

2. LES MOYENS DE SYNCHRONISATION ET D'ASSERVISSEMENT

Caractéristiques essentielles des récepteurs utilisant le vecteur radioélectrique France Inter

C. BORDAIS

BHL Électronique

1. Sélectivité

Allure spectrale du signal (Modulation d'Amplitude et de Phases conjuguées), voir figure 1.

Le récepteur doit :

- rejeter les bandes latérales de modulation d'amplitude qui s'écartent de la porteuse ± 100 à $4\,000$ Hz ;
- conserver les raies dues à la modulation de phases situées autour de la porteuse ± 30 Hz, l'indice de modulation étant :

$$i = \frac{2\Delta\phi}{\pi} \text{ où } \Delta\phi = \text{écart de phase}$$

= 1 radian pour France Inter.

Cet indice étant connu et la forme de l'onde de modulation faisant apparaître un *premier zéro du spectre* situé à 10 Hz. La décomposition spectrale de l'ensemble modulé en phase apparaît selon les fonctions de Bessel telle que figure 2, d'où la nécessité de disposer d'un filtre ayant un facteur de forme tel que les raies situées à ± 100 Hz de la fréquence centrale soient rejetées d'au moins 43 dB alors que leur niveau peut atteindre -6 dB dans le cas d'une modulation d'amplitude à 100% .

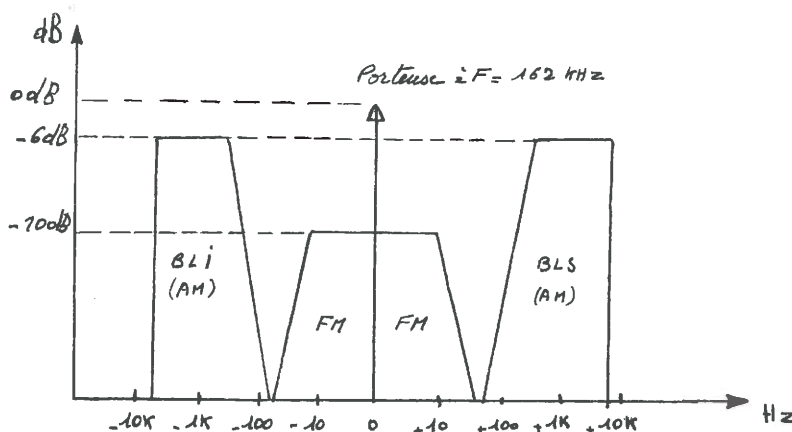


FIG. 1.

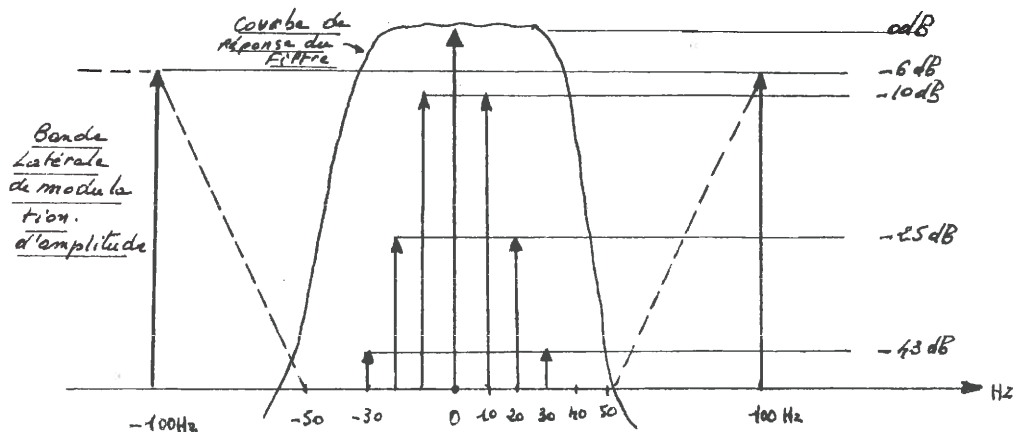


FIG. 2.

En aucun cas, le taux de modulation ne doit dépasser 100 %, ce qui se traduirait par une inversion de la phase de la porteuse, phénomène qui serait particulièrement préjudiciable au code horaire, et contre lequel le récepteur ne saurait apporter aucun remède (Cf. spécifications propres à l'émetteur).

