

# « France Inter » — l'émetteur français de fréquence étalon et de signaux de temps codé

B. DUBOUIS

Centre National d'Études des Télécommunications

## Résumé

De nombreux pays possèdent un émetteur de fréquence étalon et de signaux de temps pour permettre la diffusion de la métrologie Temps-Fréquence.

En France, c'est l'émetteur de TDF, diffusant en grandes ondes le programme radiophonique de France Inter qui est utilisé pour ce service.

Cet article expose les caractéristiques de la porteuse de France Inter, asservie en phase sur un rythme provenant d'un oscillateur atomique à césium, et modulée en phase pour transmettre un code horaire.

Nous donnerons également un bref aperçu des précisions que l'on peut attendre de la réception de cette fréquence et de sa modulation.

## Abstract

Many countries have an emitter able to disseminate time-frequency metrology through the diffusion of a reference frequency and clock signals.

In France, the TDF emitter, which diffuses in the long waves domain the radio program of France Inter, is used for this service.

This article introduces the characteristics of the France Inter carrier, which is phase-locked to the frequency delivered by an atomic cesium clock oscillator, and phase-modulated to transmit a time information.

A brief review of the expected accuracies obtainable with the reception of this modulated frequency is also discussed.

Le temps et les fréquences sont des grandeurs métrologiques de très grande importance, et la connaissance de leur exactitude avec la précision souhaitée est de la plus grande nécessité pour un grand nombre d'applications.

Nous ne citerons pour exemple que les besoins de synchronisation sur une fréquence exacte des pilotes de fréquence et des bases de temps nécessaires aux techniques de télécommunication, de radionavigation et de tous les nouveaux domaines techniques qui convertissent leurs données en signaux de fréquence qu'il est alors plus aisé d'exploiter par des techniques électroniques.

## 1. Rappel de quelques définitions

*Fréquence d'un signal* : la fréquence d'un signal périodique est définie comme étant le nombre de cycles (ou d'événements) compté par *unité de temps*.

Ce dernier terme est très important et pour toute mesure de fréquence il sera nécessaire de connaître cette unité de temps avec une exactitude supérieure (ou au moins égale) à la précision de la mesure que l'on voudra effectuer.

*Unité de temps* : la seconde, est définie comme étant la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transmission entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium.

Cette unité de temps, et l'unité de fréquence, le hertz, qui en découle sont obtenues avec une certaine exactitude par des appareils spécifiques, des oscillateurs atomiques à césium, matériels assez coûteux, de fiabilité moyenne — durée de vie moyenne de 6 ans, temps moyen entre panne de 3 ans — et dont l'utilisation optimale demande aussi une infrastructure matérielle non négligeable.

*Échelle de temps* : une échelle de temps est une suite d'intervalles de temps égaux, avec repères précis des

instants limites de ces intervalles de temps. Cette échelle de temps permet la datation de tout événement. Les calendriers sont des échelles de temps.

Le temps universel coordonné (UTC) est l'échelle de temps international, maintenue par le Bureau International de l'Heure (BIH), qui permet à toutes les nations d'avoir une base de temps commune.

Le raccordement de « son » échelle de temps local à l'échelle de temps de l'UTC demande aussi divers appareillages coûteux.

Une autre technique de connaissance précise de la fréquence étalon est de comparer sa propre fréquence provenant d'un oscillateur de moindre coût (quartz, oscillateur atomique à rubidium) à un signal de fréquence étalon émis par voie radioélectrique. L'asservissement de cet oscillateur sur cette émission est aussi possible.

De nombreux émetteurs de fréquences étalon et de signaux horaires existent de par le monde, voir volume VII. Fréquences étalon et signaux horaires des Avis et Rapports du CCIR publiés par l'UIT — Union Internationale des Télécommunications.

En France, il n'y a pas d'émetteur spécifique de ce genre de signaux, c'est par l'intermédiaire de l'onde porteuse de l'émission de radiodiffusion France-Inter grandes ondes 162 kHz, que l'on peut connaître la position de fréquence d'un oscillateur par rapport à la fréquence étalon international.

La position de fréquence de France Inter par rapport à cet étalon est publiée chaque mois dans les bulletins H du LPTF (Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences).

La liaison à l'échelle de temps peut également être connue, avec une certaine précision, par la démodulation des signaux de temps codé transportés par la modulation de phase qui est ajoutée à cette porteuse de France Inter.

Rappelons que la porteuse est aussi, bien évidemment, modulée en amplitude pour transmettre l'émission des programmes radiophoniques proprement dits de France Inter.

Après un rappel des caractéristiques de l'émission, nous exposerons de façon plus détaillée, la réalisation de la fréquence étalon puis celle des signaux de temps codé.

