

François CALLIAS HB9BLF CH-2046 Fontaines <u>Tél.:</u> 032 853 70 43	Antennes LOOP ondes courtes ; formules de calcul et application à une antenne de réception.	No. : TM051110 Page : 1 sur 26 Date : 5/4/2006
--	--	--

Distribution : SUNE

Index de révision	Date	Description des changements	Pages concernées
V1.0	5/4/2006	Version initiale	toutes

Table des matières.

1. Introduction
2. Formules de calcul pour le bilan de transmission en espace libre
3. Antenne LOOP utilisée en émission ; Impédances
4. Facteur de bruit d'une antenne ondes courtes
5. Antenne LOOP pour la réception ; réalisation passive
6. Antenne LOOP active à large bande pour la réception
7. Conclusions

Annexe : références bibliographiques

1. Introduction.

L'objet de ce mémo est de traiter le sujet des antennes « boucles » (ou LOOP en anglais) utilisées en ondes courtes. Le but est de concevoir une antenne valable pour la réception des bandes basses 40M-80M-160M qui soit la plus simple possible.

- Les équations pour calculer le bilan de transmission d'un système d'antennes sont données au §2 ; L'antenne dite isotrope est définie. La formule pour calculer la puissance reçue en espace libre en fonction des antennes utilisées et de la puissance émise est décrite.
- Les équations pour le calcul des impédances et du rendement d'une antenne LOOP pour l'émission sont données au §3. Le « monstre » réalisé par I3VHF est cité en exemple.
- Le bruit en ondes courtes reçu par une antenne omnidirectionnelle placée près du sol est décrit au §4.
- Au §5 est donné un exemple de calcul d'une antenne LOOP pour la réception des bandes basses amateurs. La solution choisie est fonction du facteur de bruit du récepteur et de la taille de la LOOP acceptée.
- Finalement la réalisation d'une antenne de réception LOOP large bande avec préampli incorporé est décrite au §6.

Des fichiers « excel » sont annexés à ce document. Ils permettent un calcul automatique des paramètres électriques d'une LOOP.

2. Formules de calcul pour le bilan de transmission en espace libre.

On considère tout d’abord un émetteur équipé d’une antenne à rayonnement isotrope, c’est à dire une antenne qui émet avec la même intensité dans toutes les directions. Soit une sphère de rayon D centrée sur l’antenne d’émission (fig1) ; en n’importe quel point de cette sphère, le champ électromagnétique mesuré aura la même intensité [Références : 1, 4].

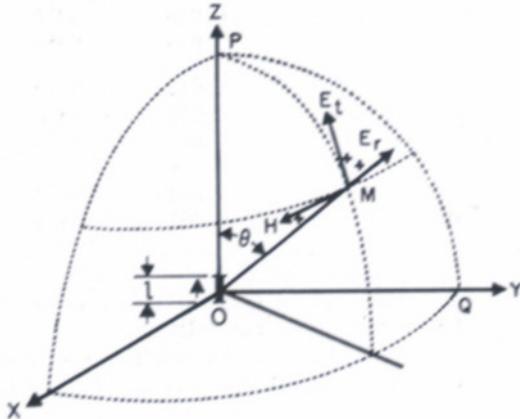


Fig. 1 :

Source RF ponctuelle au centre et antenne de réception placée en un point quelconque à distance D.

La surface de la sphère valant $S = 4 \cdot \pi \cdot D^2$, la puissance reçue par unité de surface vaut en n’importe quel point de la sphère :

$$\frac{\Delta P_{RX}}{\Delta S} = \frac{P_{TX}}{4 \cdot \pi \cdot D^2} = |\vec{E}| \times |\vec{H}| = \frac{E^2(D)}{377\Omega} \quad (2.1)$$

- P_{TX} = puissance rayonnée par le TX $[P_{TX}] = \text{Watts}$
- D = distance entre l’antenne d’émission et le récepteur $[D] = \text{mètres}$
- E = champ électrique produit à distance D. $[E] = \text{Volts / mètre}$

