

# Une FI à diapason piézoélectrique, un microtome pour les VLF

J.J. Delcourt Dr.Sc. email : [ionosphere.d23@skynet.be](mailto:ionosphere.d23@skynet.be)

## Abstract

L'utilisation de diapasons piézoélectriques permet d'explorer la bande VLF avec une fenêtre dont la largeur de bande est de l'ordre du Hertz .

## Introduction

L'étude de l'évolution de l'ionisation de la région D se fait essentiellement en enregistrant et en commentant les niveaux de réception ou la phase de signaux provenant d'émetteurs fonctionnant sous le seuil des 100 KHz . Certaines fréquences d'émission sont très proches les unes des autres, parfois de l'ordre de 200 Hz .

Le monitoring porte sur deux types d'émissions, les unes à fréquence fixe ultra stable telles que celle des étalons horaire ou du LORAN, les autres, à vocation militaire, étant modulées en fréquence ou en phase .

L'utilisation des premières fait nécessairement appel à des récepteurs à amplification directe évolués permettant de garder l' *information phase*, technique qui ne s'applique pas nécessairement aux secondes qui sont pour une bonne part situées dans la bande s'étendant de 15 KHz à 25 KHz . Cette partie du spectre est très bruyante, le facteur de bruit atmosphérique y est en effet au moins mille milliards de fois plus important que dans la bande des 10 MHz ! On en tirera deux conclusions :

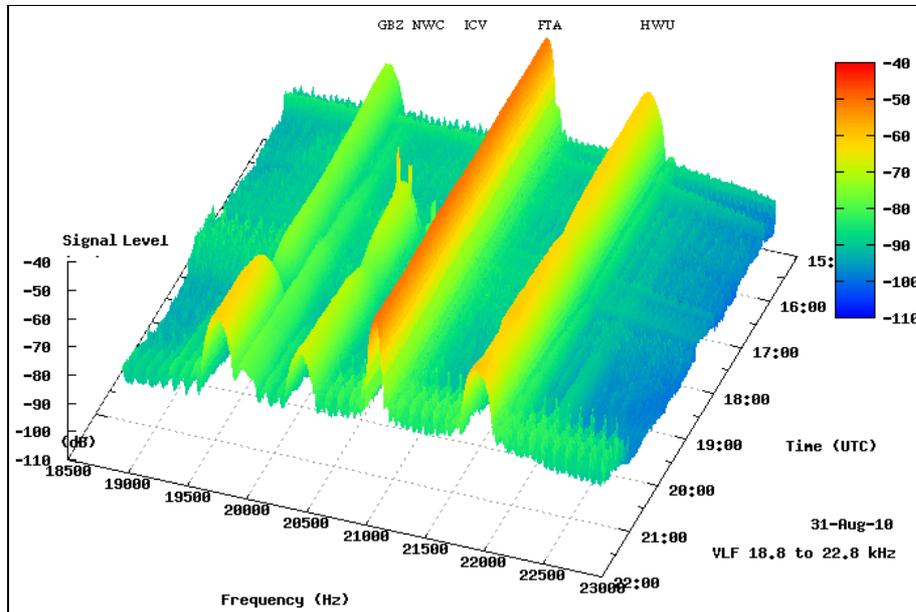
1. le recours à des amplificateurs d'entrée à faible bruit est, dans ce domaine de fréquences, un fantasme de technicien
2. il faut réduire drastiquement la bande passante de réception puisque le décodage du signal n'est pas la priorité lors de l'écoute de ces signaux détournés de leur finalité première .

En général, le nombre de canaux monitorés est relativement important, et le besoin d'un module de réception ou de post amplification directe, d'une bande passante de l'ordre du Hertz , de faible coût, facilement duplicable et insérable dans une chaîne de traitement préexistante se fait sentir avec acuité dans la communauté des lowfers . Dans le cas des émissions horaires de type A1A à 60 et 77,5 KHz, la taille d'un quartz nécessitée par le recours à une amplification directe s'impose, mais pour la bande des 20 KHz régie par le FSK ou le MSK, il existe une alternative séduisante et peu onéreuse : le diapason piézoélectrique à 32 768 Hz utilisé en horlogerie .

