

# Amélioration de la précision des horloges pilotées par le code horaire de France Inter

R.-A. GEOFFROY

*Dyna-Électronique*

## Résumé

La présente communication émane d'un constructeur, c'est-à-dire de quelqu'un dont le lot quotidien est constitué de problèmes d'approvisionnement, de production, de coût de fabrication, de commercialisation et de trésorerie...

Que l'on ne s'attende donc pas à de savants développements théoriques dont l'auteur est d'ailleurs bien incapable, mais tout simplement à l'exposé d'un problème bien précis et des solutions pratiques imaginées — sinon pour le résoudre — du moins pour améliorer les performances d'un produit.

## Abstract

*This communication is made by a manufacturer, that is to say someone who has his daily share of problems of supply, production, manufacture-cost, marketing and treasury.*

*Thus, don't expect masterly theoretical developments but simply a statement of a definite problem, practical solutions to improve the performance of a product.*

## Rappel des principes de l'émission

Il y a fort longtemps déjà que le CNET avait imaginé le procédé qui consiste à moduler en phase la porteuse d'un émetteur grandes-ondes pour transmettre un message horaire et calendaire, mais c'est seulement dans le courant de l'année 1980 que l'émission expérimentale était mise en place sur l'émetteur d'Allouis. Cette modulation de phase intervient à chaque seconde, de la seconde 0 à la seconde 58 de chaque minute ; aucune modulation, en revanche,

n'affecte la seconde 59, ce « silence » permettant le repérage du début de message à la seconde suivante, qui se trouve donc être la seconde 0.

La modulation correspondant à une seconde donnée débute dans les 50 dernières millisecondes de la seconde précédente.

Le diagramme de cette modulation de phase évoque deux dents de scie successives, l'une positive, l'autre négative : la phase avance linéairement de 1 radian en 25 ms, retarde de 2 radians en 50 ms, puis avance à nouveau de 1 radian en 25 ms, ce qui la ramène évidemment à 0. C'est le premier passage à 0 qui a été choisi comme référence pour marquer la seconde exacte et qui constitue, à l'émission, ce que nous appellerons tout simplement la seconde-étalon.

Cette modulation est utilisée pour la transmission d'un bit à 0, elle est redoublée dans le cas d'un bit à 1. Le poids de chacun de ces bits d'information ainsi que la grandeur à laquelle il se rapporte sont donnés par le numéro d'ordre de la seconde à laquelle il est transmis. On peut ainsi décoder un message comportant la minute, l'heure, le jour de la semaine, le jour du mois, le mois et le millésime, ainsi que plusieurs données annexes telles que le caractère férié ou ouvrable du jour considéré, l'avance en heures sur le temps TU, et enfin l'imminence d'un changement saisonnier d'horaire.

## Le récepteur

Lorsque Dyna-Électronique a été amené, il y a quelques années, à développer sous licence CNET des récepteurs horaires adaptés à cette émission, le principe du superhétérodyne s'est imposé de lui-même :

dès lors, l'idée d'asservir l'oscillateur local à la fréquence de la porteuse de France Inter devait suivre tout naturellement, puisque c'était le moyen idéal pour disposer d'un oscillateur très stable dans une assez large plage de températures sans recourir à un pilote thermostaté qui aurait été plus coûteux que le reste du récepteur... Grâce à cette solution, la fréquence intermédiaire se trouvait, elle aussi, asservie sur la porteuse, et, au moins dans de bonnes conditions de réception, avait toutes chances de présenter les mêmes caractéristiques de stabilité.

Sans entrer dans une description détaillée des circuits du récepteur, précisons toutefois que celui-ci se termine par un démodulateur de phase en sortie duquel on récupère un signal reproduisant assez fidèlement la forme de modulation appliquée à l'émetteur, et dont la valeur moyenne est celle de la tension d'asservissement. Cette dernière étant variable par définition, la mise à niveau logique du signal ne peut naturellement être effectuée par un trigger de Schmitt, mais seulement par un circuit comparateur, ce qui implique une quasi-absence d'hystérésis, donc une certaine sensibilité au bruit. Plus la réception est faible, moins propre est le signal de sortie, ce qui n'a d'ailleurs rien d'extraordinaire, et l'on admettra volontiers que l'émission issue d'Allouis soit moins bien reçue à Lisbonne qu'à Romorantin... L'expérience montre toutefois, et c'est assez regrettable, que même dans certaines zones où la réception pourrait être excellente, les conditions d'installation ne sont pas toujours optimales.

