

Cadre magnétique VLF - LF (F4DXU)

<http://f4dxu.pagesperso-orange.fr/>

Deux options nous sont offertes par la physique pour la réception des ondes électromagnétiques VLF, soit par le champ H (magnétique) soit par le champ E (électrique). Ces deux voies sont radicalement différentes dans leur principe mais elles sont très liées par les lois de l'électromagnétisme. Dans les deux cas le capteur sera une antenne spécialisée en H ou en E. Pour le champ E l'antenne fonctionne à très haute impédance alors que pour le champ H elle fonctionne en courant et donc à très faible impédance. C'est cette deuxième solution qui fera l'objet de cet article mais l'antenne cadre magnétique sera utilisée d'une manière particulière.

Je ne reviendrai pas sur les avantages et les propriétés du cadre magnétique qui sont bien connues (effet antiparasite, directivité) mais je m'attarderai plutôt sur la manière dont il sera utilisé. En général les cadres sont rendus résonnants par adjonction d'une capacité variable à la coupure ce qui permet d'accorder la fréquence de réception. Les coefficients de surtension sont importants (cadre mono-spire) et les potentiels sur les armatures du condensateur aussi, la bande passante quant à elle est étroite. C'est un avantage tant que la bande passante du cadre est du même ordre de grandeur que le débit de flux de données, en numérique, ou que la bande passante du signal à transmettre, en analogique. Le problème se pose pour les VLF (Very Low Frequency, 3KHz à 30 KHz) car le flux de données est lent et en présence d'un système accordé il y a un phénomène de résonance (sustain ou maintien de la note en musique) qui est très gênant pour la réception des signaux numériques à faible débit. On se tournera donc vers un cadre mono-spire non résonnant (amorti), donc à très large bande passante et pour qu'il "travaille" en courant, il sera en court-circuit sur lui même. Il faut maintenant trouver un moyen d'accéder au courant qui circule dans ce cadre en court-circuit. On pourrait utiliser une boucle de couplage mais qui devrait avoir le même diamètre que le cadre pour embrasser le maximum de flux magnétique, ce qui n'est pas très pratique. De plus elle devrait comporter un grand nombre de spires pour convertir une impédance quasi nulle en une impédance adaptée mais tout de même faible comme celle d'un montage amplificateur dit en "base commune" qui pourrait la charger. Le principe retenu sera le suivant, voir figure 1. Le cadre en court-circuit constituera le primaire monopspire d'un transformateur de courant dit aussi élévateur, d'un noyau magnétique et d'un secondaire multispire en fil de Litz pour réduire les pertes ohmiques dues à "l'effet de peau".

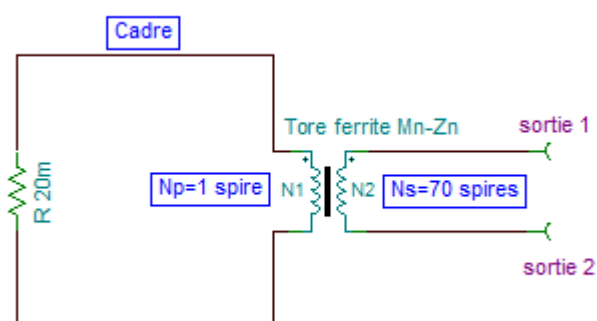


Figure 1

Le noyau du tore est constitué d'un ferrite Mn-Zn (3C90, 3C8, 4C4, etc) qui possède la propriété de fonctionner de quelques Hertz à plus d'un MHz ce qui est grandement suffisant pour l'application en VLF. La limitation en basse fréquence vient aussi de l'inductance du cadre ($\sim 3\mu\text{H}$) en série avec la somme de toutes les résistances (R_{continu} , $R_{\text{alternatif}}$, $R_{\text{rayonnement}}$, R_{charge}) qui constituent un filtre passe haut dont la fréquence de coupure est d'environ 1KHz. Le cadre en cuivre traversera ce tore sur lequel seront bobinées les spires du secondaire de ce transformateur. On remarquera que la résistance du cadre vaut $R_C=10\text{milliohms}$ (calculée), cette valeur dépend grandement de la qualité de sa réalisation, c'est à dire de la qualité des soudures et du diamètre du tube de cuivre utilisé. Plus cette valeur sera petite et plus le cadre fonctionnera en "courant", moins il sera sensible au champ électrique E et donc meilleure sera sa directivité (le nul).