Nous terminerons par quelques réflexions sur la bonne utilisation de ces émissions.

## 2. Rappel des caractéristiques de l'émission « France Inter »

L'émetteur de France Inter grandes ondes est situé à Allouis dans le département du Cher par 47°10' de latitude nord et 02°12' de longitude est.

Sa fréquence d'émission est à 162 kHz — 1 850 m

depuis le 1<sup>er</sup> février 1986 (auparavant sa fréquence était à 163,84 kHz).

La puissance de l'émission, dans l'antenne, est nominalement de 2 MW dans la journée, elle est réduite à 1 MW chaque nuit (approximativement de 0 h à 6 h). Toutefois l'émission peut être effective, à n'importe quel moment, avec une puissance comprise entre 0,6 MW et 2,6 MW.

Le type d'antenne est équidirectif, avec toutefois une antenne réflective dans l'axe Nord Sud pour permettre une meilleure diffusion dans les zones dites difficiles du sud de la France. Cette antenne réflective peut ne pas être en service (reliée à la terre), mais aussi quelquefois servir d'antenne d'émission en cas de nécessité.

L'émission est continue 7 jours sur 7, avec toutefois un arrêt hebdomadaire, actuellement le mardi matin de 1 h à 5 h pour entretien de la station.

Il faut signaler que l'émission peut être interrompue à tout moment, cela en conséquence des dures conditions d'exploitation (grande puissance, problèmes d'énergie ou autres, orage), mais que le personnel d'exploitation extrêmement compétent et vigilant, rend ces interruptions les moins fréquentes et les plus brèves possibles.

## 3. Émission de fréquence étalon

Pour les besoins d'une émission de fréquence étalon de qualité, et vu les conditions de diffusion énoncées au paragraphe 2, il a été nécessaire de réaliser non seulement un asservissement de fréquence, mais également un asservissement de phase de l'onde émise par rapport à la phase d'un signal provenant directement d'un oscillateur atomique à césium.

En effet un simple « pilotage » par un oscillateur à césium, de la synthèse du signal fourni aux étages d'amplification et de modulation d'amplitude, s'il satisfait à l'asservissement de fréquence à long terme, ne suffisait pas à l'émission d'une « bonne » fréquence étalon.

Les multiples « avatars » de l'émission (changement de puissance, coupure hebdomadaire ou accidentelle, mise en température des équipements d'émission) provoquent en effet, des sauts et des glissements de phase qui ont pour conséquence de diminuer la précision de la phase reçue.

Un asservissement de phase de l'onde émise a donc été réalisé selon le principe suivant :

### *Principe de l'asservissement de phase*

Le signal utile au premier étage de l'émetteur est à la fréquence moitié du signal d'émission donc ici à 81 kHz.

Ce signal est synthétisé à partir d'une fréquence étalon à 5 MHz d'un oscillateur à césium. Le synthétiseur réalise une synthèse de fréquence à phase variable, c'est-à-dire que l'on dispose d'un signal à 81 kHz avec 2 000 positions de phase possibles, soit une résolution de 6 ns.

La fréquence de ce signal est doublée pour être émise à 162 kHz. La résolution en phase en est alors de 1/1 000 de période soit 6 ns.

Un signal à 162 kHz qui va faire office de référence de phase est également obtenu par synthèse de fréquence à phase variable à partir du césium.

Un récepteur de la porteuse de France Inter, situé près du bâti, capte l'onde émise par l'antenne, onde perturbée par les phénomènes cités plus haut.

Un phasemètre compare l'onde reçue, à la référence, et permet l'asservissement de l'onde émise sur celle-ci, par action sur la synthèse du signal fourni à 81 kHz.

La résolution de ce phasemètre est de 12 ns — 2/1 000 de période de 162 kHz.

La comparaison de phase n'est pas permanente, elle est renouvelée chaque seconde, pendant les 100 ms qui précèdent la modulation de phase du codage horaire (voir 4).

La correction de phase se fait, si nécessité, à un rythme lent, au maximum 43/1 000 de période par seconde, et à des instants précis qui ne perturbent en rien la modulation de phase du code horaire. Un déphasage maximum de  $\pi$  sera donc corrigé en 12 s.

Pour assurer la pérennité, deux bâtis de fréquence pilote avec oscillateur à césium autonome sont en fonctionnement simultanément. Ce nombre ne permet pas de déterminer lequel des deux bâtis peut avoir un fonctionnement défectueux, seul le manque de signal de sortie d'un bâti peut être détecté, et cela permet seulement de pallier les pannes dues au césium, dont la MTBF est de l'ordre de 3 ans.