Or c'est seulement le signal mis à niveau logique qui sera traité et interprété, c'est-à-dire que c'est lui seul qui conditionnera les performances de l'ensemble, du moins en ce qui concerne la précision.

## Étude statistique du signal triggé

Un simple examen à l'oscilloscope du signal triggé est déjà riche d'enseignements : dans de bonnes conditions de réception, les crêteaux apparaissent relativement stables en largeur ; on peut observer un certain jitter, mais il reste très faible. Si, par un quelconque artifice, on détériore la réception, par exemple en insérant un atténuateur dans la descente d'antenne, ou, mieux encore parce que plus progressif, en orientant très lentement l'antenne jusqu'à 90° de la position optimale, on observe une déformation importante du signal reçu : non seulement la largeur des crêteaux arrive à varier dans des proportions très appréciables, mais le jitter, lui aussi, augmente sensiblement — bien que dans une moindre mesure —.

Grâce à l'obligeance de M. Dubouis, qui, dans son laboratoire du CNET, a bien voulu procéder à des mesures de jitter sur quelques-uns de nos récepteurs, il nous a été possible de disposer de données plus précises.

Afin de s'affranchir des différences de largeur entre signaux consécutifs, les mesures ont porté sur la position dans le temps du centre des tops. Dans de bonnes conditions de réception, et pour un échantillon de 2 000 tops, on note une distribution raisonnablement unimodale et pratiquement gaussienne avec un écart type de l'ordre de 250  $\mu$ s. En revanche, dans des conditions de réception difficile, l'écart type est largement supérieur à 500  $\mu$ s, et la distribution, bien qu'elle demeure unimodale, s'éloigne sensiblement d'une courbe de Gauss, de façon telle, en tous cas, qu'il n'est plus question de considérer que 94 % de la population se situe à moins de 2 écarts types par rapport à la moyenne ; la dispersion constatée ne correspond plus du tout à celle de la courbe normale ; conclusion pratique : entre deux tops-seconde consécutifs, il n'est pas exceptionnel de mesurer des intervalles de plus d'une milliseconde, du moins si la réception n'est pas parfaite.

Si l'on considère qu'il s'agit là du résultat de mesures effectuées sur le centre des tops, lesquels sont par ailleurs affectés d'une importante irrégularité en largeur, on conçoit que toute horloge qui serait pilotée directement par les fronts de montée ou de descente des tops-seconde issus d'un récepteur aurait des performances à court terme tout à fait désastreuses, tout en remarquant d'ailleurs qu'elles resteraient très largement suffisantes dans une foule d'applications.

## Comportement à long terme du récepteur horaire

Supposons que nous mettions en service en cet instant même un récepteur horaire. Avec l'équipement dont dispose par exemple le CNET, nous pourrions fort bien mesurer le décalage de ce récepteur par rapport à la seconde du temps TU. Nous constatons, pour un top donné, disons une avance de 5 ms. Laissons maintenant le récepteur en fonctionnement, sans plus nous en préoccuper. Nous répéterons la même mesure dans 15 ans : selon toute vraisemblance, le résultat sera toujours du même ordre de grandeur, compris par exemple entre + et - 5 ms. Devrions-nous en conclure que dans le plus mauvais des cas, la dérive a été de  $2 \cdot 10^{-11}$  sur 15 ans ? Évidemment non, bien que le calcul soit arithmétiquement exact.

Bien que cet exemple soit fort simpliste, il a été délibérément choisi pour mettre en évidence une différence qui n'a pas toujours été saisie par les utilisateurs : un récepteur horaire est une *horloge*, au sens de la définition des dictionnaires, c'est-à-dire un dispositif destiné à marquer ou à indiquer l'heure. Quelle que soit la précision à long terme de cette horloge, elle ne possède absolument pas les caractéristiques d'un étalon de fréquence, dont la précision à terme est la résultante d'un offset initial et d'une

dérive par vieillissement (les conditions d'exploitation étant supposées rester identiques à elles-mêmes).

