriamétriques, visant à déterminer les conditions de réception les plus favorables aux fins des comparaisons journalières de phase.

QUESTION 4-1/7

DIFFUSION DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

(1965-1970)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire d'augmenter la précision des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires;
- b) que la précision à la réception des émissions actuelles de fréquences étalon et de signaux horaires est dégradée du fait que la propagation des ondes radioélectriques est soumise à certains effets comme les variations diurnes et l'effet Doppler,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelles techniques nouvelles peut-on employer pour améliorer la précision des diffusions de fréquences étalon et de signaux horaires?

Note. — Voir le Rapport 736.

PROGRAMME D'ÉTUDES 4A/7

DIFFUSION DE FRÉQUENCES ÉTALON PAR STABILISATION
DE LA FRÉQUENCE PORTEUSE D'UNE STATION
DE RADIODIFFUSION

(1966-1970)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il faut étudier de nouvelles méthodes de diffusion des fréquences étalon et des signaux horaires;
- b) que, dans certains pays, des stations fonctionnant dans les bandes de radiodiffusion émettent des signaux de fréquences étalon;

c) que certains avantages peuvent découler de la stabilisation des fréquences porteuses des stations de radiodiffusion, à savoir:

- la possibilité d'assurer à des centres urbains et industriels une bonne couverture par l'onde de sol, exempte d'erreurs dues à l'effet Doppler,
- le moyen d'obtenir une comparaison rapide de fréquences aux lieux de réception grâce à l'emploi de fréquences porteuses suffisamment élevées,
- l'utilisation de matériel de réception relativement simple,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination de la précision et de la stabilité à la réception des signaux en provenance de telles émissions;
2. étude de l'influence de l'emplacement des stations d'émission sur la commodité d'emploi et sur les caractéristiques de propagation des signaux;
3. intérêt qu'il peut y avoir à établir un service de cette nature;
4. étude des avantages relatifs de la modulation d'amplitude et de la modulation de fréquence pour la diffusion des signaux horaires et de l'emploi des bandes de radiodiffusion pour la diffusion de fréquences étalon par stabilisation d'une fréquence porteuse.

Note. — Voir le Rapport 576.

PROGRAMME D'ÉTUDES 4B/7

DIFFUSION DE SIGNAUX HORAIRES PAR APPLICATION D'UNE MODULATION DE PHASE ADDITIONNELLE AUX ÉMETTEURS DE RADIODIFFUSION SONORE A MODULATION D'AMPLITUDE

(1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire de diffuser largement les signaux horaires sans augmenter le nombre des émetteurs fonctionnant sur les fréquences attribuées aux services des fréquences étalon et des signaux horaires;
- b) qu'il est souhaitable d'explorer de nouvelles techniques pour diffuser les signaux horaires;
- c) qu'il y a lieu de tenir compte de la Recommandation I.3 adoptée par l'Union radioscopique internationale (URSI) à sa XVII^e Assemblée générale, Varsovie, 1972;
- d) que la couverture géographique des émetteurs de radiodiffusion sonore à modulation d'amplitude fonctionnant dans les bandes 5 et 6 est très étendue,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. possibilité de superposer des signaux horaires par modulation de phase de la porteuse d'un émetteur classique de radiodiffusion sonore à modulation d'amplitude, sans causer de gêne aux auditeurs des programmes de radiodiffusion;
2. possibilité d'appliquer ces techniques aux émetteurs de radiodiffusion sonore à modulation d'amplitude fonctionnant dans les bandes 5 et 6.

Note. — Voir le Rapport 577.

QUESTION 5-1/7

BESOINS EN MATIÈRE DE TRANSFERT DE TEMPS DE HAUTE PRÉCISION

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il existe à l'échelon mondial, un besoin croissant de transferts de temps à effectuer avec des précisions dépassant celles qu'on peut atteindre actuellement;
- b) qu'on peut satisfaire économiquement à de tels besoins en utilisant les possibilités chronométriques inhérentes à des systèmes ayant d'autres objectifs principaux,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelles techniques peut-on mettre au point, dans le cadre des systèmes mondiaux ou intercontinentaux existants ou indépendamment de ceux-ci, pour satisfaire aux besoins prévisibles d'atteindre une plus haute précision dans les transferts du temps?

PROGRAMME D'ÉTUDES 5A/7**BESOINS EN INDICATIONS DE TEMPS DE GRANDE PRÉCISION**

(1976)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que le LORAN-C permet, en permanence dans de nombreuses régions, un transfert de temps avec un écart type de 100 ns d'un jour à l'autre;
- b) que l'on a signalé, lors de comparaisons de temps effectuées sur des liaisons bidirectionnelles par satellite, des incertitudes de 10 à 50 ns;
- c) qu'il paraît possible, si l'on perfectionne les techniques de transmission par satellite et si l'on fait appel aux techniques du laser, de parvenir à des incertitudes dix fois moins grandes;
- d) que ces perfectionnements sont coûteux et que leur développement doit être dicté par les besoins,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

besoins actuels ou prévus en indications de temps de grande précision, convenant à diverses applications telles que systèmes de navigation, réseaux de transmission de données à grande vitesse, radiointerférométrie à très grande base (VLBI).