La commutation d'un bâti à l'autre se fait manuellement, et peut être décidée à tout moment.

Si la fréquence émise devenait défectueuse, les récepteurs de celle-ci disposés dans notre laboratoire, qui comparent la fréquence reçue à une fréquence de référence provenant de césium participant à la chaîne française de définition du Temps, ne manqueraient pas de nous le signaler, et nous pouvons demander alors la permutation du pilote d'émission, à tout instant.

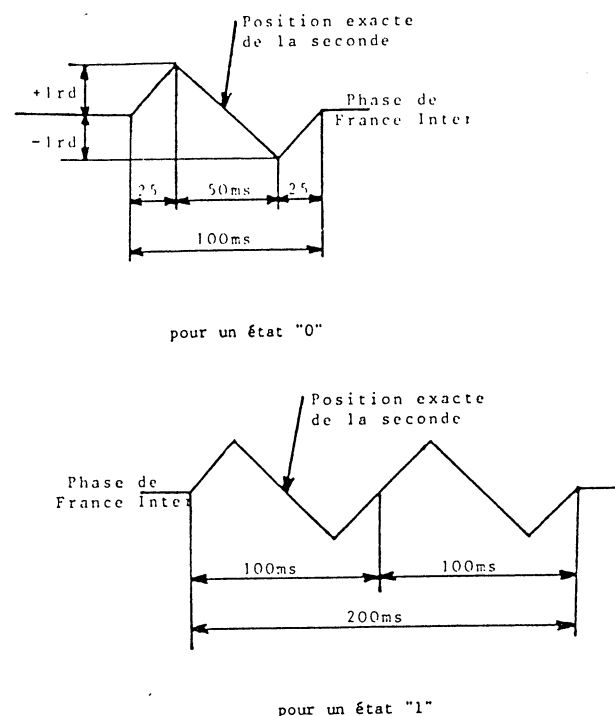
Pour garder la continuité de phase, à la permutation des pilotes, le bâti dit en secours est asservi en phase sur celui dit en service. Ainsi à la commutation, il n'y aura aucun saut de phase, seul un changement de fréquence pourra ensuite intervenir. Rappelons que les « césium » commerciaux utilisés ont des fréquences garanties à  $\pm 2.10^{-12}$  près.

Le synoptique de l'ensemble des deux bâtis pilotes de fréquence est donné figure 1.

Avec un tel ensemble, les principales perturbations qui affectaient la phase de la fréquence porteuse ont été annulées. Seuls subsistent les sauts de phase liés à une nouvelle configuration d'antenne qui ne peuvent être corrigés, mais qui ne se produisent heureusement que très rarement. De plus ces sauts de phase ont des valeurs spécifiques aux configurations d'antenne et peuvent être pris en compte dans des récepteurs de bonne qualité.

#### 4. Émission de signaux de temps codé

Pour permettre le transport d'un code horaire et de datation, une modulation de phase a été ajoutée à la porteuse de France Inter. Les caractéristiques de cette modulation sont résumées sur la figure suivante.



##### 4.1. Code utilisé

Le message est transmis à raison d'une donnée par seconde sur les 60 secondes de la minute (59 bits d'état 0 ou 1, plus 1 absence de bit). Les données sont en décimal codé binaire, chacune limitée au nombre de bits strictement nécessaire au codage du maximum possible pour la grandeur considérée.

Les données principales s'échelonnent entre les secondes 21 et 59 selon le détail suivant.