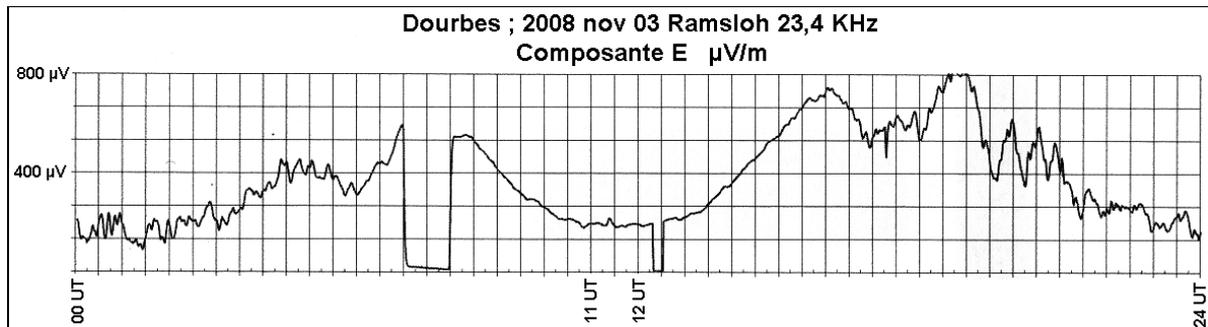
## Les techniques classiques

Elles varient en fonction de la recherche effectuée et peuvent fournir, bien entendu sans contrôle automatique de gain

- soit une *simple information* sur la bande spectrale étudiée, présence ou non d'une porteuse, appréciation de son amplitude, niveau de bruit ambiant à un instant donné, dérive en fréquence ... L'archétype de ce type de mesure est le waterfall ou mieux, le sonogramme (figure 1) qui effectuent une Transformée de Fourier Discrete du signal . D'une manière générale, ces chaînes de réception ne sont pas calibrées . La grandeur de sortie est une amplitude relative .
- soit une mesure de l'évolution de l'amplitude ou de la phase du signal reçu . Dans cette optique, la chaîne de réception est calibrée, de l'antenne au gain des amplificateurs . Elle nécessite la présence au moins temporaire d'une antenne étalon et d'un voltmètre sélectif . La grandeur de sortie est la valeur de la composante E du champ électromagnétique reçu (  $\mu\text{V/m}$ ), indépendamment des caractéristiques de la chaîne de réception ( figure 2) .