PROGRAMME D'ÉTUDES 5B-1/7**GARDE-TEMPS ET SYNCHRONISATION AUX NIVEAUX INFÉRIEURS A LA NANOSECONDE**

(1983-1985)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que les étalons de fréquence et de temps de référence sont générés en des points éloignés les uns des autres et qu'ils ne peuvent actuellement être maintenus en synchronisation au niveau de la nanoseconde,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. possibilité d'améliorer les comparaisons entre étalons de fréquence à des niveaux inférieurs à 1 ns;
2. détermination des possibilités limites de la mesure du temps, compte tenu des instabilités des instruments, des instabilités de propagation et d'autres corrections y compris les effets relativistes dus à l'influence des corps célestes proches.

QUESTION 7/7

CODES HORAIRES

(1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire de fournir une référence de temps, complète et sans ambiguïté, pour toutes sortes d'applications scientifiques et industrielles;
- b) qu'un certain nombre de stations émettent actuellement des codes horaires indiquant, au minimum, la minute, l'heure et le jour de l'année;
- c) qu'il est très souhaitable que de tels codes soient compatibles entre eux et avec les appareils que l'on trouve couramment dans le commerce,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. de quels formats de code peut-on recommander l'utilisation pour l'émission d'informations de temps codées;
2. quelles caractéristiques de modulation garantiront le mieux un décodage fiable en présence de bruit et de signaux brouilleurs?

Note. — Voir la Recommandation 583 et le Rapport 578.

PROGRAMME D'ÉTUDES 7A/7

CARACTÉRISTIQUES DES CODES HORAIRES

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire de prévoir des données codées DUT1 dans les émissions de certains signaux horaires pour que l'on puisse connaître immédiatement le UT1;
- b) qu'un certain nombre d'émetteurs de fréquences étalon et de signaux horaires émettent actuellement des codes horaires donnant la minute, l'heure et la date et qu'il est souhaitable que ces codes soient compatibles entre eux et avec les appareils que l'on trouve couramment dans le commerce;
- c) que l'on ne dispose pas aisément de détails sur les divers codes horaires qui ont été mis au point pour différentes applications et qu'une prolifération superflue de ces codes n'est pas souhaitable,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. les méthodes les plus appropriées de diffusion de DUT1;
2. les types et les formats d'information horaire codée les plus appropriés pour les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires;
3. l'établissement et la publication d'un index de codes horaires, avec indication détaillée des sources d'information, et des évaluations destinées à faciliter le choix des codes les plus appropriés pour différentes applications.

QUESTION 8/7

FIABILITÉ DES ÉTALONS DE TEMPS ET DE FRÉQUENCE

(1976)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que pour de nombreuses applications, la fiabilité des étalons de temps et de fréquence a une grande importance,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quels critères convient-il d'employer pour caractériser clairement la fiabilité des horloges et des étalons de fréquence;
2. quelle est la fiabilité de fonctionnement des étalons de temps et de fréquence existants;
3. quelles dispositions peut-on prendre pour accroître la fiabilité des étalons de temps et de fréquence?

Note. — Voir le Rapport 898 et la Décision 29.

QUESTION 9/7

RETARDS DE SIGNAUX INTRODUITS PAR LES ANTENNES ET AUTRES CIRCUITS
EN CE QUI CONCERNE LE TRANSFERT DE SIGNAUX HORAIRE DE HAUTE PRÉCISION

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire que la précision du transfert des signaux horaires soit supérieure à la précision réalisable actuellement;
- b) que, du point de vue des précisions souhaitées, les antennes et autres circuits électriques sont des éléments critiques du trajet du signal radioélectrique aux points d'émission, de réémission et de réception,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelles méthodes peut-on recommander pour mesurer et caractériser le retard introduit par les antennes et les circuits connexes utilisés pour le transfert des signaux horaires de précision sur le trajet du signal radioélectrique?