Seconde	Donnée	Poids
21	Unités des minutes	1
22	—	2
23	—	4
24	—	8

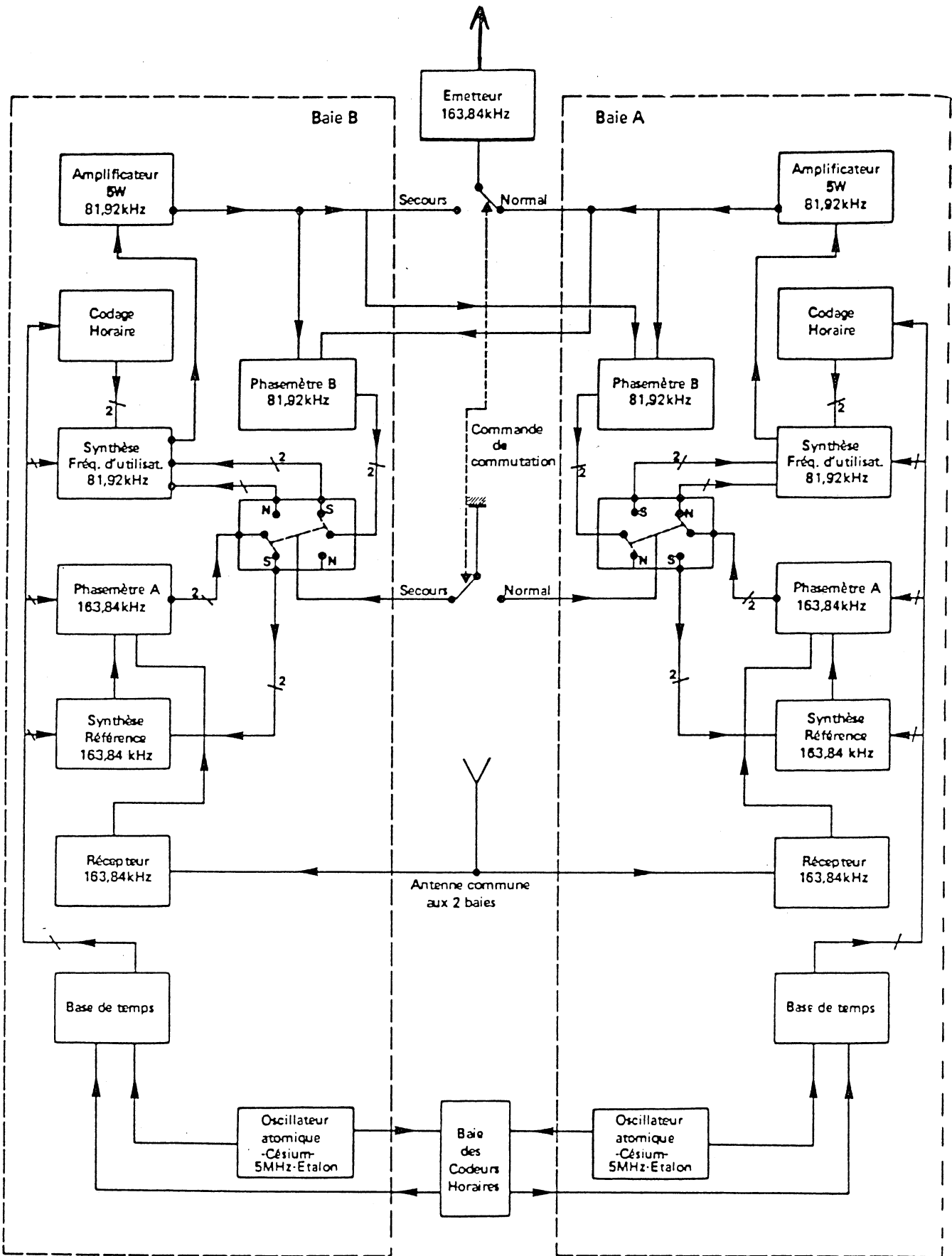


FIG. 1. — Synoptique de l'ensemble.

25	Dizaines des minutes	1
26	—	2
27	—	4
28	Parité P1 pour la parité des bits 21 à 28	
29	Unités des heures	1
30	—	2
31	—	4
32	—	8
33	Dizaines des heures	1
34	—	2
35	Parité P2 pour la parité des bits 29 à 35	
36	Unités des quantième	1
37	—	2
38	—	4
39	—	8
40	Dizaines des quantième	1
41	—	2
42	Numéro du jour de la semaine	1
43	— lundi 1, mardi 2...	2
44	—... dimanche 7)	4
45	Unités des mois	1
46	—	2
47	—	4
48	—	8
49	Dizaines des mois	1
50	Unités des années	1
51	—	2
52	—	4
53	—	8
54	Dizaines des années	1
55	—	2
56	—	4
57	—	8
58	Parité P3 pour la parité des bits 36 à 58	
59	Absence de signal-repère de fin de minute	

— Les bits 14 à 20 donnent les renseignements suivants :

- sur 14, un bit d'état "1" indique que le jour en cours est un jour férié ;
- sur 15, bit de service ;
- sur 16, un bit d'état "1" indique qu'au passage de l'heure suivante il y aura un changement d'heure saisonnier ;
- sur 17, bit de donnée de l'avance de l'heure légale diffusée par rapport à l'heure universelle, avec le poids 2 (heure d'été française) ;
- sur 18, bit de donnée de l'avance de l'heure légale diffusée par rapport à l'heure universelle, avec le poids 1 (heure d'hiver française) ;
- sur 19, bit non utilisé, un état "0" est diffusé en permanence ;
- sur 20, bit non utilisé, un état "1" est diffusé en permanence.

— Les secondes 0 à 13 ne sont pas utilisées actuellement, elles ont toutes un état "0", mais il faut savoir que dans l'avenir, suivant les besoins,

elles pourraient servir à diffuser des informations non encore spécifiées.