2. Qualité spectrale de l'oscillateur local

La nature de la modulation et la valeur faible de l'indice de modulation,

$$i = \frac{2}{\pi} = 0,63$$

nécessitent de disposer pour le changement de fréquence (Technique du superhétérodyne) d'un oscillateur de haute pureté spectrale, notamment exempt de bruit de phase qui altérerait le signal démodulé au point de le dénaturer. Le problème peut être résolu par l'emploi d'oscillateurs à quartz associés à une boucle de verrouillage de phase dont la référence est l'onde porteuse elle-même, qui, du fait de son origine (jet de césium), garantit la qualité souhaitée.

Des observations ont été faites selon lesquelles, dans certaines conditions, qui semblent liées au comportement même de la propagation des ondes, que des bruits relativement importants (jitter de phase) viennent quelquefois et durablement perturber le message horaire.

3. Sensibilité des récepteurs et immunité aux interférences

Les bruits d'origine industrielle, atmosphérique et galactique (notamment le soleil) relativement importants dans cette gamme de fréquences, ramènent la notion de facteur de bruit des étages préamplificateurs à un niveau de moindre importance que celle qu'on accorde généralement aux récepteurs ondes courtes.

Les performances en matière de sensibilité seront davantage le fait des structures, des capteurs d'ondes associés au récepteur.

4. Antennes appropriées

Il est bon de rappeler que l'énergie que l'on peut soustraire à un champ radioélectrique par l'intermédiaire d'un cadre ou d'une antenne dépend :

- de ses dimensions (directement proportionnelle) ;
- de la façon dont le transfert va s'effectuer vers l'impédance d'entrée du récepteur.

Compte tenu des longueurs d'ondes employées, il est impensable d'utiliser des antennes accordées en $\lambda/4$ et moins encore en $\lambda/2$. Par ailleurs, le gain d'une telle antenne, par rapport à une référence isotropique, ne serait guère plus important que celui d'un étage préamplificateur de modeste qualité, sachant que la limite est de toute façon due aux bruits divers coexistants dans cette bande.

Les meilleures antennes que l'on puisse utiliser dans la circonstance sont les cadres accordés, en ferrite.

Avantages :

- faible coût ;
- faibles dimensions ;
- insensibilité aux parasites électrostatiques (champs électriques) ;
- hauteur effective importante, sans rapport direct avec la hauteur réelle (élévation au-dessus du sol) ;
- directivité peu prononcée ;
- antidirectivité importante (possibilité d'éliminer la source ponctuelle industrielle gênante) ;
- sélectivité intrinsèque intéressante conférant au récepteur associé une meilleure résistance aux signaux forts provenant d'autres émetteurs puissants de la bande (résistance aux interférences).

Nota : d'autres systèmes tels que :

- cadres semi-accordés,
- antennes omnidirectionnelles,
- cadres blindés

peuvent être envisagés et ont d'ailleurs été expérimentés dans des circonstances particulières d'exploitation (champs radar particulièrement importants, par exemple).

5. Linéarité du démodulateur

L'avantage de la modulation de phase réside principalement dans le fait que les signaux utiles auront une forme et une amplitude invariables dès lors que l'on se situe au-dessus du coude à 3 dB qui est une caractéristique essentielle de tout discriminateur de fréquence ou de phase.

Rappelons la forme d'onde du signal transmis (fig. 3a) et comparons avec celle du signal démodulé (fig. 3b) :

Il apparaît, du fait des circuits électroniques associés au traitement des signaux captés par l'antenne :

- une distorsion généralement due à :
 - une bande passante des circuits à fréquence intermédiaire trop étroite ;
 - une fréquence de coupure du filtre de boucle trop basse ;
 - les 2 à la fois ;
- un retard T (figure 3b) = à la somme des temps de propagation de l'ordre de 30 ms ;
- du bruit dont le niveau dépend :
 - du champ radioélectrique où l'on travaille ;
 - de la sensibilité du récepteur (facteur de bruit) ;
 - du niveau de bruit ambiant (galactique - industriel) ;
 - des bruits de propagation.