PROGRAMME D'ÉTUDES 9A/7

CARACTÉRISATION DES RETARDS DE SIGNAUX INTRODUITS PAR LES ANTENNES

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire de tenir compte du retard introduit par les antennes sur les trajets radioélectriques pour le transfert précis des signaux horaires;
- b) qu'il est souhaitable d'avoir des types d'antenne normalisés ayant des caractéristiques de retard connues;
- c) qu'il est souhaitable de conclure des accords internationaux relatifs aux techniques de mesure à utiliser,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. étude des paramètres d'antenne, afin de quantifier les caractéristiques qui influent sur le retard subi par les signaux horaires lors de leur transit, par exemple, la longueur d'onde, l'ouverture, la largeur de bande, l'impédance, la polarisation, la directivité, les effets diélectriques, les facteurs de réseau d'antennes, les effets des ondes progressives, les effets des lentilles, les effets des milieux anisotropes et non homogènes;
2. étude des circuits électriques connexes dans la mesure où ils influent sur le retard du signal;
3. étude du retard dans les doublets, les cornets ou les antennes filaires longues normalisés permettant de couvrir le spectre radioélectrique;
4. étude des effets ambiants qui pourraient avoir une influence sur le retard, par exemple, la température, la pression, l'humidité, le champ magnétique, l'accélération, le mouvement relatif et les effets relativistes;
5. étude des techniques de mesure permettant d'obtenir des précisions de l'ordre de la microseconde, de la nanoseconde et de la picoseconde.

QUESTION 10/7

QUALITÉ DES ÉTALONS DE FRÉQUENCE ET DE TEMPS

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (Genève, 1979) a réaffirmé que la coordination de l'établissement et du fonctionnement du service de fréquences étalon et de signaux horaires à l'échelle mondiale est nécessaire;
- b) que l'exactitude avec laquelle les fréquences étalon et les signaux horaires peuvent être transmis, dépend essentiellement de la qualité des étalons de fréquence et de temps;
- c) qu'il est nécessaire d'accroître l'exactitude des fréquences étalon et des signaux horaires pour améliorer la coordination de ces émissions sur le plan mondial;
- d) que, pour de nombreuses applications, la qualité des étalons de fréquence et de temps est d'importance majeure,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont les limitations à la qualité des étalons de fréquence et de temps;
2. quelles sont les caractéristiques qu'il convient d'utiliser pour définir la qualité des étalons de fréquence et de temps;
3. que peut-on faire pour améliorer la qualité des étalons de fréquence et de temps?

PROGRAMME D'ÉTUDES 10A/7

QUALITÉ ET CARACTÉRISATION DES ÉTALONS DE FRÉQUENCE ET DE TEMPS

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire d'améliorer la caractérisation des étalons de fréquence et de temps;
- b) qu'il est nécessaire d'accroître l'exactitude des étalons de fréquence et de temps,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. une étude visant à caractériser les étalons de fréquence et de temps;
 2. une étude des techniques de mesure et d'évaluation de la qualité des étalons de fréquence et de temps;
 3. une étude des techniques susceptibles d'améliorer la qualité des étalons de fréquence et de temps.
-

PROGRAMME D'ÉTUDES 10B/7*

ALGORITHMES D'ÉCHELLES DE TEMPS ET PROBLÈMES STATISTIQUES

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que des échelles de temps atomique sont souvent obtenues par formation de moyennes d'échelles de temps individuelles d'un grand nombre d'horloges ou de groupes d'horloges, qui sont éloignées les unes des autres;
- b) qu'il est important pour beaucoup d'usages qu'une échelle de temps soit aussi uniforme que possible;
- c) que, de plus, la subdivision des échelles de temps devrait être en accord avec la valeur reconnue de la seconde,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. procédés d'établissement de moyennes, y compris la détermination de poids statistiques qui sont attribués aux horloges ou groupes d'horloges contribuant à l'échelle du temps, que l'on peut recommander.

Il faudra considérer que l'exactitude et la stabilité des horloges en question peuvent être différentes, qu'il faut tenir compte d'horloges de type commercial ainsi que de modèles de laboratoire et que les lectures des horloges sont connues avec différentes précisions de la part de ceux qui s'occupent des problèmes de l'établissement de moyennes;

2. procédés que l'on peut recommander pour le cas où l'on change le nombre ou l'exactitude et la stabilité des horloges qui contribuent à une échelle de temps.

Note. — Voir le Rapport 579.

RÉSOLUTION 14-4

ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1963-1966-1970-1974-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

les dispositions de l'Article 33 du Règlement des radiocommunications,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

1. que, dès la mise en service d'une assignation de fréquence à une station de fréquences étalon, l'administration intéressée doit notifier cette assignation à l'IFRB, conformément aux dispositions de l'Article 12 du Règlement des radiocommunications; cependant, aucune notification ne doit être adressée à l'IFRB avant que les recherches expérimentales et la coordination n'aient été achevées en conformité avec les dispositions de l'Article 33 du Règlement des radiocommunications;
2. que chaque administration doit adresser, en outre, tous autres renseignements utiles sur les stations de fréquences étalon (tels que stabilité de fréquence, changement de phase des impulsions de signaux horaires, modification des horaires d'émission) au Rapporteur principal de la Commission d'études 7, au Directeur du CCIR et, en vue de la publication officielle de ces renseignements, au Directeur du BIH;
3. que la Commission d'études 7 doit collaborer avec l'Union astronomique internationale (UAI), l'Union radioscopique internationale (URSI), l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA), le Bureau international de l'heure (BIH) et le Comité international des poids et mesures (CIPM).