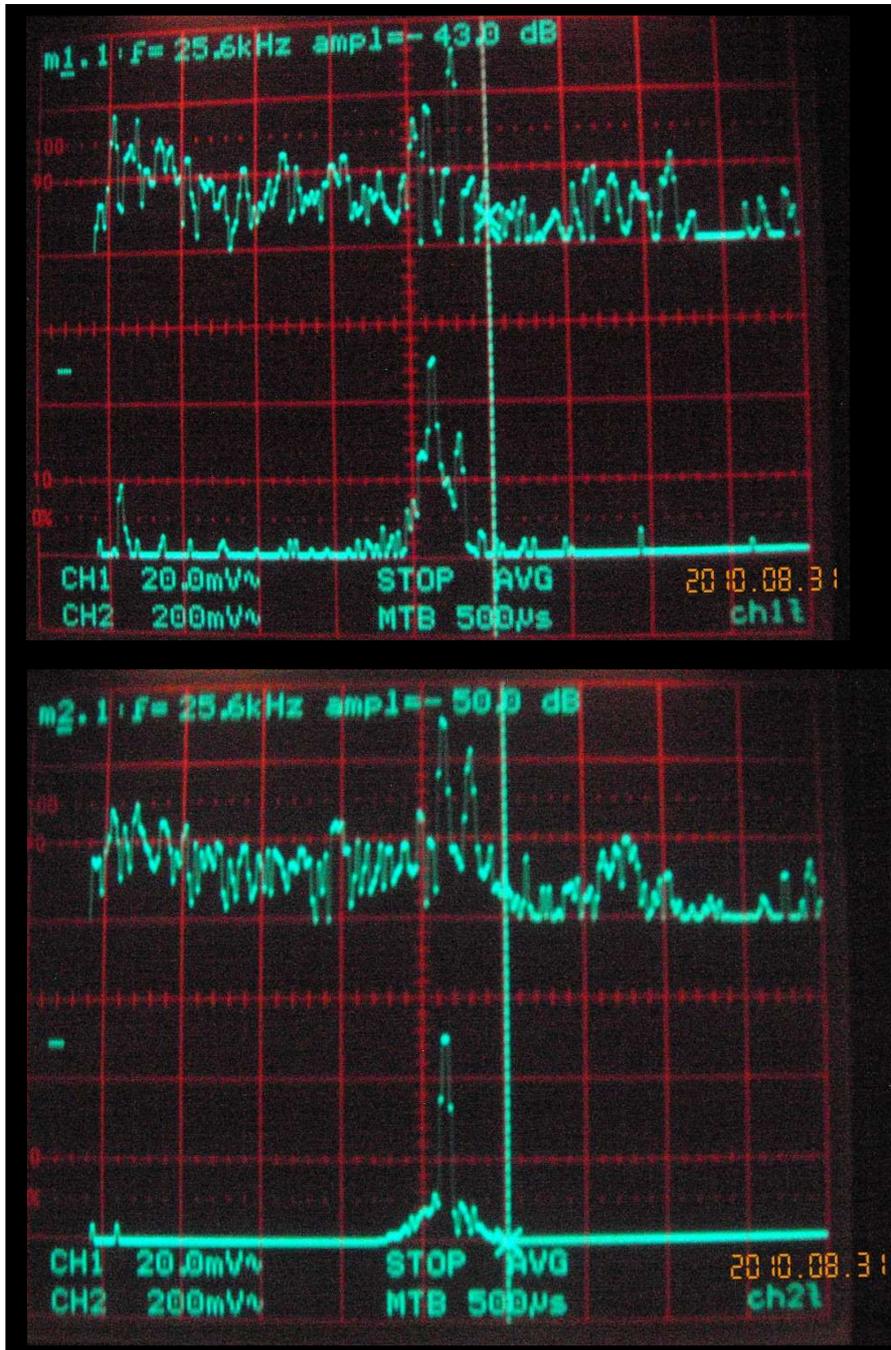


**Figure 1 :** sonogramme de la bande s'étendant de 18 à 22,5 KHz montrant, de la gauche vers la droite, l'évolution en milieu d'après midi et en début de soirée des signaux de Anthorn 19,6 KHz (Grande Bretagne) , l'émergence de Harold Holt 19,8 KHz (Australie), Tavolara 20,27 KHz (Sardaigne) qui reprenait ses émissions à 17<sup>h</sup> 25<sup>m</sup> UT, Sainte Assise 20,9 KHz (Melun) et Le Blanc 21,75 KHz (Poitiers) .  
Enregistrement et post traitement : Jean Pierre Godet F5YG



**Figure 2 :** Enregistrement du niveau de réception de l'émetteur allemand DHO intégré à la chaîne d'émission VLF de l'OTAN . Antenne par prises de sol distantes de 100 m . Récepteur à gyrateur . [DEL 10] . La modification du niveau de réception est due à l'évolution de la figure d'interférence onde de sol – onde de ciel . Lever du Soleil: 5<sup>h</sup>32<sup>m</sup> UT, coucher 17<sup>h</sup>07<sup>m</sup> UT au point subréfléctif et à 100 km d'altitude .

La transformée de Fourier discrète n'est pas exempte d'artefacts . En effet, elle permet seulement d'évaluer une représentation spectrale échantillonnée d'un signal échantillonné . Elle dépend de la manière dont sont sélectionnés les échantillons, donc de la synchronisation de la base de temps fournissant les échantillons qui figurent dans la matrice servant à calculer la FFT par le biais d'un circuit DSP (figure 3) . On entre ici dans le domaine subtil du *fenêtrage* qui pondère l'importance des échantillons en fonction de leur *ancienneté* et qui peut présenter des erreurs de fermeture .



**Figure 3 :** Visualisation de la FFT couvrant le spectre VLF s'étendant du quasi continu à 45 KHz, 5 KHz par carré, excursion verticale 50 dB .

Chaîne de réception pour les canaux du haut des deux fenêtres : antenne verticale de 6m suivie d'un adaptateur d'impédance de gain unitaire, d'un filtre LP elliptique du sixième ordre dont la fréquence de coupure est de 100 KHz suivi d'un réjecteur 50 Hz .

Chaîne de réception pour les deux canaux inférieurs : spire de tube de cuivre en court-circuit 1,5 x 1,5 m avec conversion courant – tension par les biais de tores de ferrite, récepteur à gyrateur accordé sur la fréquence de Sainte Assise à 20,9 KHz . Dans la fenêtre du haut, la synchronisation est effectuée sur le signal global où émerge l'émission à 23,4 KHz de l'émetteur allemand DHO . On remarque dans le spectre sélectif de l'émetteur français de Sainte Assise un reliquat de la porteuse de DHO . Pour la fenêtre du bas, la synchronisation est faite sur la porteuse à 20,9 KHz issue du gyrateur .Le reliquat dû à DHO a disparu .

On notera dans les deux spectres globaux les variations d'amplitudes relatives de DHO – FTA ! On y verra la trace laissée par le remplissage erratique ou synchrone de la matrice d'échantillons permettant de calculer la TFD . Dans tous les cas, le fenêtrage est de Hamming . On aura donc des arrières pensées soupçonneuses quant à l'absolue réalité des informations données par la FFT .