6. Stabilité du temps obtenu

On s'aperçoit au vu de la figure 3b et c :

1. qu'il est judicieux de choisir le 1^{er} flanc du « chemin de phase » démodulé de façon à compenser la somme des retards produits par le récepteur (environ 30 ms) ;
2. que la stabilité du déclenchement dépend de la

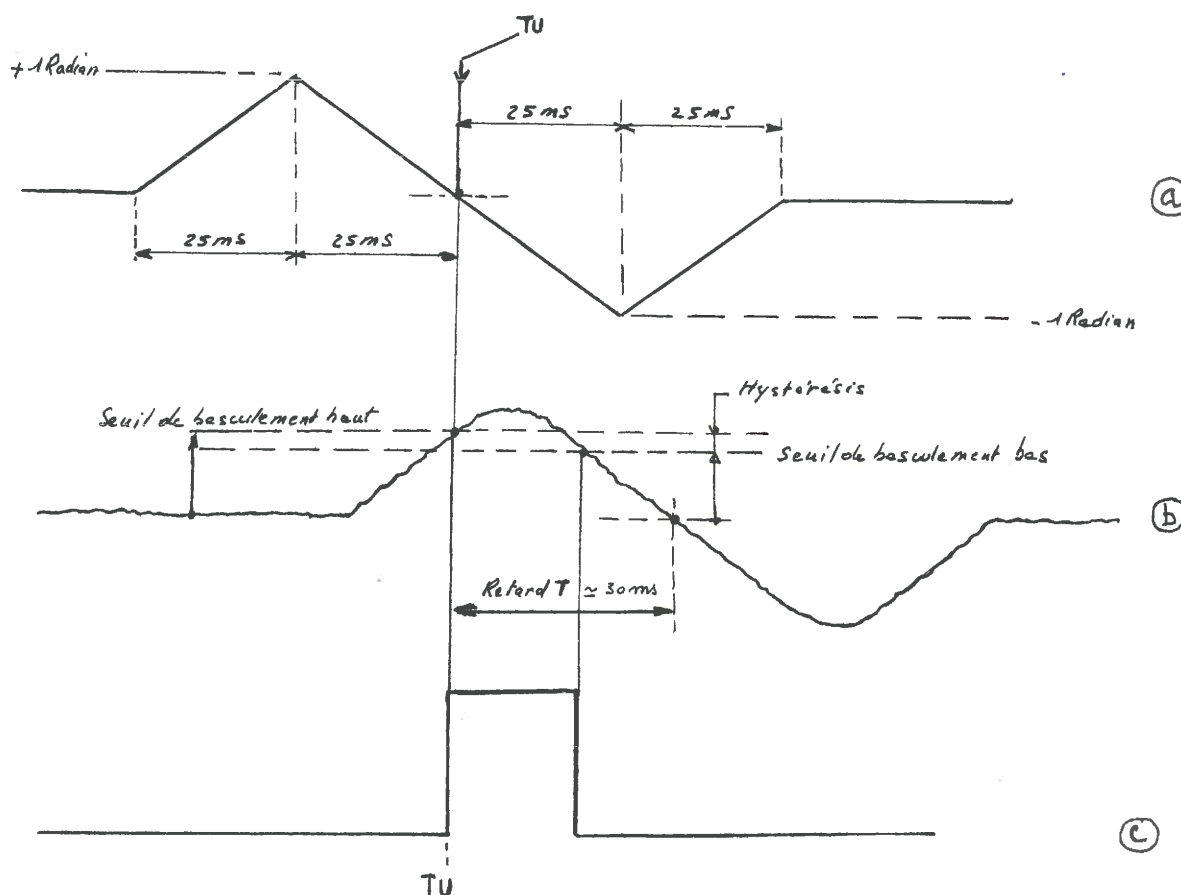


FIG. 3.

pente du signal, mais que celle-ci est déterminée par l'émetteur = 25 ms/radian ;

3. que la stabilité du déclenchement ne dépend pas de la distorsion de la démodulation dans la mesure où celle-ci est une constante du récepteur ;
4. que la stabilité ne dépend que du *bruit aléatoire* susceptible de se superposer au signal reçu.

7. Origines et pondération du bruit de fond

Il ne sera abordé dans cette étude que les bruits propres aux récepteurs, les bruits de propagation étant supposés nuls.

Si l'on voulait obtenir $\pm 1 \mu s$, il faudrait avoir un rapport de :

$$20 \log \frac{25 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 88 \text{ dB !}$$

ce qui est impossible, compte tenu des limites technologiques de réception actuelles. De toute façon, même ceci supposé, il est vraisemblable que les fluctuations de propagation seraient nettement en deçà du résultat désiré !

Par conséquent, une amélioration ne peut être attendue qu'en procédant au calcul statistique et échantillonnage d'un nombre important de mesures consécutives, qui, du fait du caractère aléatoire du bruit qui les altère, vont se répartir selon une courbe de Gauss dont l'axe représentera la meilleure approche du temps vrai (fig. 5).