* Ancien Programme d'études 1D-1/7.

VŒU 26-2

ÉTUDES ET EXPÉRIENCES RELATIVES AUX ÉMISSIONS DE SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1966-1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires sont utilisées dans de nombreuses branches des sciences pures et appliquées;
- b) que la Commission d'études 7 a fréquemment besoin de consulter des unions et organisations scientifiques,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. que la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), le Bureau international de l'heure (BIH), l'Union radioscopique internationale (URSI), l'Union astronomique internationale (UAI), l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) et l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA) soient invités à collaborer avec la Commission d'études 7;
2. que le Rapporteur principal de la Commission d'études 7 se mette en relation avec le Directeur du BIH et avec les présidents des Commissions pertinentes de l'URSI, de l'UAI, de l'UGGI, de la CGPM et de l'UIPPA, et que le Directeur du CCIR soit tenu au courant.

VŒU 27

**ÉMISSIONS DE FRÉQUENCES ÉTALON ET DE SIGNAUX HORAIRES
DANS DE NOUVELLES BANDES DE FRÉQUENCES**

(Question 2/7)

(1966)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que les services d'émissions de fréquences étalon et de signaux horaires existant à l'heure actuelle ne permettent pas toujours, dans certaines régions et notamment dans les centres industriels, d'obtenir un rapport signal sur bruit suffisant;
- b) qu'un service de meilleure qualité est nécessaire dans certaines régions et que ce service peut être obtenu moyennant l'utilisation de fréquences de la bande 8 et de fréquences plus élevées,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

que chaque administration réserve, dans la mesure du possible, pour la distribution des fréquences étalon et des signaux horaires sur un plan local, deux bandes d'une largeur de 100 kHz prises respectivement dans les bandes 8 et 9, leurs fréquences centrales devant être des multiples entiers de 5 MHz.

VŒU 28

**PROGRAMMES SPÉCIAUX DE CONTRÔLE DES ÉMISSIONS DE L'IFRB
EN VUE DE DÉGAGER LES BANDES DE FRÉQUENCES ATTRIBUÉES
EXCLUSIVEMENT AU SERVICE DE FRÉQUENCES ÉTALON**

(1966)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) les résultats des programmes spéciaux de contrôle des émissions que l'IFRB a organisés en vue de dégager les bandes de fréquences attribuées en exclusivité au service des fréquences étalon;
- b) la nécessité de dégager lesdites bandes plus complètement;
- c) les difficultés qu'a éprouvées l'IFRB pour identifier certaines stations appartenant à des services autres que celui des fréquences étalon, mais émettant dans les bandes attribuées à celui-ci,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. que l'IFRB soit prié d'augmenter, dans toute la mesure du possible, le nombre de programmes de contrôle spéciaux à effectuer par année et s'étendant aux bandes attribuées en exclusivité au service des fréquences étalon;
2. que l'IFRB invite instamment les administrations des pays qui disposent d'installations de radiogoniométrie à prendre des relevés ayant pour objet de déterminer la position des stations dont les émissions ont été observées.

VŒU 70

LE SYSTÈME UTC ET LE RÔLE DU BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que le système de temps universel coordonné (UTC) est désormais la référence de temps mondialement admise pour la quasi-totalité des besoins scientifiques et techniques;
- b) que l'exploitation du système UTC nécessite l'appui du Bureau international de l'heure (BIH) qui fournit à l'UTC la base indispensable sous la forme du temps atomique international (TAI) ainsi que les relations au temps astronomique nécessaires;
- c) qu'une coopération active et fructueuse de longue date s'est instaurée entre la Commission d'études 7 du CCIR et le BIH; et
- d) que le BIH bénéficie du soutien d'un certain nombre d'organisations nationales et internationales,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. que le Directeur du CCIR devrait témoigner sa vive reconnaissance au Directeur du BIH pour l'aide qu'a apportée le BIH dans la promotion et l'amélioration du système UTC;
2. que toutes les administrations soient sensibilisées au fait que le BIH doit être épaulé dans ses activités en matière de formation et de maintenance du TAI et de l'UTC; et
3. qu'il conviendrait de faire parvenir une déclaration analogue au Conseil international des Unions scientifiques (CIUS) ainsi qu'aux instances les plus directement concernées, y compris la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), l'Union astronomique internationale (UAI), l'Union radioscopique internationale (URSI), l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) et l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA).