Cette équation est valable dans le « champ lointain » (far field), c’est à dire à une distance suffisante de l’antenne d’émission. Dans le cas d’une antenne qui a un gain faible, comme l’antenne dipôle, la distance limite vaut $D_{LIM} = \lambda / 2$ (Remarque : la distance limite D_{LIM} augmente avec le gain de l’antenne). A partir de D_{LIM} , les champs E (électrique) et H (magnétique) produits par l’antenne sont perpendiculaires l’un par rapport à l’autre et liés par l’équation suivante :

$$\frac{E}{H} = Z_0 = 120 \cdot \pi = 377\Omega \quad (2.2)$$

- E = champ électrique $[E] = \text{Volts / mètre}$
- H = champ magnétique $[H] = \text{Ampères / mètre}$
- $Z_0 = 377\Omega$ est l’impédance du vide $[Z_0] = \text{Ohms}$

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

Depuis l'équation (2.1) on peut déduire la valeur du champ E produit à distance $D \geq D_{LIM}$ par une antenne :

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{TX}}}{D} \quad (2.3)$$

On peut associer à toute antenne de réception une surface équivalente de captage. La surface équivalente de captage d'une antenne isotrope, vaut par définition :

$$S = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.4)$$

- S = surface équivalente d'une antenne isotrope $[S] = m^2$
- $\lambda = \frac{c}{f}$ = Longueur d'onde $[\lambda] = \text{mètres}$
- $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ = vitesse de la lumière f = fréquence $[f] = \text{Herz} = 1/\text{sec}$

La surface équivalente de captage d'une antenne dipôle vaut :

$$S_{DIPOLE} = 1,64 \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} = G_{P_DIPOLE} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.5)$$

Le gain en puissance de l'antenne dipôle vaut $G_{P_DIPOLE} = 1,64$, ce qui donne en décibels :

$$G_{DIPOLE} = 10 \cdot \text{Log}(1,64) = 2,15 \text{ dBi} \quad (2.6)$$

Et finalement, la puissance reçue par une antenne en espace libre (c à d sans effet de sol et sans obstacles entre les 2 antennes) vaut en combinant les équations (2.1) et (2.4) et en introduisant le gain des antennes d'émission et de réception :

$$P_{RX} = \frac{\Delta P_{TX}}{\Delta S} \cdot S_{RX} = P_{TX} \cdot G_{P_TX} \cdot G_{P_RX} \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot D} \right)^2 \quad (2.7)$$

- G_{P_TX} = gain de puissance de l'antenne d'émission (sans dimension)
- G_{P_RX} = gain de puissance de l'antenne de réception (sans dimension)

Commentaire : au commencement il y avait...L'antenne dipôle. Comme évoqué plus haut, l'antenne isotrope est une antenne théorique qui a un gain de puissance valant 1 dans toutes les directions d'émissions. En fait l'antenne isotrope a été définie à partir de l'antenne dipôle, qui a été utilisée pour les premières mesures de transmission. Une antenne verticale n'est pas isotrope. Elle rayonne de façon égale dans le plan horizontal mais pas ou très peu vers le haut.

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

Utilisant (2.1), (2.3) et (2.7), on peut exprimer le champ E produit à distance D par l'antenne d'émission et la puissance reçue par l'antenne de réception en fonction du champ E incident :

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{TX} \cdot G_{P_TX}}}{D} \quad (2.8)$$

$$P_{RX} = \frac{1}{120} \cdot G_{P_RX} \cdot \left(\frac{\lambda}{2\pi} \cdot E \right)^2 \quad (2.9)$$

Les formules données permettent le calcul d'un bilan de transmission en espace libre. Cela signifie que les antennes sont loin du sol et qu'il n'y a aucun obstacle entre ou au voisinage des antennes qui pourrait atténuer le signal ou servir de réflecteur passif. De telles conditions idéales sont très rares dans la pratique...

Exemple numérique.

On considère 2 stations opérant en contest sur la bande 144MHz, une au Chasseron, 1600m d'altitude et l'autre au Mont-Tendre, même hauteur. On considère que les montagnes plus basses entre-deux ne perturbent pas la zone dite de Fresnel entre les 2 STN, donc que les équation citées plus haut pour le cas « espace libre » sont valables.