**Un filtre d'exploration ultra sélectif**

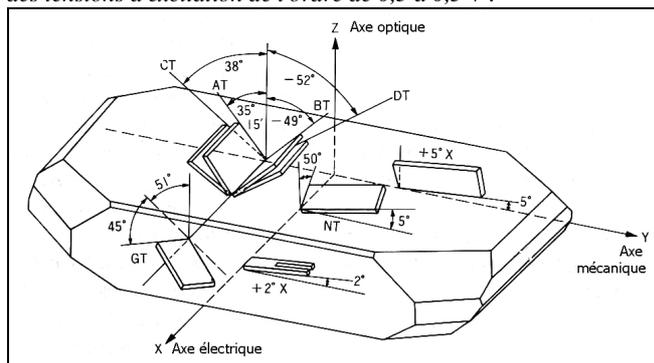
L'idée générale est de faire suivre l'adaptateur d'impédance et l'éventuel filtre LP ou le récepteur à gyrateur d'un module à changement de fréquence dont la FI serait de 32 768 Hz avec une bande passante de l'ordre du Hertz . Le montage est architecturé autour d'un NE 602, les valeurs des OL étant fixes, dépendant des émetteurs VLF monitorés, et la FI est un diapason piézoélectrique d' horlogerie . Le facteur de qualité du diapason qui est de l'ordre de 20 000 sous vide et de l'ordre de 1 000 dans l'air, encapsulé ôté, n'autorise bien entendu pas de balayage rapide de la bande mais bien une réception à fréquence fixe ou à balayage très lent où le passage d'une fréquence à l'autre nécessite au moins deux secondes de temps d' établissement . La bande passante de spectre occupée par les émissions est de l'ordre de 50 ou 100 Hz, la stabilité de l'oscillateur local n'est donc pas une ultime priorité . On s'orientera néanmoins vers une base de temps à quartz fournissant par divisions successives les valeurs des différentes fréquences d' OL .

**Le diapason piézoélectrique**

Le diapason piézoélectrique est largement utilisé dans les nanotechnologies, notamment en microscopie à haute résolution . Pour ce qui nous concerne, la longueur des poutres du diapason est de 3,2 mm et leur épaisseur de 0,33 mm (figure 4) . Le diapason est usiné par processus lithographique à partir d'un wafer de quartz synthétique obtenu par croissance hydrothermale à la vitesse moyenne de 1mm par jour .



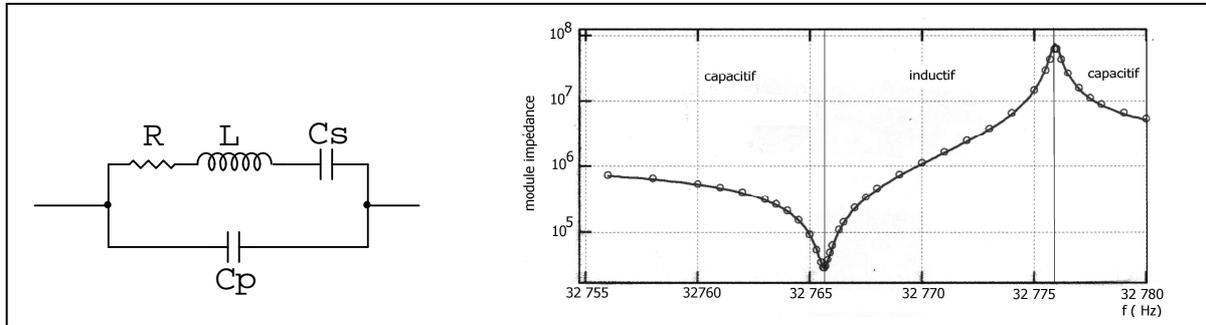
**Figure 4 :** macrophotographie d'un diapason piézoélectrique ainsi qu'une image au microscope électronique à balayage . Les électrodes sont placées sur deux faces connexes des poutres, en croisant les liaisons d'une poutre à l'autre . Les champs ainsi créés induisent un mouvement de flexion dans le plan du diapason autorisant un déplacement en éloignement – rapprochement des deux verges . L'amplitude de la vibration d'une poutre de diapason d'horlogerie varie quasi linéairement avec la tension d'excitation . Elle est de l'ordre de 50 nm pour 0,1 V d'excitation et de 350 nm pour 1V . En général, on travaille avec des tensions d'excitation de l'ordre de 0,3 à 0,5 V .