VŒU 71-1 *

DOCUMENTATION DES ÉMISSIONS DE SIGNAUX HORAIRES

(Question 1/7)

(1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que les émissions de signaux horaires ont été maintenues dans des limites de précision différentes, par l'introduction de sauts ou de changements de fréquence au cours des 25 dernières années;
- b) que chaque administration fournit les renseignements les plus récents qu'elle possède concernant les valeurs des ajustements des fréquences et des signaux horaires, conformément au numéro 2771 de l'Article 33 du Règlement des radiocommunications et à la Résolution 14 du CCIR;
- c) que, de 1955 à 1972, on a adopté dans les divers pays des valeurs différentes pour les sauts et les changements de fréquence et qu'il n'est pas facile d'accéder aux détails pertinents;
- d) que ces données seront nécessaires pour analyser les phénomènes à longue échéance,

* Le Directeur du CCIR est prié de transmettre ce Vœu aux autorités responsables des services de fréquences étalon et de signaux horaires énumérées dans le Rapport 267.

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

que toutes les administrations qui exploitent un service de fréquences étalon et de signaux horaires rassemblent les détails relatifs aux ajustements de fréquences et d'échelles de temps effectués pendant la période allant de 1955 à 1972 et, en particulier, qu'elles publient la valeur des sauts de temps, avec la date de leur entrée en vigueur ainsi que les changements de fréquence intervenus dans leurs émissions et qu'elles communiquent aussi ces données au Bureau international de l'heure ainsi qu'aux Centres Mondiaux d'Exploitation des données A, B et C.

ANNEXE I

ADRESSES DES CENTRES MONDIAUX D'EXPLOITATION DES DONNÉES

- World Data Centre A: WDC-A, Rotation of the Earth
c/o US Naval Observatory
34th Massachusetts Avenue NW
WASHINGTON, DC 20390
Etats-Unis d'Amérique
- World Data Centre B: State Time and Frequency Commission
Gosstandart
Leninsky Prospekt 9
MOSCOU 117049
URSS
- World Data Centre C: Rutherford Appleton Laboratory
Chilton
DIDCOT
Oxon OX11 OQX
Royaume-Uni

VŒU 72*

DIFFUSION DE SIGNAUX HORAIRES PAR DES SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES

(Question 2/7)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) que dans de nombreux domaines tels que la géodésie, la géophysique, la coordination internationale du temps et celle d'observations scientifiques de nombreuses autres sortes, on a de plus en plus besoin de signaux de référence de temps qui puissent être reçus très fidèlement dans le monde entier;
- b) que deux satellites météorologiques GOES des Etats-Unis d'Amérique diffusent avec succès depuis 1975 un code horaire exact, rapporté au temps universel coordonné (UTC), dont l'usage se répand régulièrement dans l'hémisphère occidental;
- c) que les satellites Météosat européens et les satellites GMS japonais font partie du même système mondial à satellites météorologiques que les satellites GOES des Etats-Unis d'Amérique et que les signaux véhiculant leurs données sont dans une forme numérique similaire, avec des bits appropriés réservés pour un éventuel codage horaire;
- d) qu'on pourrait utiliser les mêmes récepteurs peu coûteux, tout au plus moyennant des modifications minimales, pour recevoir les signaux des satellites GOES, Météosat et GMS;
- e) que des organismes de temps et de fréquence opérant en Europe et au Japon ont fait savoir qu'ils sont prêts à employer des codes horaires dans les satellites Météosat et GMS,

* Le Directeur du CCIR est prié de porter ce Vœu à l'attention de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), ainsi que de la Commission d'études 2 du CCIR.

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. que l'adjonction, aux signaux des satellites Météosat et GMS, d'un code horaire compatible avec ceux des satellites GOES soit considérée comme devant fournir un service mondial de diffusion de temps et de fréquence intéressant de nombreux domaines, sans nécessiter que des modifications importantes soient apportées à la forme numérique des données transmises par les satellites, aux engins spatiaux ou aux installations au sol;
2. que l'Organisation météorologique mondiale devrait être priée de diffuser le présent Vœu auprès de ses organismes nationaux des pays pertinents;
3. que l'Agence spatiale européenne devrait être priée de diffuser ce Vœu auprès de ceux des organismes pertinents opérant en Europe qui s'intéressent au programme MÉTÉOSAT.

DÉCISION 65

**MANUEL SUR L'UTILISATION DE LA DIFFUSION DES SIGNAUX HORAIRES
ET DES FRÉQUENCES ÉTALON PAR SATELLITE**

(1985)