Je lui ai choisi une forme hexagonale car plus facile à réaliser qu'un cercle. Il est constitué de 8 tubes de cuivre de 50 cm de longueur et de 12 cm de diamètre soudés ou brasés entre eux par 8 coudes à 45° . Il faudra évidemment bobiner le secondaire sur le tore ferrite avant de passer le cadre au travers, c'est plus simple !

Le cadre magnétique est maintenant réalisé mais il va falloir le charger correctement par un amplificateur qui doit présenter une faible impédance au secondaire du transformateur. Oui, mais quelle valeur ? Il existe tout de même un moyen de la connaître mais au préalable il est nécessaire de faire quelques rappels sur les équations simples qui régissent le fonctionnement d'un transformateur et notamment sur la transformation des impédances.

$$\frac{Z_p}{Z_s} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 = \frac{N_p^2}{N_s^2} = N^2$$
 avec Z_p et Z_s les impédances au primaire et au secondaire et N_p et N_s le

nombre de spires au primaire et au secondaire, d'où $Z_s = \frac{N_s^2}{N_p^2} \cdot Z_p$. Ceci étant on ne peut pas en

faire grand chose puisque presque tous les paramètres sont inconnus ; presque, car $N_p=1$ ce qui simplifie un peu le système $Z_s = N_s^2 \cdot Z_p$ mais aussi $N_s=100$. En réalité, cette valeur de N_s est issue de nombreuses expérimentations (cf. Réf. 1) et discussions (cf. Réf. 1) sur ce type de cadre chargé par un amplificateur à très faible impédance d'entrée de quelques ohms. Ceci nous permet maintenant de calculer la résistance du primaire qui est de l'ordre du milliohm ! On voit bien que tout est interdépendant et que c'est l'expérimentation qui va permettre de fixer les différents paramètres et de trouver, au final, le meilleur rapport signal sur bruit. Il en ressort que le paramètre le plus facile à modifier sera le nombre de tours du secondaire car garantir une résistance de cadre d'un milliohm n'est pas chose aisée ainsi que la résistance d'entrée de l'amplificateur qui va elle aussi dépendre de la disparité des composants.

La solution que j'ai choisie a été de construire le cadre avec les éléments dont je disposais et de ne bobiner que 70 spires de fil de Litz sur le tore ferrite (pas plus en ma possession).

Les seules "manettes" qui me restent alors sont l'impédance et le gain de l'amplificateur. Plusieurs solutions sont possibles :

- Soit utiliser l'entrée d'une carte son de PC qui a la plus haute impédance, elle sera chargée par une résistance dont la valeur dépendra du transformateur ainsi que du cadre pour garantir le meilleur rapport signal sur bruit et que l'on utilisera conjointement à l'excellent logiciel libre de DL4YHF, Spectrum Laboratory (cf. Réf. 2).

- Soit utiliser une carte d'acquisition (si l'on en possède une) que l'on chargera de la même manière et qui sera utilisée conjointement avec une autre application que l'on créera (C++, LabView, Pascal, etc).

Les deux solutions ont été testées mais je choisis de parler de la seconde car me permettant d'aller plus haut en fréquence d'échantillonnage (240 KHz) donc d'analyser une bande utile de 120 KHz (Shannon) et de dépasser la bande VLF jusqu'à une partie importante de la bande LF.

La figure 2 montre le schéma retenu.