**Figure 5 :** représentation des différents types de coupe, dont celle du diapason . La coupe AT correspond à la coupe standard utilisée dans l'électronique classique . Pour ce qui concerne les diapasons, on définit trois classes qui dépendent de la technique utilisée pour faire croître le cristal et dont dépendent les inclusions qui figurent dans le réseau ainsi que son homogénéité . Elles vont de médiocre pour l'horlogerie bas de gamme à bonne pour l' horlogerie classique et à exceptionnelle pour l'aérospatial . Exemple : une montre de qualité horlogère correcte fonctionnant dans l'ambiance d' un entrepôt frigorifique dérive d'approximativement 20 secondes par jour .

### Schéma équivalent

Le schéma équivalent et la courbe d'impédance associée sont identiques aux caractéristiques d'un quartz classique si ce n'est dans la valeur des éléments .



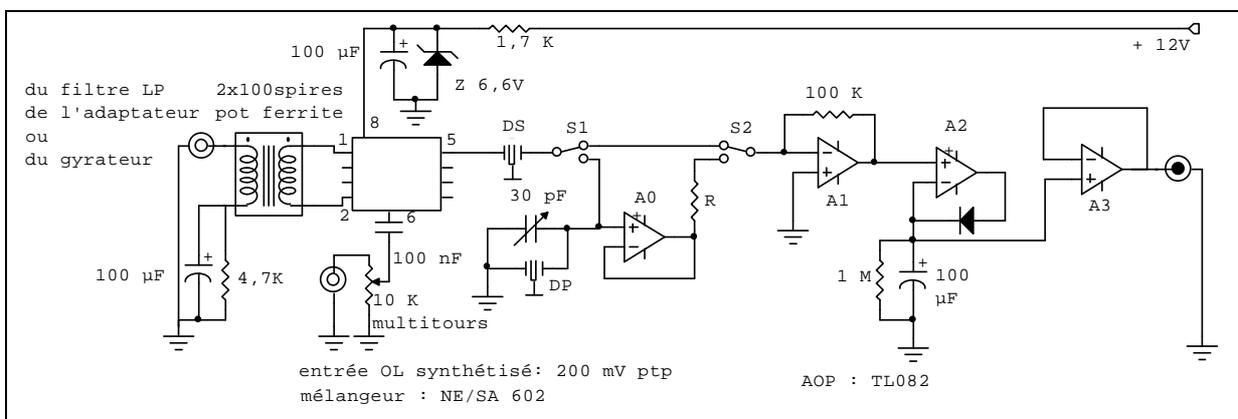
**Figure 6 :** Schéma équivalent et module de l'impédance d'un diapason à quartz . Alors que les capacités sont du même ordre de grandeur que pour un quartz traditionnel, soit de 3pF pour la capacité parallèle (encapsulage) et 3 fF pour la capacité série (électrodes), la valeur de la résistance série vaut une vingtaine de K $\Omega$  pour le diapason tandis qu'elle vaut une vingtaine d' Ohm pour un quartz standard . La disparité est encore plus grande pour la valeur de L qui est imposée par la fréquence de résonance mécanique et qui est de l'ordre de 4 800 H dans le cas du diapason contre 100 mH dans le cas d'un quartz standard . Il est tout à fait inattendu et impressionnant qu'un aussi petit boîtier recèle une inductance de plusieurs milliers de Henry . A la fréquence de résonance série, l'impédance se ramène à la valeur de R soit approximativement 22 K $\Omega$ , tandis que l'impédance correspondant à la résonance parallèle est d'une petite centaine de M $\Omega$ . La fréquence de résonance parallèle est supérieure d'une dizaine de Hz à la fréquence de résonance série . On se souviendra qu'une capacité série est susceptible d' augmenter légèrement la fréquence d' oscillation série, tandis qu' une capacité parallèle diminue la fréquence de résonance parallèle . Une capacité parallèle additionnelle, ajustable et de qualité professionnelle, d' une trentaine de pF est ainsi susceptible d'amener la résonance parallèle très près de la résonance série . Dans cette optique, l'impédance d'entrée de l'électronique qui suit doit être soignée, on n'est pas très éloigné des 100 M $\Omega$  d' impédance de source !

### Le mélangeur

Il est architecturé autour d'un NE 602 câblé en entrée symétrique et sortie asymétrique (figure 7) . Cette sortie attaque un diapason résonant en mode série, donc à impédance minimale, suivi d'un convertisseur courant - tension attaquant un détecteur de crête accompagné d'un suiveur . Il est possible d'adjoindre un second diapason résonant en mode parallèle .