Les 2 STN ont des équipements identiques :

- Puissance $P_{TX} = 1000W$
- Antenne 2x15él type DL6WU, gain = 19,2dBi
- Perte du câble coaxial : -1,5dB sur chaque antenne

Les paramètres sont :

- $P_{TX} = 1000W$
- $G_{P_TX} = G_{P_RX} = 10^{(19,2-1,5)/10} = 59$ (antennes + câbles)
- Distance $D = 33100m$
- $f = 144MHz \rightarrow \lambda = 2,08m$

Lorsque les 2 antennes sont tournées de façon optimales, la puissance reçue par le pauvre récepteur serait selon l'équation (2.7) :

$$P_{RX} = 1000 \cdot 59 \cdot 59 \cdot \left(\frac{2,08}{4 \cdot \pi \cdot 33100} \right)^2 = 87 \cdot 10^{-6}W = 87\mu W \quad (-10,6dBm)$$

Le niveau de signal est 130dB au dessus du bruit thermique ($U_{NOISE} = -140dBm$ pour une largeur de bande SSB de $B = 2,7kHz$). Il faut un **très bon** RX pour supporter un signal pareil ! Et la propriété des TX étant celle qu'elle est... Par chance, le relief entre ces 2 sommets occulte partiellement la zone de Fresnel, ce qui fait que la puissance reçue sera heureusement inférieure à ce calcul (6-10dB de moins, je pense).

Pour le fun, le champ produit à l'antenne de réception vaut (2.8) : $E = 40mV / m$

3. Antenne LOOP utilisée en émission ; impédances.

Une antenne LOOP utilisée pour émission et réception est en général formée d'une boucle d'un gros tube d'aluminium ou de cuivre munie d'un condensateur d'accord en haut, réglé à l'aide d'un petit moteur. Le CV doit être du type papillon (split-stator) ; La boucle est connectée aux 2 stators qui sont fixes ; cela évite les pertes qui seraient dues au contact « frotteur » sur le rotor central.

Le couplage à cette antenne se fait habituellement de façon inductive, à l'aide d'une boucle de diamètre 5 fois plus petit, placée à l'intérieur et en bas de la LOOP. On règle le réglage du SWR en variant le couplage entre les 2 boucles.

Les équations pour l'impédance, les courants et les tensions en jeu dans une antenne LOOP sont données ci-après. Le fichier excel joint « TX_LOOP_1MHz_to_10MHz.xls » permet un calcul automatique de l'antenne LOOP de votre choix. Il suffit de donner le diamètre de la boucle et le diamètre du tube conducteur utilisé ; il vous calculera tous les paramètres utiles entre 1MHz et 10MHz dans 2 tableaux : un pour le cas du tube de cuivre et un pour le cas d'un tube d'aluminium.

L'impédance électrique d'une antenne LOOP est constituée d'une inductance en série avec 2 résistances, une résistance de « rayonnement » et une résistance de pertes. Le composant inductif domine largement dans le cas de boucles de dimensions petites par rapport à la longueur d'onde. On compense la partie inductive par une capacité CA qui résonne avec LA sur la fréquence désirée. Voir la fig. 2.

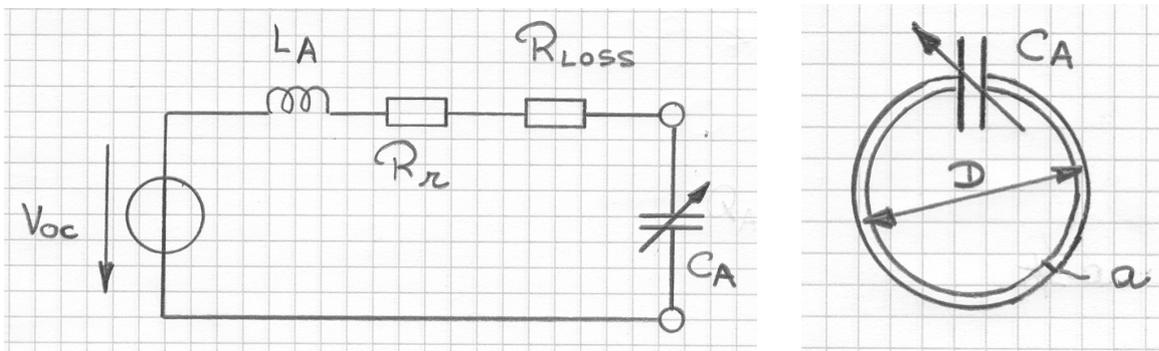


Fig. 2: Schéma équivalent d'une antenne LOOP pour l'émission.