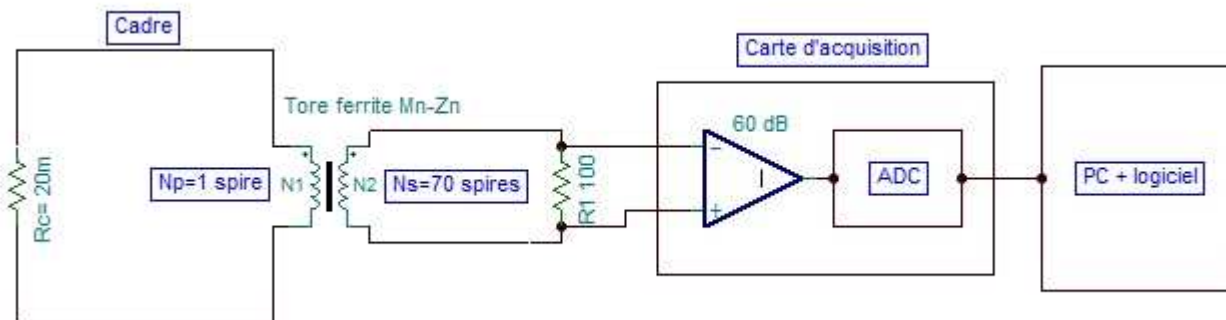


Figure 2

La liaison entre R1 et la carte d'acquisition est assurée par un double câble coaxial RG58 dont les écrans sont référencés à la masse du PC, le cadre quant à lui est flottant. Le gain de cette carte 16 bits a été programmé à son maximum soit 60dB (1000) pour une dynamique d'entrée de + ou - 10mV qui donne une résolution $R = \frac{20mV}{2^{16}} = 305nV$ ce qui est tout à fait honorable. Il ne restait plus qu'à ajuster R1 pour obtenir le meilleur rapport signal sur bruit. Pour ce cadre et ce noyau de ferrite, une valeur aux alentours de 100 ohm semble être le bon compromis, le bruit plancher efficace moyen se situe à -150dB sur le spectre (FFT) de la Figure 3. En remontant la chaîne de réception, le calcul donne une valeur Rc=10milliohms toutes pertes confondues.

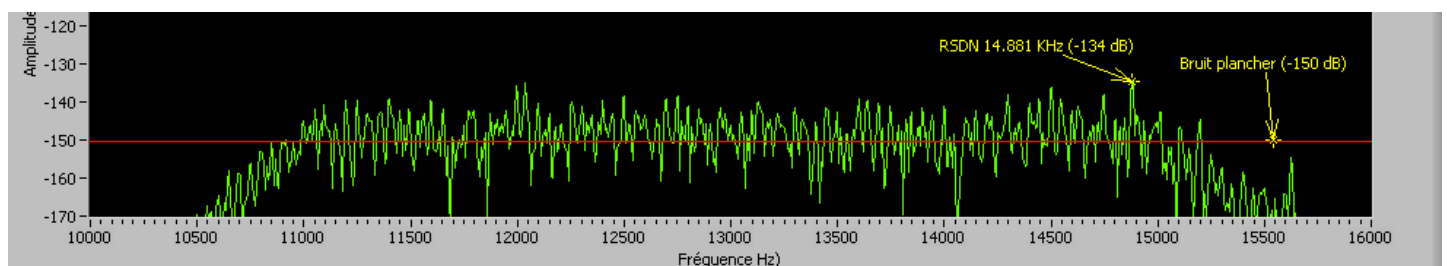


Figure 3

Ce rapport signal sur bruit a été mesuré en comparant le bruit plancher aux signaux de réception des émetteurs de radio navigation hyperbolique Russe RSDN-20 (cf. Réf. 3) . Ces émetteurs, même s'ils sont puissants (plusieurs centaines de kilowatt) se situent à plusieurs milliers de kilomètres de la France et leur réception garantie une chaîne de réception efficace. Ces émetteurs sont reçus entre 15 et 20 dB au dessus du bruit plancher en fonction des conditions de réception et des heures du jour ou de la nuit. Ils se caractérisent par des émissions courtes de 0.4s toutes les 3.6s comme on peut le constater sur le spectre en chute d'eau (waterfall) de la figure 4.