La Commission d'études 7 du CCIR,

CONSIDÉRANT

- a) l'ampleur et la portée des études menées par le Groupe de travail intérimaire (GTI) 7/4 au cours de deux périodes d'études sur les possibilités techniques de diffusion et de transfert des signaux horaires par satellite;
- b) que l'utilité et le coût des méthodes de diffusion des signaux horaires par satellite sont à la portée de bon nombre de pays en développement souhaitant établir une référence nationale de temps et de fréquence;
- c) que les méthodes de diffusion par satellite risquent de plus en plus de compléter et de remplacer certains des services terrestres actuels de diffusion de fréquences étalon et de signaux horaires;
- d) que l'on a acquis au cours de nombreuses années une expérience pratique d'un service de signaux horaires et de fréquences étalon associé aux satellites météorologiques GOES;
- e) que l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires pour les systèmes de télécommunications régionales (par exemple, avec ARABSAT, BRAZILSAT, INSAT, PALAPA, etc.) offre la possibilité technique d'ajouter un canal de signaux horaires et de fréquences étalon à faible largeur de bande;
- f) que l'apparition de la radiodiffusion télévisuelle directe par satellite permettra d'accroître également les possibilités d'insérer une référence de temps dans un système déjà structuré dans le domaine temporel;
- g) que la Résolution 33 concernant la coopération technique encourage la publication de manuels spécialisés,

DÉCIDE

1. qu'il convient de constituer un Groupe de travail ad hoc qui sera chargé de préparer le texte d'un manuel sur les services à satellites de diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon;
2. que ce manuel soit d'abord basé sur les textes de la Commission d'études 7 et qu'il incorpore les informations pertinentes contenues dans les textes du GTI 7/4 et des Commissions d'études 2, 4, 8, 10 et 11, ainsi que dans les nombreuses publications relatives aux systèmes de navigation et de localisation par satellite;
3. que l'on encourage les administrations à contribuer à l'élaboration des textes du manuel dans les domaines où elles ont acquis des connaissances ou une expérience particulières;
4. qu'il convient de nommer un Coordonnateur afin de superviser le rassemblement et l'intégration des contributions;
5. que le Coordonnateur et ses collaborateurs se fixent comme but d'achever le texte du manuel avant la XVII^e Assemblée plénière.

ANNEXE I

A la fin de la XVI^e Assemblée plénière de 1986, les administrations et les organisations internationales suivantes ont indiqué leur participation aux travaux du Groupe de travail ad hoc:

Administrations:

Autriche
Canada
Etats-Unis d'Amérique
France
Inde
Japon
Royaume-Uni
Yougoslavie (République socialiste fédérative de)
BIPM (BIH)

Coordonnateur du Groupe de travail ad hoc:

M. J. McA. Steele
National Physical Laboratory
TEDDINGTON
Middlesex TW11 OLW
Royaume-Uni
Téléphone: + 44 1 977 3222
Télex: 262 344 NPL G

INDEX ALPHABÉTIQUE DES TERMES (MOTS CLÉS) DU VOLUME VII

A

Accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) (R.518)
 Alertes géophysiques (R.731)
 Antennes à effet directif (R.732)
 Antennes, retards introduits par les (R.1017)
 Association internationale des instituts de navigation (IAIN) (Rec.536)

B

Bande latérale unique (R.362, R.732)
 Bandes de fréquences attribuées et additionnelles (Rec.374, Rec.375)
 Brouillages extérieurs (Rec.375, Rec.376)
 Brouillages mutuels, réduction (Rec.537, R.732)
 Bruit, générateurs de fréquences (R.364, R.580)
 Bulletins météorologiques pour la navigation maritime (R.731)
 Bureau international de l'heure (BIH) (Rec.374, Rec.458, Rec.460, Rec.536, R.267, R.363, R.439, R.579)
 Bureau international des poids et mesures (BIPM) (Rec.430)

C

CCITT (Rec.486, R.898)
 Code horaire (défin.) (R.730)
 Codes horaires (Rec.583, R.578, R.731)
 Codes pour signaux horaires (R.578)
 Cohérence de fréquence (défin.) (R.730)
 Cohérence de phase (défin.) (R.730)
 Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) (R.439, R.897)
 Comité international d'enregistrement des fréquences (IFRB) (Rec.376)
 Comparaison de temps (défin.) (R.730)
 Comparaison de temps par satellite (R.578)
 Comparaison du temps, méthodes (R.363)
 Comparaisons de phases, B.Mam (R.363)
 Conférence générale des poids et mesures (CGPM) (Rec.374, Rec.460, Rec.485, Rec.535, Rec.536, R.439)
 Conseil international des unions scientifiques (CIUS) (Rec.374, Rec.460)

D

Date (défin.) (R.730)
 Date julienne (défin.) (R.730)
 Date julienne modifiée (DJM) (défin.) (R.730)
 Date julienne modifiée (DJM) (Rec.457)
 Décalage (défin.) (R.730)
 Décalage de fréquence (R.732)
 Décalage normé (défin.) (R.730)
 Défaut de fidélité (défin.) (R.730)
 Demi-vie (DV), fiabilité d'une horloge atomique (R.898)
 Déphasage (défin.) (R.730)