L'inductance d'une antenne LOOP de forme circulaire dépend de son diamètre D et du diamètre du tube a (Réf. [1, 4 et 5])

$$L_A = \frac{\mu \cdot D}{2} \cdot N^2 \cdot \ln\left(\frac{D}{a}\right) \quad [L_A] = \text{Henry} \quad (3.1)$$

- $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ est la perméabilité magnétique de l'air ou du vide
- $a =$ diamètre du tube ; $D =$ diamètre de la boucle. $[D, a] = \text{mètres}$
- $N =$ nombre de spires de la boucle. En général $N = 1$

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

La résistance de rayonnement dépend de la surface de la boucle et de la fréquence (Réf. [1, 4 et 5]) :

$$R_R = \frac{Z_0}{6\pi} \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \cdot N^2 \cdot A^2 = 197 \cdot N^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda}\right)^4 \quad (3.2)$$

- $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \cdot \pi = 377 \Omega$ est l'impédance du vide (ou de l'air)
- $\epsilon_0 = 8,842 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ est la permittivité du vide (ou de l'air)

Une antenne LOOP faite pour l'émission a en général une seule spire ($N = 1$).

L'effet pelliculaire.

Les courants hautes fréquences circulent à la surface des conducteurs. La résistance en HF d'un fil dépend de la conductivité du métal, de la fréquence et de la perméabilité magnétique. L'amplitude du courant HF est maximale à la surface du conducteur, puis elle décroît au fur et à mesure lorsque l'on pénètre dans le conducteur, en suivant la relation :

$$I(x) = I_{SURFACE} \cdot \exp(-x/\delta)$$

- $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}$ est la profondeur de pénétration $[\delta] = m$ (3.3)
- $\sigma =$ conductivité du métal $[\sigma] = 1/\Omega m$

La conductivité de l'aluminium vaut $\sigma = 35 \cdot 10^6 [1/\Omega m]$. L'aluminium n'est pas magnétique, donc $\mu = \mu_0$. Si $f = 7 \text{ MHz}$, la profondeur de pénétration vaut $\delta = 32 \mu m$. L'épaisseur minimale d'un tube conducteur utilisé sur 7MHz devra être au moins :
 $T \geq 4 \cdot 6 \cdot \delta = 0,12 \cdot 0,20 \text{ mm}$

La résistance HF d'un tube rond de longueur $L = \pi \cdot D$ et de diamètre a vaut :

$$R_{HF}(f) = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{\pi \cdot a \cdot \delta} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{D}{a \cdot \delta} = R_{LOSS} \quad (3.4)$$

On fait en sorte de rendre le rapport R_{LOSS} / R_R le plus faible possible de façon à maximiser le rendement à l'émission qui vaut :

$$\eta = \frac{R_R}{R_R + R_{LOSS}} \quad (3.5)$$

Remarque : Dans le cas d'une antenne de réception, maximiser R_R n'est pas vraiment important. R_R est souvent bien plus petit que la résistance de pertes R_{LOSS} .

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

La résistance totale en série dans le circuit de la figure 2 vaut alors $R_S = R_R + R_{LOSS}$, et le facteur de qualité du circuit résonnant formé par l'antenne LOOP vaut :

$$Q = \frac{2\pi f \cdot L_A}{R_S} \quad (3.6)$$

Il est toujours intéressant de connaître la valeur de crête de la tension HF qui apparaîtra aux bornes du CV. Soit P_{TX} la puissance HF de sortie du TX : L'amplitude du courant qui circule dans la boucle vaut :

$$\hat{I}_{LOOP} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{TX}}{R_S}} \quad (3.7)$$

Et la tension aux bornes du CV : $\hat{U}(C_A) = \hat{I}_{LOOP} \cdot X(L_A) = \hat{I}_{LOOP} \cdot 2\pi f \cdot L_A$ (3.8)

Exemple de calcul pour une antenne LOOP de 2 mètres de diamètre.

Antenne LOOP de diamètre $D = 2m$, utilisée sur $f = 7MHz$ ($\lambda = 42,86m$), réalisée avec un tube d'aluminium de diamètre $a = 25mm$ ($N = 1$ spire). On obtient :

- $L_A = 5,51\mu H \rightarrow X(L_A) = 2\pi f \cdot L_A = 242\Omega$
- La valeur nécessaire du CV d'accord sera $C_A = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot L_A} = 93,8pF$
- $R_R = 91m\Omega$ $R_{LOSS} = 71m\Omega$

La résistance totale vaut $R_S = R_R + R_{LOSS} = 162m\Omega$ et le rendement à l'émission sera $\eta = R_R / R_S = 52\%$: si la puissance du TX vaut 100 watts, 56 watts seront rayonnés, le reste servant à chauffer la boucle, à condition que la connexion entre le CV d'accord et la LOOP n'ajoutent pas de résistances de pertes supplémentaires...