D'où vient que la confusion a pu naître dans l'esprit de certains utilisateurs ? Certainement, en premier lieu, du fait que chacun sait que l'émission est pilotée par d'excellents étalons de fréquence de très haute précision, mais aussi peut-être du fait que l'on connaît l'existence de standards de fréquence asservis sur la porteuse de certains émetteurs : comme nous avons choisi le même principe pour stabiliser l'oscillateur local de nos récepteurs, certains de nos clients ont pu s'imaginer qu'on pouvait en attendre des performances analogues : notons que le coût de cet oscillateur asservi doit représenter à peu près 5 % du coût total du récepteur, soit tout au plus 200 F en prix de vente, et qu'il n'est guère raisonnable de vouloir le substituer à un équipement 2 ou 300 fois plus coûteux en exigeant les mêmes résultats...

Pour notre part, et tout en sachant parfaitement que nous ne pouvions considérer que nos récepteurs étaient pilotés par un étalon de fréquence, nous cherchions toutefois à nous approcher d'un fonctionnement de ce type par la conception de la partie logique du récepteur, tant matériel que logiciel.

## Deux applications typiques

A ce jour, en France et dans les pays limitrophes, plusieurs milliers de récepteurs horaires sont en service, dans les applications les plus variées. Choisissons-en deux, pas tout-à-fait au hasard, mais presque :

1) Une PME utilise un ordinateur personnel pour gérer sa comptabilité. Chaque matin, le comptable est obligé d'entrer la date et l'heure, avant de commencer la saisie des écritures de la journée : le 15 avril au matin, erreur de frappe : il tape 15.04.1987 au lieu de 1986. Le programme considère que l'exercice 1986 est terminé : on imagine la suite... Si l'ordinateur avait été équipé d'une carte de réception horaire, ainsi que cela commence à être le cas, une telle catastrophe aurait été évitée, même si, à la limite, celui-ci avait été en retard ou en avance de plusieurs minutes, ou même de plusieurs heures...

2) Deux centrales EDF, distantes de plusieurs centaines de kilomètres, décident de faire des mesures de variation de phase sur le réseau qu'elles alimentent. L'une et l'autre utilisent à cet effet un récepteur horaire. Un calcul élémentaire permet de connaître le décalage dû à la distance de chacun des récepteurs par rapport à l'émetteur d'Allouis. Les deux récepteurs initialisés, les mesures peuvent commencer, mesures tout à fait significatives si la synchronisation entre les deux appareils est de l'ordre de  $\pm 100 \mu s$ . Qu'une défaillance se produise sur l'affichage de l'un des deux récepteurs, par exemple qu'il affiche 1916 au

lieu de 1986, une erreur de 70 ans n'empêchera pas les mesures de se poursuivre.

Deux applications, deux exigences totalement opposées.

La Fontaine disait que l'on ne peut contenter tout le monde et son père : au fabricant de récepteurs horaires de démontrer le contraire...

## Où est la solution ?

Si les exigences de la clientèle sont aussi différentes, une seule issue est laissée au fabricant qui ne tient pas à construire autant d'appareils qu'il compte de clients... C'est d'améliorer la précision de ses produits : nul ne se plaint que sa montre est trop précise, du moins dans la mesure où le prix n'en est pas abusif. Et puis le plus sûr moyen pour tous d'avoir la même heure, c'est encore que chacun ait l'heure exacte...

On a vu pourquoi la précision aurait été illusoire si les tops-seconde reçus avaient été utilisés comme base de temps. Il était donc nécessaire de leur substituer dans ce rôle d'autres tops créés localement, donc affranchis de toutes les perturbations dues au principe même de la transmission radio, à celui de la réception et de la démodulation de phase, et enfin à la qualité de la liaison.

Pour créer ces tops, la fréquence intermédiaire, qui, on l'a vu, est asservie sur la porteuse de France Inter, était évidemment toute indiquée du fait de sa grande stabilité. Elle fut donc appliquée à une chaîne de diviseurs de façon à obtenir une fréquence de 20 Hz, laquelle est comptée dans un compteur de base 20. Les périodes 19 et 01 en sont décodées, et on en réalise la fonction « OU ». On obtient ainsi, à chaque seconde, deux créneaux de 50 ms espacés entre eux de 50 ms, reproduisant ainsi, à la largeur près, le double top (seconde et message) transmis par France Inter pour un bit à 1.