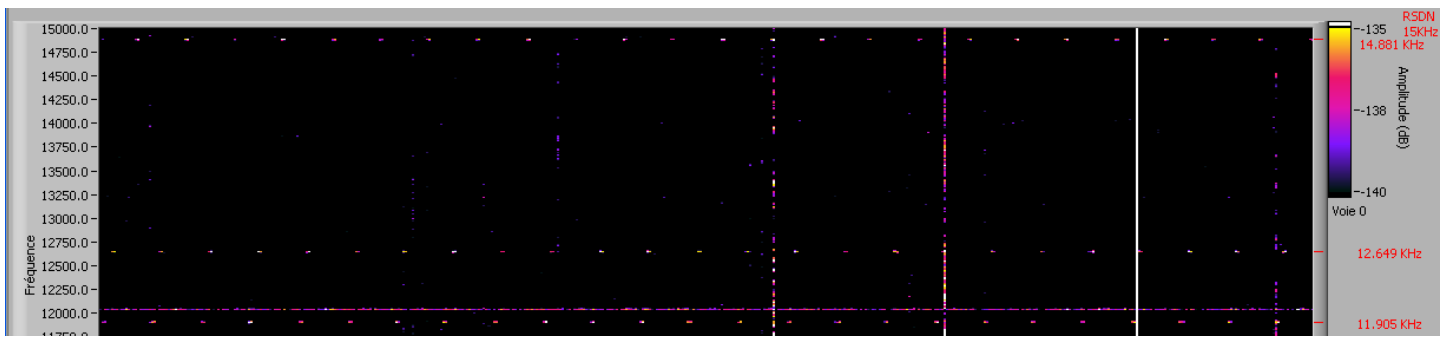


Figure 4

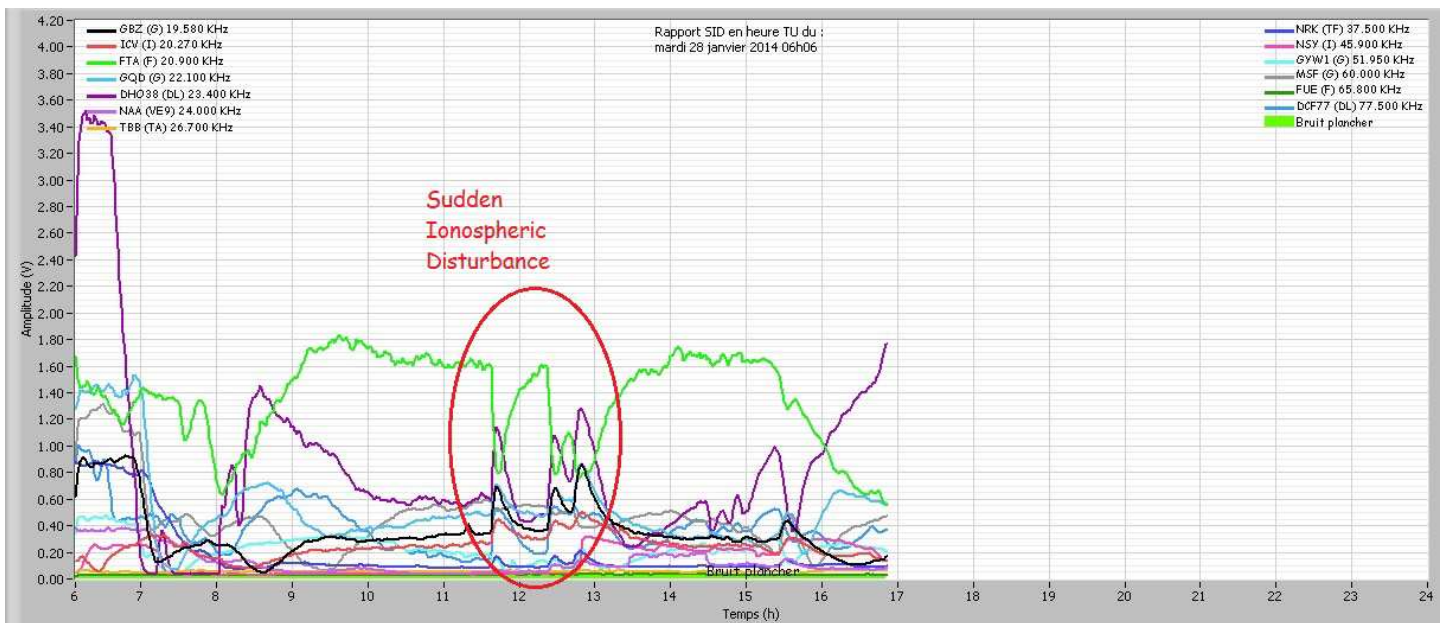
La figure 5 est un gros plan sur le transformateur. La reprise de masse servira à rendre équipotentiel l'écran en cuivre qui enveloppera le transformateur et le protégera du champ électrique local. On veillera à ce que l'écran ne soit en contact avec le cadre que d'un seul côté pour ne pas court-circuiter le transformateur. Ce dernier est bloqué par une surépaisseur de gaine thermo-rétractable. La résistance R1 sera soudée directement sur les sorties du transformateur. Si le cadre va à l'extérieur il faudra prévoir l'étanchéité du transformateur et des connexions. Ce cadre peut présenter une certaine dissymétrie due à son environnement et devenir sensible au champ électrique, sa directivité (le nul) en sera affectée. Il sera alors possible de le blinder en prévoyant une coupure pour éviter de le court-circuiter.



Figure 5

Voilà, la station est prête pour la réception, l'observation, la mesure des signaux VLF et plus, parmi lesquels on trouve les signaux radioélectriques naturels issus des orages (tweeks, sferics, whistlers), les émissions deux fois par an au moins de la "vielle dame" SAQ (cf. Réf. 4) sur 17.2 KHz en morse, une multitude d'émetteurs VLF permettant l'étude des SID (cf. Réf. 