Des études sont en cours qui permettent d'espérer obtenir mieux que $\pm 100 \mu s$.

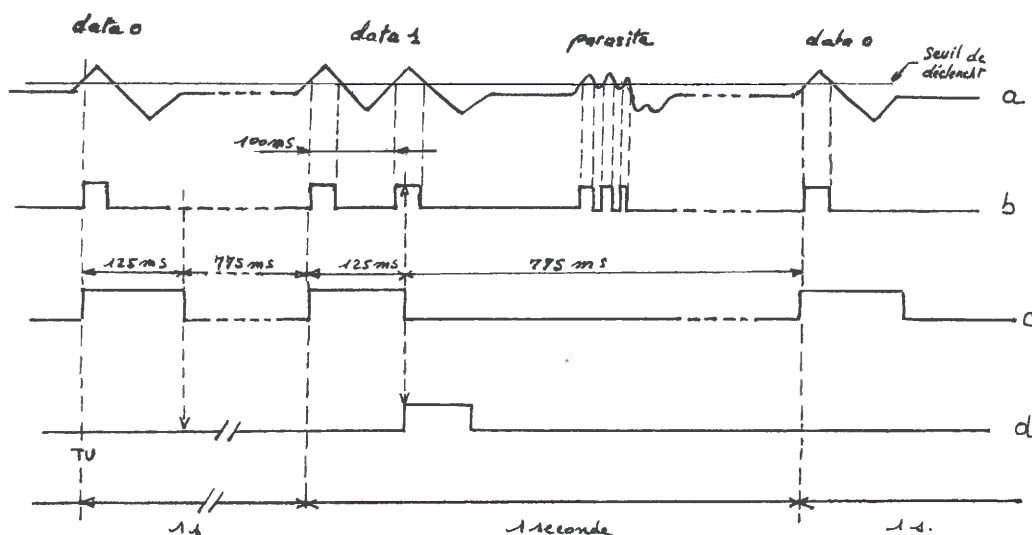


FIG. 4.

- a : Chemin de phase issu du discriminateur.
- b : Signaux remis en forme par le trigger à seuil ajustable.
- c : Horloge 1 Hz issue du compteur de fréquence verrouillée par l'émetteur.
- d : Signaux data 1 en corrélation de phase avec TU.

Il est facile de se prémunir contre les bruits importants susceptibles de falsifier le message horaire transmis par le choix de l'hystérésis du trigger de mise en forme des données transmises.

On peut également éliminer les données erronées par corrélation de phase avec le temps atomique (fig. 4), ou et par traitement algorithmique du message, analyse des bits de parité, etc.

Par contre, on entrevoit la difficulté à garantir une stabilité et une précision importantes.

En effet, même lorsque toutes les précautions techniques ont été prises (sélectivité, sensibilité, pureté spectrale des oscillateurs, boucle d'asservissement, etc.), on se heurte à des limites quant à la pureté spectrale des signaux démodulés, limite qu'est celle du rapport Signal/Bruit (voir chapitre VI, figure 4).

Actuellement, des rapports de 30 dB garantissent, compte tenu de la pente de 25 ms/radian, une stabilité de $\pm 0,8 \text{ ms}$.

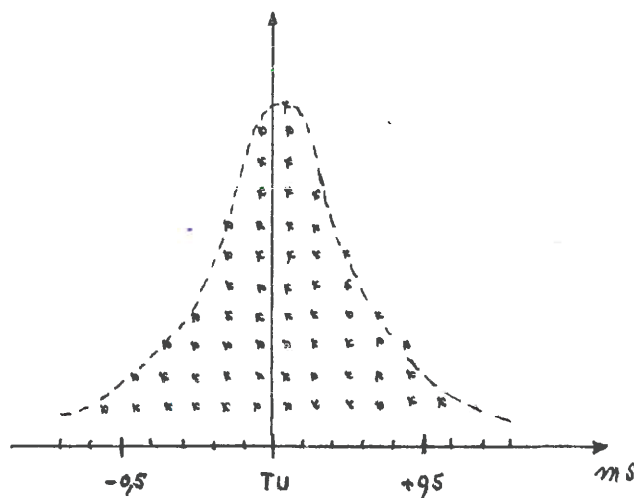


FIG. 5. — Cible de dispersion des tops secondes reçus pendant 1 minute.
Résolution de la mesure 0,1 ms.