Le mélangeur est de type supradynne correspondant à  $FI = f_{OL} + f_{re\grave{c}ue}$  . Pour la synthèse des fréquences locales, on partira d'un maître étalon à 10 MHz, et on pratiquera des divisions en fréquence qui sont toutes des multiples de 2 afin d'assurer au signal OL un rapport cyclique de 1/1 . Le tableau 1 montre que les raies d'examen sont bien situées dans la bande passante de 50 à 100 Hz que nous nous étions fixée comme limite .

On court toutefois un risque ... La représentation à l'écran de la FFT d'un signal FM, FSK ou MSK est en effet souvent trompeuse ; par manque de résolution, elle fournit fréquemment l'enveloppe de la bande spectrale occupée par le signal . Le calcul montre toutefois (fonctions de Bessel, ...) que le spectre n'est pas continûment rempli, mais, contrairement à l'intuition, parsemé de paires de raies spectrales dépendant de la fréquence de la modulante ou du rapport excursion en fréquence / débit binaire . Dans l'ignorance des caractéristiques de la modulation utilisée, il existe donc la possibilité de placer la raie d'examen entre deux lobes du spectre, possibilité qu'il est difficile de gérer avec des fréquences d' OL fixes ...



**Figure 7 :** Platine expérimentale à diapason . Dans la configuration de base, le signal dont on dispose, e.g. en provenance d'un récepteur à amplification directe à bande passante "relativement large" est injecté en mode symétrique dans le mélangeur . La résistance de 4,7 KΩ (à diminuer en fonction de l'amplitude délivrée par la source et de sa résistance interne), et la capacité shunt de 100 µF évitent de placer le montage précédent en court-circuit sur le plan du continu . Le signal d' OL aura une amplitude crête à crête de l'ordre de 0,2 – 0,5 V . Ce signal ne doit pas être nécessairement sinusoïdal, puisque le premier circuit interne du mélangeur suivant l'entrée OL est un trigger . Le filtre du mélangeur est constituée (S1 et S2 en position haute) d'un diapason piézoélectrique attaqué en mode série (DS), donc présentant une impédance minimale à la résonance . On mesurera donc le courant traversant ce dernier par le biais d'un convertisseur courant – tension ( A1) suivi d'un détecteur de crête A2 dont la constante de temps est proche de la minute accompagné d'un suiveur A3 . La tension disponible à la sortie de A1 est égale à  $I_{DS} \cdot R_{\text{contre réaction}}$  . Il est possible (S1 et S2 en position basse) d'adjoindre un diapason fonctionnant en mode parallèle, en jouant ainsi sur le diviseur d'impédance DP-DS, l'impédance du premier étant maximale à la résonance, tandis que celle du second est minimale . A0 monté en suiveur prémunit contre une dégradation de l'impédance, donc du facteur de qualité de DP . La résistance R en série avec la sortie du suiveur transforme le convertisseur courant - tension A1 en amplificateur de tension .

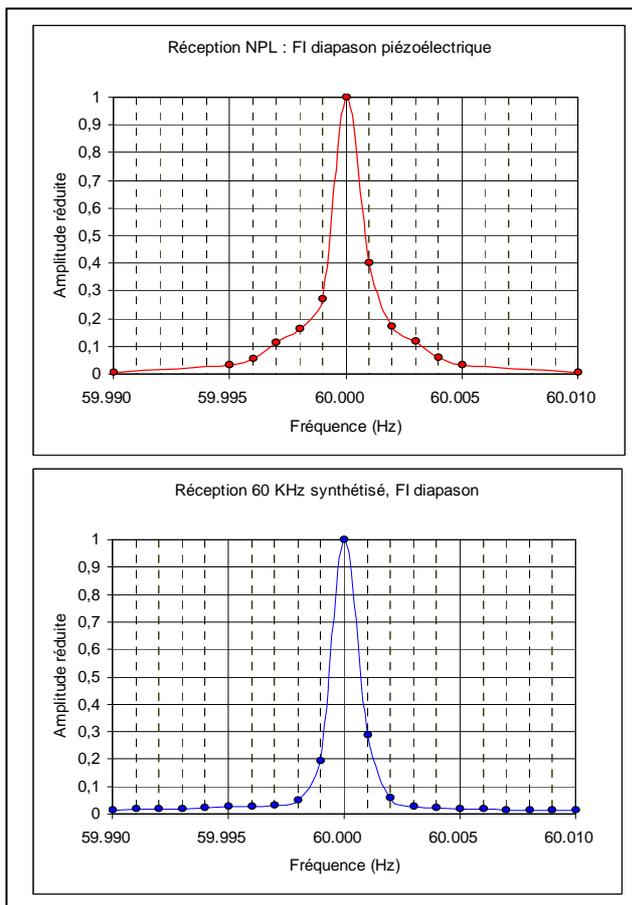
Fréquence d' horloge : 10 MHz			
Emetteur	FOL théorique	Facteur de division	Fréquence raie explorée
Rosnay : 18,3 KHz	14,468 KHz	692 *	18,317 KHz
Anthorn : 19,6 KHz	13,168 KHz	760 *	19,610 KHz
Tavolara : 20,3 KHz	12,468 KHz	802	20,299 KHz
Sainte Assise 20,9 KHz	11,868 KHz	842	20,892 KHz
Rosnay 21,75 KHz	11,018 KHz	908 *	21,755 KHz
Skelton 22,1 KHz	10,668 KHz	938	22,107 KHz
Rosnay 22,6 KHz	10,168 KHz	984 *	22,605 KHz
Ramsloh 23,4 KHz	9,368 KHz	1068 *	23,405 KHz