Déplacement de fréquence (défin.) (R.730)
 Dérive de fréquence (défin.) (R.730)
 Dérive de fréquence normée (défin.) (R.730)
 Diagrammes de rayonnement, contrôle (R.732)
 Différence de fréquence (défin.) (R.730)
 Différence de fréquence normée (défin.) (R.730)
 Différence entre échelles de temps (défin.) (R.730)
 Différence entre temps d'horloge (défin.) (R.730)
 Diffusion par satellite de l'information temps/fréquence (R.363, R.518, R.736)
 Diffusion, possibilités par satellites (Rec.582, R.518)
 Discrimination de fréquence (R.732)
 Dispersion, B.Mam et B.km (R.271)
 Durée moyenne de vie (DMV), fiabilité d'une horloge atomique (R.898)
 DUT1 (défin.) (R.730)
 DUT1 (Rec.460, R.267)

E

Ecart de fréquence (défin.) (R.730)
 Ecart de fréquence normé (défin.) (R.730)
 Echelle de temps (R.363)
 Echelle de temps, algorithmes (R.579)
 Echelle de temps atomique (défin.) (R.439, R.730)
 Echelle de temps atomique international (Rec.486)
 Echelle de temps, calcul (R.579)
 Echelle de temps coordonnée (défin.) (R.730)
 Echelles de temps, comparaison (Rec.458, R.363, R.897)
 Echelles de temps en synchronisme (défin.) (R.730)
 Echelles de temps, établissement de moyennes (R.579)
 Echelles de temps, référence au UTC et TAI (Rec.485)
 Effets relativistes dans un système de temps-coordonnée terrestre (R.439)
 Émetteurs de radiodiffusion sonore à modulation d'amplitude (R.577)
 Émission de fréquence étalon (défin.) (R.730)
 Émission de signaux horaires (défin.) (R.730)
 Émissions, comparaisons (R.363)
 Émissions, conditions d'exploitation (Rec.460)
 Émissions de haute précision (R.270)
 Émissions en bande 5 (R.735)
 Émissions et stations, caractéristiques (R.267)
 Erreur (défin.) (R.730)
 Erreur du réglage initial de fréquence (R.898)
 Erreurs d'intervalle de temps (TIE) (R.898)
 Etalon de temps (défin.) (R.730)
 Etalon primaire de fréquence (défin.) (R.730)
 Etalon primaire de temps (défin.) (R.730)
 Etalon secondaire de fréquence (défin.) (R.730)
 Etalon secondaire de temps (défin.) (R.730)
 Etalonnage (défin.) (R.730)
 Etalons de fréquence à hydrogène (R.364)
 Etalons de fréquence à jet de césium (R.364)
 Exactitude (défin.) (R.730)
 Exactitude des émissions (R.267, R.271)
 Exploitation en bande 5, conditions (R.271)

F

Fiabilité des étalons de fréquence et de temps (R.898)
Fiabilité et fonctionnement des horloges de référence (R.898)
Fréquence (défin.) (R.730)
Fréquence étalon (défin.) (R.730)
Fréquence normée (défin.) (R.730)
Fréquence porteuse (défin.) (R.730)
Fréquences étalon (R.364)

G

Générateurs de fréquences étalon, comportement (R.364)
Générateurs, instabilité (R.364, R.738)
Générateurs, régions sub-millimétrique, infrarouge et visible (R.738)
GPS (système mondial de positionnement) (R.518)
Groupe mixte consultatif de l'Institut de navigation (JAG/ION) (Rec.535)

H

Horloge (défin.) (R.730)
Horloge coordonnée (R.730)
Horloges au césium (R.898)
Horloges au rubidium (R.898)
Horloges, caractéristiques de fonctionnement (R.898)
Horloges, fiabilité (R.898)
Horloges portatives, comparaison d'échelles de temps (R.363)
Horloges, synchronisation (R.363, R.439)

I

Incertitude (défin.) (R.730)
Information temps/fréquence, diffusion et coordination (R.518)
Infrarouge, générateurs de fréquence étalon (R.738)
Instabilité de fréquence (défin.) (R.730)
Instabilité de fréquence (R.898)
Instant (défin.) (R.730)
Institut de navigation, groupe mixte consultatif (JAG/ION) (Rec.535)
Interférométrie à très longue base (VLBI) (R.518)
Intervalle de temps (défin.) (R.730)

L

Laser stabilisé sur le gaz carbonique (CO₂) (R.364)
Laser stabilisé sur le méthane (CH₄) (R.364)
Lasers (R.364)
Lasers, stabilité de fréquence (R.738)
LASSO (synchronisation par laser à partir de l'orbite des satellites géostationnaires) (R.518)
Lecture d'une échelle de temps (défin.) (R.730)
LORAN-C (R.267, R.271, R.363, R.518)

M

Maser à ammoniac (NH₃) (R.364)
Maser à hydrogène (R.364)
Maser au rubidium (R.364)
Mesures de temps télécommandées par ordinateur (R.363)
Modification des signaux horaires des Etats-Unis de 1956 à 1971 (R.899)
Modulation de phase (R.577)
Modulation de sous-porteuse, stations de radiodiffusion (Rec.375)
Modulation, fréquences étalon et signaux horaires (R.267)
MTBF (moyenne des temps de bon fonctionnement) (R.898)
MTTR (temps moyen de réparation) (R.898)
Multiplexage dans le temps (R.732)