5) (Sudden Ionospheric Disturbances) liée à l'activité solaire et ses effets sur la couche D, les stations de communication avec les sous-marins (HWU et autres (cf. Réf. 6)), les références de temps comme DCF77.

La capture d'écran ci-dessous montre la signature de plusieurs SID consécutifs. On peut constater les effets constructifs ou destructifs sur l'amplitude des signaux. Ils sont liés à la position des émetteurs par rapport à la station de réception, à l'efficacité de la réflexion de la couche D et donc au final aux interférences entre l'onde de ciel et l'onde de sol.



Bonnes écoutes et mesures, Jean-Marc, F4DXU
Février 2014

Bibliographie :

- Techniques de l'ingénieur
- ¹ Discussions sur 6m avec les opérateurs des stations F6GEX et F1AFJ
- ² Spectrum Laboratory : <http://www.qsl.net/d4yhf/spectra1.html>
- ³ RSDN-20 : <http://sidstation.loudet.org/vlf-fr.xhtml>
[http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_\(navigation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_(navigation))
<http://www.vlf.it/alpha/alpha.htm>
- ⁴ SAQ : <http://alexander.n.se/in-english/saq-transmission/>
- ⁵ SID : <http://sidstation.loudet.org/home-fr.xhtml>
- ⁶ HWU et autres : <http://sidstation.loudet.org/stations-list-fr.xhtml>
http://fr.wikipedia.org/wiki/Très_basse_fréquence