Il suffisait dès lors de caler une fois pour toutes, les tops reçus dans ces créneaux par une remise à zéro de la chaîne de diviseurs effectuée au moment voulu. Les créneaux de 50 ms étant nettement plus longs que les tops reçus — lesquels ne dépassent guère 25 ms — ils peuvent être considérés comme de véritables « fenêtres ». Pendant la 1<sup>re</sup>, le microprocesseur testera non seulement la présence d'un top-seconde, mais encore pourra évaluer sa position de façon à détecter toute désynchronisation. Pendant la 2<sup>e</sup>, le microprocesseur détectera la présence ou l'absence du top-message (bit à 1 ou à 0).

Les « fenêtres » sont de plus la véritable base de temps de l'horloge ; dans la mesure où la porteuse de France Inter est présente, elles sont pilotées par une fréquence remarquablement stable ; elles sont dépourvues de tout jitter ; enfin elles sont présentes à la seconde 59, contrairement au signal émis.

Le seul problème qui reste posé est celui du critère à retenir pour commander la remise à 0 initiale de la chaîne de diviseurs, puisque c'est de là que découle, naturellement, la précision de l'ensemble.

## Une première méthode

Jusqu'à l'automne 1985, différents logiciels ont fonctionné sur les récepteurs horaires de Dyna-Électronique. A quelques variantes près, le principe restait le même : tant à la première initialisation que lorsqu'une resynchronisation s'avérait nécessaire, la remise à 0 de la chaîne de diviseurs était effectuée après un délai fixe exécuté à partir du milieu (calculé) du top-seconde de la seconde 0. De la seconde 1 à la seconde 58, la position du top-seconde dans la 1<sup>re</sup> « fenêtre » était mesurée, et si les 58 mesures donnaient un résultat anormal, on en déduisait que la synchronisation avait été effectuée sur un top-seconde affecté d'un jitter important ; on refaisait donc une nouvelle tentative à la seconde 0 suivante. En règle générale, dans les cas de réception satisfaisante, une bonne synchronisation était obtenue dans un temps relativement court, 2 à 5 minutes.

Plus la réception était faible, plus longtemps devaient se répéter ces tentatives, et il pouvait même arriver, dans les cas les plus difficiles, que la resynchronisation ait lieu à chaque minute. Le jitter n'apparaissait pas à chaque seconde, mais à chaque minute, ce qui n'était guère plus satisfaisant, du moins pour certaines applications particulières.

## Les derniers développements

Le récent changement de fréquence de l'émetteur de France Inter a nécessité une refonte du matériel.

On en a profité pour y apporter certaines modifications de détail, et pour revoir entièrement le programme. Comme auparavant mais selon un principe différent et plus performant, on utilise entièrement la durée de 50 ms de la 1<sup>re</sup> « fenêtre » à mesurer très exactement la position du centre du top dans celle-ci, et on effectue la somme des mesures relevées de la seconde 0 à la seconde 58. On profite de l'absence de top à la seconde 59 pour effectuer le calcul de la position moyenne des 59 tops précédents à l'intérieur de la « fenêtre ». Si nous notons  $\sigma_n$  l'écart type de la moyenne de plusieurs échantillons d'effectif  $n$ , nous obtenons :

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

où  $\sigma$  est l'écart type de la distribution des individus pris séparément. On voit donc que des échantillons de 59 tops nous donnent un écart type 7,7 fois plus faible que celui des tops isolés.

De plus, si une resynchronisation se révèle nécessaire, elle s'effectue de façon bien moins brutale qu'à partir d'un top dont le jitter est a priori inconnu. A partir du calcul de la position moyenne de 59 tops précédents, on déduit le moment auquel la remise à zéro de la chaîne de diviseurs doit avoir lieu pour que les tops soient correctement en place dans leurs « fenêtres » dès la minute suivante, et l'on exécute cette remise à zéro à l'instant voulu.

A l'heure où la présente publication est mise sous presse, les essais se poursuivent encore, et les résultats déjà obtenus sont fort encourageants. Nous aurions souhaité, également, exposer un certain nombre de développements ultérieurs encore à l'état de projet ou en cours de réalisation, mais tous ces éléments, ainsi que nos résultats de mesures, seront communiqués aux participants aux Journées du mois d'avril.