Le codage des informations horaires occupe 300 ms chaque seconde,



A 100 ms sans modulation avant le début du codage

B 100 ms codage de la position de la seconde

C 100 ms codage de la date et de l'heure

+ les 100 dernières millisecondes de la seconde 58 et toute la seconde 59 où il n'y a pas de modulation.

En dehors de ces instants, soit 700 ms chaque seconde excepté pour la seconde 59, d'autres modulations de phase porteuses d'autres messages pourront être expérimentées.

## 4.2. Particularités de fonctionnement

### 4.2.1. Position de la seconde

La position exacte de la seconde à 10 microsecondes près de la seconde du temps universel coordonné UTC, est synchrone du premier passage à "0" de la phase en cours de modulation (voir figure). Cette position placée à 50 ms du début de la modulation permet de réaliser facilement dans les récepteurs un top de seconde qui soit synchrone de la seconde exacte (après étalonnage ou calcul du temps de retard apporté par la propagation (1 ms par 300 km) et surtout celui plus important dû au récepteur (circuit de filtrage).

4.2.2. Le message reçu contient l'information qui sera exacte à la seconde zéro suivante (l'horloge de l'émetteur ayant une minute d'avance sur l'heure réelle).

4.2.3. Particularités de fonctionnement au changement d'heure saisonnier.

#### • Passage de l'heure d'hiver à l'heure d'été

A la date décidée (par un décret publié au Journal Officiel), généralement un dimanche, jusqu'à 0 h 59 min l'état des bits 16, 17, 18 est le suivant :

16 — "0"

17 — "0"

18 — "1"

de 1 h 00 min à 1 h 59 min il sera tel que :

16 — "1"

17 — "0"

18 — "1"

à la minute suivante, l'heure envoyée est 3 h 00 avec :

16 — "0"

17 — "1"

18 — "0"

L'état des bits 16, 17, 18 restant ainsi jusqu'au prochain passage à l'heure d'hiver.

• *Passage de l'heure d'été à l'heure d'hiver*

Toujours à la date légale décidée, jusqu'à 1 h 59 min l'état des bits 16, 17, 18 est inchangé, c'est-à-dire :

- 16 — "0"
- 17 — "1"
- 18 — "0"

de 2 h 00 min à 2 h 59 min il sera tel que :

- 16 — "1"
- 17 — "1"
- 18 — "0"

à la minute suivante l'heure envoyée est 2 h 00 min avec :

- 16 — "0"
- 17 — "0"
- 18 — "1"

L'état de ces bits restant inchangé jusqu'au prochain passage à l'heure d'été.

4.2.4. Particularités de fonctionnement au réajustement du temps universel coordonné (UTC) par rapport au temps universel

Le temps diffusé n'est pas le temps universel coordonné (UTC) mais le temps légal en France, c'est-à-dire avec une heure d'avance sur l'UTC l'hiver, et deux d'avance l'été.

L'UTC peut être facilement connu en permanence en tenant compte des bits 17 et 18.

*Rappel de définition*

- Le temps légal diffusé a la même marche que le temps universel coordonné, mais il en diffère d'un nombre entier d'heures, nombre pouvant être variable suivant les saisons ;
- le temps universel coordonné est l'échelle de temps maintenue par le Bureau International de l'Heure (BIH), il a la même marche que le temps atomique international (TAI), mais il en diffère d'un nombre entier de secondes pour être le plus proche possible (à 0,9 seconde près au maximum) du temps universel ;
- le temps universel est l'échelle de temps fondée sur la rotation de la terre ;
- le temps atomique international qui sert de référence internationale pour la base de la seconde est établi par le BIH à partir des données d'horloges atomiques réparties dans le monde.

C'est donc ce temps atomique corrigé d'un nombre entier de secondes, pour pallier les effets non uniformes de la rotation terrestre, et pour qu'il soit le plus proche possible (à 0,9 seconde près au maximum) du temps universel, qui est le temps universel coordonné.

Des corrections de seconde sont donc effectuées quand cela s'avère nécessaire, corrections régies par des règles bien définies. Ces corrections doivent avoir

lieu à la dernière seconde d'un mois, de préférence en premier lieu à la fin de décembre ou de juin et en second lieu à la fin de mars ou de septembre, et ceci sur l'échelle de temps universel coordonné.

Sur l'échelle de temps légal français qui est diffusée par France Inter, ceci doit donc avoir lieu de préférence en premier lieu le 1<sup>er</sup> janvier ou le 1<sup>er</sup> juillet et en second lieu le 1<sup>er</sup> avril ou 1<sup>er</sup> octobre à la dernière seconde de la première heure si l'on est en régime d'heure d'hiver ou à la dernière seconde de la deuxième heure, si l'on est en régime d'heure d'été.