N

NAVSTAR GPS, système global de détermination de la position (R.518)
Numéro de jour julien (défin.) (R.730)

O

OMEGA, systèmes de radionavigation (R.267, R.271)
Organisation internationale de normalisation (ISO) (Rec.536)
Organisation maritime internationale (OMI), anciennement Organisation intergouvernementale consultative de la navigation maritime (OMCI) (Rec.374, Rec.460, Rec.535, Rec.536)
Organisation météorologique mondiale (OMM) (Rec.535)
Oscillateurs à cavité supraconductrice (R.364)
Oscillateurs à quartz (R.364, R.898)

P

Partage des fréquences avec d'autres services (R.736)
Partage du temps (R.732)
Phase (défin.) (R.730)
Phase des signaux en B.Mam (R.271)
Pondération statistique des horloges (R.579)
Précision (défin.) (R.730)
Prévision de la marche des horloges (R.579)
Propagation, effets (R.270, R.271)
Propagation, prévisions (R.731)

R

Radiodiffusion, émissions de (R.576, R.577)
Repère de temps (défin.) (R.730)
Reproductibilité (défin.) (R.730)
Retards introduits par les antennes (R.1017)

S

Satellite ATS-3 (R.518)
 Satellite GMS (R.518)
 Satellite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) (R.518)
 Satellite METEOSAT (R.518)
 Satellite SIRIO-1 (R.518)
 Satellite Symphonie-I (R.518)
 Satellite TDRS (satellite de poursuite et de relais de données) (R.518)
 Satellites de télécommunications (R.518)
 Satellites de télévision (R.518)
 Satellites NTS (R.518)
 Saut de temps (défin.) (R.730)
 Sauts de temps et de fréquence, Etats-Unis, 1956 à 1971 (R.899)
 Scintillation, bruit de (R.364)
 Seconde intercalaire (défin.) (Rec.460)
 Service des fréquences étalon par satellite (défin.) (R.730)
 Service des signaux horaires par satellite (R.730)
 Signaux de télévision pour la diffusion du temps (R.363, R.1016)
 Signaux horaires de haute précision, économie du spectre (R.270)
 Signaux horaires provenant de satellites météorologiques (R.518)
 Sous-porteuse d'impulsions (R.732)
 Stabilité de fréquence (R.364, R.580)
 Stabilité de fréquence et de phase (Rec.538)
 Stabilité de fréquence et de phase, mesures (Rec.538)
 Stabilité et précision, émissions en B.Mam et B.km (R.271)
 Station de fréquence étalon et/ou de signaux horaires (défin.) (R.730)
 Stations, caractéristiques (R.267)
 Stockage d'ions, dispositifs à (R.364)
 Synchronisation par radio-interféromètre à très longue base (RILB) (R.363)
 Synchronisme (défin.) (R.730)
 Système de temps-coordonnée (R.439)

T

Techniques optiques, générateurs de fréquences étalon (R.738)
 Temps (défin.) (R.730)
 Temps atomique international (TAI) (défin.) (Rec.460)
 Temps atomique international (TAI) (Rec.458, Rec.486, Rec.536, R.579)
 Temps coordonné (défin.) (R.730)
 Temps coordonné, système terrestre (R.439)
 Temps propre (défin.) (R.730)
 Temps universel coordonné (UTC) (défin.) (Rec.460)
 Temps universel coordonné (UTC) (Rec.486, Rec.535)
 Test spécifique de qualification (R.898)
 Transfert de signaux horaires par câbles coaxiaux (R.897)
 Transfert de signaux horaires par fibres optiques (R.897)
 Transfert de signaux horaires par laser (R.897)
 Transfert et diffusion, méthodes (R.363)
 Transfert T/F au moyen de la navette spatiale (R.518)
 Transferts de précision de signaux horaires à courte distance (R.897)
 TRANSIT, système de radionavigation par satellite (R.518)

U

Union astronomique internationale (UAI) (Rec.374, Rec.460, Rec.535, Rec.536)
 Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) (Rec.460, Rec.536)
 Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA) (Rec.536)
 Union radio-scientifique internationale (URSI) (Rec.374, Rec.460, Rec.535, Rec.536)
 Unité d'une échelle de temps (défin.) (R.730)
 Usagers, classification (R.731)
 Usagers des émissions, enquête (R.731)
 UT0 (défin.) (Rec.460, R.730)
 UT1 (défin.) (Rec.460, R.730)
 UT2 (défin.) (Rec.460, R.730)
 UT (temps universel) (Rec.460, R.730)
 UTC (voir Temps universel coordonné)

V

Valeur nominale (défin.) (R.730)