**Tableau 1 :** facteurs de division en fréquence d' une fréquence d' horloge de 10 MHz et valeurs des raies d' exploration . Tous les facteurs de division qui sont un multiple de 4 autorisent des raccourcis dans les circuits de division qui seraient menés par voie de diviseurs numériques et non pas par µ contrôleur ( premier étage de division par 2 commun) . On pourrait bien entendu sélectionner un mélangeur infradyne attaqué par des gyrateurs . Dans l'optique de l'extraction directe du signal à partir d'un aérien, il faudrait alors impérativement placer un filtre LP dont la fréquence de coupure est située aux environs de 30 KHz afin d'éliminer les fréquences images . De plus, la synthèse numérique de FOL est un peu plus compliquée . Il faut en effet partir d'une fréquence étalon plus élevée pour autoriser un facteur de division suffisamment grand .

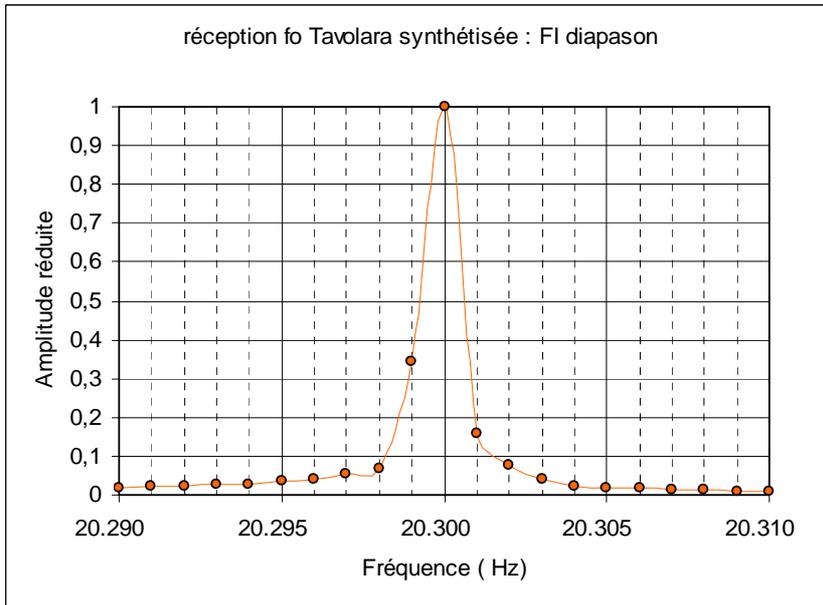
## Mesures

Première constatation : ça fonctionne excessivement bien, mais il est évidemment difficile de vérifier les performances d'un tel changeur de fréquence sur des signaux caractérisés par une occupation du spectre de l'ordre de 50 à 100 Hz . Nous avons donc procédé à un test avec une émission quasiment monochromatique, en l'occurrence la porteuse de NPL qui est le successeur de MSF 60 . Il s'est avéré que la fréquence de l'OL différait de la fréquence théorique de 1 ou 2 Hz . Une plongée profonde dans les manuels d'horlogerie moderne montre que pour l' "horlogerie haut de gamme", outre un tri des diapasons, il existe un ajustage de la fréquence des *calibres à quartz* qui se fait soit par le biais d'un petit trimmer, technologie qui tend à disparaître, soit par programmation correctrice de la chaîne de division électronique de fréquence . Pour la petite histoire horlogère, seules les Rolex, certaines Seiko et la Oméga X33 développée pour la NASA utilisent des quartz triés, vieillis artificiellement et étalonnés dont le coût varie de 100 à 300 € ! Or, notre diapason était du *tout venant* (0,5 €) !