Ces corrections peuvent être positives ou négatives suivant les fluctuations de la rotation terrestre. (Il est à noter que depuis l'origine de ces définitions — janvier 1972 — seules des corrections par seconde additionnelle ont été réalisées, mais l'éventualité de retrait de seconde reste possible).

Ces secondes intercalaires sont bien évidemment prises en compte dans l'émission du temps codé de France Inter et cela se fait à la date décidée (donc soit le 1<sup>er</sup> janvier, ou le 1<sup>er</sup> juillet, ou le 1<sup>er</sup> avril, ou le 1<sup>er</sup> octobre) de la manière suivante :

• *Pour adjonction d'une seconde*

0 h 58 min (heure d'hiver) ou 1 h 58 min (heure d'été) est envoyé normalement ; donc, si la réception est bonne, les récepteurs afficheront 0 h 58 min ou 1 h 58 min. Pendant la minute suivante, une seconde est ajoutée, avec un état "0", au début du code, avant la seconde 14 ; cela entraîne un décalage de tout le code et doit provoquer inmanquablement des perturbations qui doivent être détectées par les récepteurs (citons par exemple "0" sur la seconde 20, non parité P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, etc.) ce qui doit entraîner pour les récepteurs un passage sur leur horloge interne qui affichera 0 h 59 min ou 1 h 59 min à l'instant normal, et une recherche de la seconde zéro suivante envoyée par F.I.

Pour la minute suivante l'émission est de nouveau correcte (59 bits). Le récepteur doit avoir repris le message complet, et si la réception est bonne, devra afficher le nouveau message de F.I., ce qui se traduira à l'affichage par :

en heure d'hiver		en heure d'été
0 h 59 min 58 s	heure interne du récepteur	1 h 59 min 58 s
0 h 59 min 59 s		1 h 59 min 59 s
*1 h 00 min 00 s	heure diffusée F.I.	2 h 00 min 00 s
1 h 00 min 00 s		2 h 00 min 00 s
1 h 00 min 01 s		2 h 00 min 01 s

\* C'est la seconde supplémentaire qui se trouve à la place prévue, sa définition exacte étant 0 h 59 min 60 s ou 1 h 59 min 60 s.

• *Pour le retrait d'une seconde*

0 h 58 min (heure d'hiver) ou 1 h 58 min (heure d'été) est envoyé normalement ; pendant la minute

suivante une seconde est retirée au début du code, ce qui doit, comme dans le cas précédent, entraîner un passage sur l'horloge interne et une recherche d'un nouveau début de codage.

0 h 59 min ou 1 h 59 min est donc affiché normalement, le nouveau message de F.I. étant correct (59 bits), le récepteur (si bonne réception) devra afficher le nouveau message, ce qui se traduira à l'affichage par :

en heure d'hiver		en heure d'été
0 h 59 min 57 s	heure interne	1 h 59 min 57 s
0 h 59 min 58 s	du récepteur	1 h 59 min 58 s
1 h 00 min 00 s	heure diffusée F.I.	2 h 00 min 00 s

### 4.3. Constitution du bâti de codage horaire

La fiabilité du codage horaire est assurée par un ensemble d'« horloges » composé de 4 horloges indépendantes pilotées par les 2 « Césium » déjà pilotes de la fréquence.

Le comportement defectueux d'un des « Césium » est signalé quand un écart de plus de 10 microsecondes, entre les tops horaires de deux horloges, est détecté. Mais son identité ne peut être connue. Pour