Conclusion : avec une aussi faible bande passante, si on désire monitorer des émissions monochromatiques stables à partir d'une synthèse de  $f_{OL}$  , il faut disposer d'un excellent maître étalon, au minimum thermostaté, si possible verrouillé sur GPS, programmable au dixième de Hertz et disposer d'un diapason "correct" .



**Figure 8 :** Les performances de la FI ne sont guère mesurables que sur un signal quasi monochromatique . Nous avons sélectionné l'émission de NPL, distant de 660 km, en faisant excursionner la fréquence de l'oscillateur local autour de la fréquence théorique  $f_{OL}$  . Malgré la qualité de la réception, on note de temps à autre la présence d'un sphérique qui risque de biaiser quelque peu la mesure des caractéristiques du filtre . Nous avons donc procédé en parallèle à une mesure sur une émission synthétisée localement qui excursionnait autour de la fréquence porteuse de NPL avec une  $f_{OL}$  fixe . Il n'a pas été possible lors de la manipulation d'utiliser un pas de mesure du dixième de Hz . Il faudrait en effet que la synthèse de la porteuse glissante et la synthèse de l'oscillateur local présentent les mêmes dérives . Le coefficient de qualité est de l'ordre de 30 000 . Il faut être conscient que le montage n'a d'utilité que pour la mesure des niveaux de réception . Il n'est pas question de démoduler la porteuse . On peut juste suspecter la présence des impulsions à la seconde de NPL à un très léger affaissement du signal de sortie du mélangeur ... le montage peut cependant présenter de l'intérêt pour les aficionados du PSK . Le mélangeur fonctionne aussi bien en infradyne qu'en supradynne, pour autant que le filtre d'entrée de la chaîne de réception soit performant . Un petit rappel, les maîtres étalons fonctionnent en permanence et il est hors de question de les soumettre à des cycles marche – arrêt du moins, pour les réceptions de signaux quasi monochromatiques .



**Figure 9** : mesure des caractéristiques du filtre pour une fréquence porteuse synthétisée qui excursionsse autour de la fréquence nominale de Tavolara . La bande passante à  $-3\text{dB}$  est de l'ordre de  $1,5\text{ Hz}$  .

### Conclusion

La FI à diapason peut littéralement être considérée comme un microtome fréquentiel .

Très simple à mettre en œuvre, il autorise une étude de détail du spectre VLF alors que le classique waterfall en offre une vue d'ensemble . Il ne se substitue pas à un analyseur de spectre . Il faudrait d'ailleurs plus de 48 heures pour examiner la bande s'étendant de 10 à 100 KHz au rythme d'un échantillon tous les Hertz en tenant compte du temps d'établissement lié au coefficient de qualité du montage . Sa conception en fait un analyseur de choix quand on sait où regarder et sa vocation première est d'autoriser à but géophysique l'enregistrement de niveau d'émissions VLF . Les dérives de fréquence des oscillateurs locaux sont sans effet tant que l'on ne s'intéresse pas à des signaux monochromatiques, cas qui requiert un maître étalon de grande qualité .

Il est probable qu'en utilisant un diapason à fréquence de résonance beaucoup plus basse afin que dans le mélangeur le rapport  $f_{OL} / f_{diapason}$  soit le plus grand possible, on puisse mesurer avec précision l'évolution de la fréquence de la résonance de Schumann à approximativement  $7\text{ Hz}$  .

### Bibliographie

[DEL10] : J.J. Delcourt et L. Lejeune , *Murmures ionosphériques*, Ellipses 2010

[DES 10]: J-B Desmoulins , *CNRS Cachan, Département de Physique, systèmes bouclés* , point d'entrée : [www.phytem.ens-cachan.fr/](http://www.phytem.ens-cachan.fr/)

[FRI 10] : J.-M Friedt, E Carry , *Introduction au diapason à quartz* ,  
Point d'entrée : [jmfriedt.free.fr/02\\_Friedt.pdf](http://jmfriedt.free.fr/02_Friedt.pdf)

[KHA 00] : Khaled Karrai , *Lectures notes on shear and friction force detection with quartz tuning forks* ,  
Ecole thématique du CNRS, La Lande les Maures 2000

[LAR 09] Alain Largeteau , Gérard Demazeau, *Elaboration Hydrothermale de monocristaux*, Centre de ressources Hautes Pressions CNRS CPH Université de Bordeaux , Formation ANG D juin 2009

La photographie de gauche de la figure 4 est issue du site : [www.answers.com/topic/crystal-oscillator](http://www.answers.com/topic/crystal-oscillator)