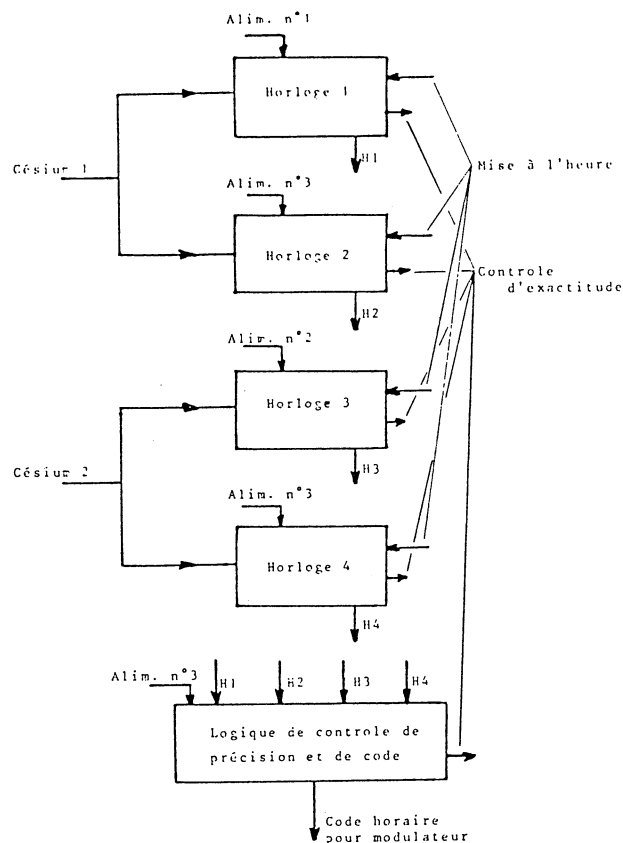


FIG. 2. — Structure de la baie de codage horaire.

cela un troisième oscillateur pilote serait nécessaire. Nous utilisons, comme pour la fréquence, une comparaison à la réception du signal par rapport à un top horaire provenant d'un « Césium » dont on connaît la position sur l'échelle de temps français. Comparaison qui permet de s'assurer de la bonne diffusion de la position de la seconde.

Le codage de l'heure délivré par les 4 horloges est comparé par une logique de comparaison et de décision qui gère le code distribué et alarme en cas d'une quelconque défaillance.

L'alimentation énergétique du bâti de codage horaire et des deux bâtis de fréquence pilote est assurée par 3 tiroirs d'alimentations indépendants qui sont constitués chacun par une alimentation stabilisée à partir du secteur 220 V et d'un ensemble batterie d'accumulateurs Cadmium-Nickel, chargeur de batterie, qui permet une autonomie de fonctionnement de l'ordre de 2 heures. Rappelons que le secteur 220 V de la station est lui même secouru par de puissants groupes électrogènes et les ensembles de batteries ne fonctionnent pratiquement que pendant les instants de démarrage de ceux-ci.

La structure de la baie de codage horaire est présentée figure 2.

### 5. Utilisation de ces émissions

Ces émissions ne sont utiles bien évidemment que si elles sont REÇUES et pour cela nous sommes dépendants des phénomènes liés à la propagation des ondes radioélectriques qui est malgré tout assez bien connue, mais qui quelquefois peut devenir « capricieuse » et imprévue.

L'émetteur de France Inter, de par sa puissance couvre pratiquement toute la France et même parfois nettement au-delà (Irlande, Belgique, Algérie...). Certaines zones de réception restent toutefois difficiles, cependant, à ce jour et à notre connaissance aucun point de la métropole et de la Corse ne reçoit « jamais » France Inter.

En certains endroits éloignés de l'émetteur — Côte d'Azur par exemple — France Inter ne pourra apporter par sa fréquence qu'un moyen de contrôle pendant certaines heures de la journée et alors le seul asservissement possible sera un recalage manuel de « son » oscillateur local. De même pour la réception des signaux de temps codé, il sera nécessaire de prévoir un fonctionnement autonome de l'horloge réceptrice, après que celle-ci eût reçu pendant au moins une minute un code correct, ce qui actuellement est toujours réalisable au moins durant certaines périodes.

La réception peut se faire à l'aide d'une antenne ou d'un cadre-ferrite accordé que l'on prendra soin de bien orienter.

La pérennité de l'émission est, nous l'avons vu,

assurée par la redondance des générateurs de fréquence étalon et des horloges. Mais il faut quand même garder à l'esprit que l'émetteur d'Allouis est unique et que si l'on doit bâtir des systèmes dont le temps et la fréquence sont du plus haut intérêt, il faudra peut être prévoir une « seconde source » — réception d'une autre émission ou système complémentaire.

Un autre exposé (Réception de la fréquence porteuse de France Inter - Asservissement en fréquence et en phase d'oscillateurs) donne plus de détails sur la précision que l'on peut obtenir à la réception de France Inter et également sur les possibilités d'asservissement. En résumé une précision voisine de  $10^{-7}$ /seconde peut être obtenue pour un contrôle de fréquence, soit  $10^{-10}$  en 20 minutes (1 000 s) et  $10^{-12}$  en une journée. La résolution de la réception de la phase peut être estimée à 60 nanosecondes près, ce qui autorise pour des récepteurs adéquats, une assez bonne qualité de synchronisme mutuel.

La précision de la réception du temps codé n'est pas du même ordre de grandeur, et elle dépend aussi des techniques de réception. Les différents constructeurs préciseront cette caractéristique de leur production.

Toutefois, nous pouvons indiquer qu'une statistique sur la réception des tops de seconde de France Inter par des récepteurs de notre réalisation (non industrialisés) par rapport à une horloge située en notre laboratoire de Bagneux donne un écart type voisin de 1 ms.

Des améliorations sur les récepteurs peuvent être et sont étudiées pour minimiser ces effets (des écarts types inférieurs à la milliseconde ont déjà été obtenus). La prise en compte d'un certain nombre de tops de France Inter, et la réalisation d'un signal moyenné a déjà donné des résultats meilleurs que 100  $\mu$ s. D'autres dispositifs dans l'avenir permettront sans doute encore mieux, mais la confiance dans une telle précision en permanence restera, nous pensons, très moyenne et devra être utilisée avec précautions.

Pour avoir l'exactitude des tops horaires redonnés par les récepteurs, c'est-à-dire, l'écart de temps avec l'échelle de temps étalon (temps absolu), il est nécessaire que ces récepteurs aient été étalonnés. Nous avons déjà vu que l'obtention d'un top exact à la précision de réception près, peut être réalisé grâce à la position du top de seconde à l'émission qui est à 50 ms après le début de modulation. Le temps de retard dans les récepteurs est classiquement inférieur à 20 ms, il est donc encore possible d'effectuer cet étalonnage, pour permettre de délivrer à l'utilisation un top exact. Il faut noter que l'étalonnage de l'exactitude du récepteur dépend de l'endroit de son utilisation, un écart de 300 km, par rapport à l'émetteur d'Allouis, entre deux récepteurs de réalisation identique, provoque un écart d'exactitude de ceux-ci de 1 ms.

La confiance dans le code reçu peut, elle, être assurée par tout un ensemble de détection d'erreurs. Nous citerons pour exemple les multiples conditions

liées aux caractères particuliers des données horaires émises, à savoir :

1. avec les bits 17 et 18 on doit avoir en permanence  $17 + 18 = "1"$
2. bit 19 toujours à "0"
3. bit 20 toujours à "1"
4. les unités des minutes doivent être inférieures à 10  
 $21 + 22 + 23 + 24 < 10$
5. les dizaines des minutes doivent être inférieures à 6  
 $25 + 26 + 27 < 6$
6. la parité P1 doit être vérifiée  
"21" + "22" + "23" + "24" + "25" + "26" + "27"  
+ "28" = pair
7. les unités des heures doivent être inférieures à 10  
 $29 + 30 + 31 + 32 < 10$
8. les dizaines d'heures doivent être inférieures à 3  
 $33 + 34 < 3$
9. les heures doivent être inférieures à 24  
 $(29 + 30 + 31 + 32) + (33 + 34) < 24$
10. la parité P2 doit être vérifiée  
"29" + "30" + "31" + "32" + "33" + "34"  
+ "35" = pair
11. les unités des quantième doivent être inférieures à 10  
 $36 + 37 + 38 + 39 < 10$
12. le quantième doit être supérieur à 0 et inférieur à 32  
 $0 < (36 + 37 + 38 + 39) + (40 + 41) < 32$
13. le jour de la semaine est supérieur à 0  
 $42 + 43 + 44 > 0$
14. les unités du mois sont inférieures à 10  
 $45 + 46 + 47 + 48 < 10$
15. le mois est supérieur à 0 et inférieur à 13  
 $0 < (45 + 46 + 47 + 48) + 49 < 13$
16. si le mois = 4, 6, 9, 11 le quantième est inférieur à 31
17. les unités des années doivent être inférieures à 10  
 $50 + 51 + 52 + 53 < 10$
18. les dizaines des années doivent être inférieures à 10  
 $54 + 55 + 56 + 57 < 10$
19. si l'année est divisible par 4 et si le mois = 2, le quantième doit être inférieur à 30



20. si l'année n'est pas divisible par 4 et si le mois = 2, le quantième doit être inférieur à 29

21. la parité P3 doit être vérifiée

$$\begin{aligned} & \text{"36" + "37" + "38" + "39" + "40" + "41" + "42" + "43"} \\ & \text{"44" + "45" + "46" + "47" + "48" + "49" + "50"} \\ & \text{"51" + "52" + "53" + "54" + "55" + "56" + "57"} \\ & \quad \quad \quad \text{"58"} = \text{pair} \end{aligned}$$

22. l'absence de signal à la seconde 59 doit être repérée (ceci correspond au calcul du nombre

de secondes dans la minute).

A ces conditions, on peut ajouter si nécessaire d'autres levées de doute, basées sur la forme de modulation (principe de corrélation), ou sur la prise de plusieurs séries de données et vérification du « bon déroulement de l'heure ». Dans ce dernier cas, les particularités de fonctionnement (changement d'heure saisonnier, seconde additionnelle) doivent être prévues par les récepteurs pour s'effectuer à l'instant normal.