Avec un TX fournissant 100 watts, la valeur de crête du courant circulant dans la boucle sera :

$$\hat{I}_{LOOP} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{TX}}{R_S}} = 35A$$

Et la tension de crête aux bornes du CV vaudra : $\hat{U}(C_A) = 37A \cdot 242\Omega \approx 8500V$

Les graphiques des pages suivantes donnent les résultats de calculs sur la plage de fréquences 1-10MHz, pour la LOOP susmentionnée ($D = 2m$ et $a = 25mm$, aluminium). Ils sont tirés du fichier de calcul « TX_LOOP_1MHz_to_10MHz.xls ». Ils suffit de changer les paramètres dans ce fichier pour obtenir les résultats avec la LOOP de votre envie...

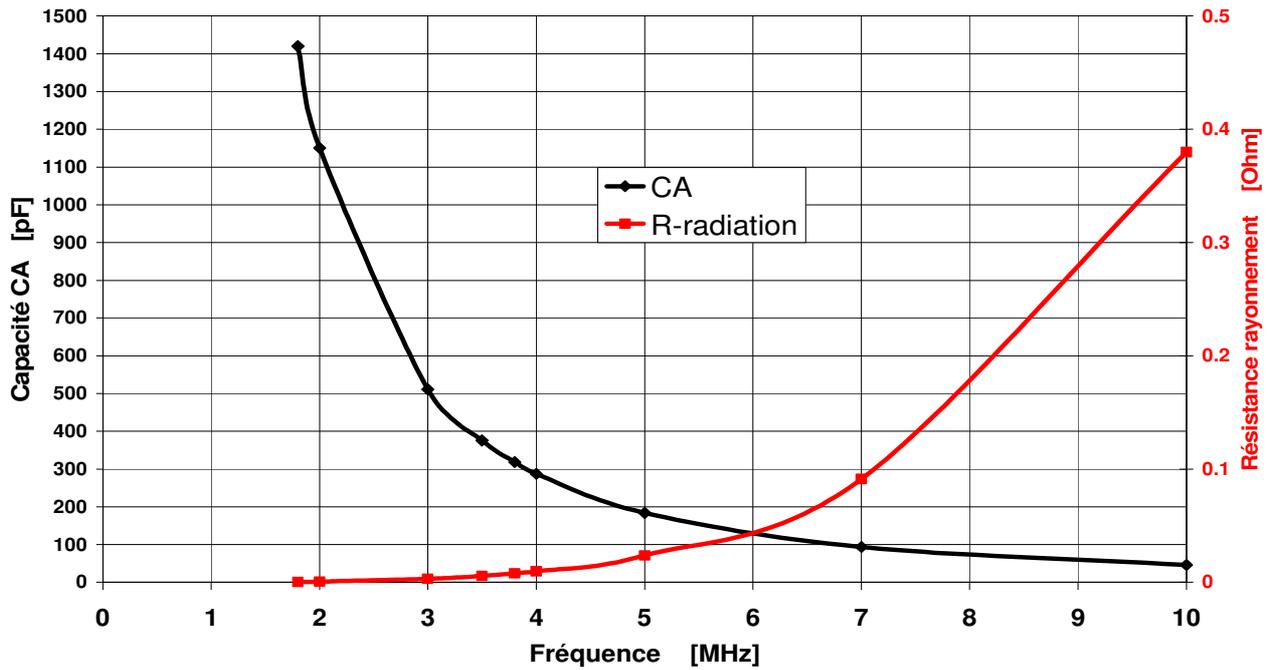


Fig. 3 : Valeur du CV d'accord (CA) et de la résistance de rayonnement en fonction de la fréquence.

On voit que la valeur de la résistance de rayonnement est faible ; elle atteint à peine 0,1Ω à 7MHz. Pour couvrir les bandes 160, 40 et 30 mètres, la plage de réglage nécessaire pour CA va de 50pF à 1500pF.

Les valeurs de ces résistances ainsi que le facteur Q de la boucle sont donnés à la fig. 4. Le facteur Q est maximal vers 4MHz, puis il décroît lorsque la résistance de rayonnement augmente avec la fréquence.

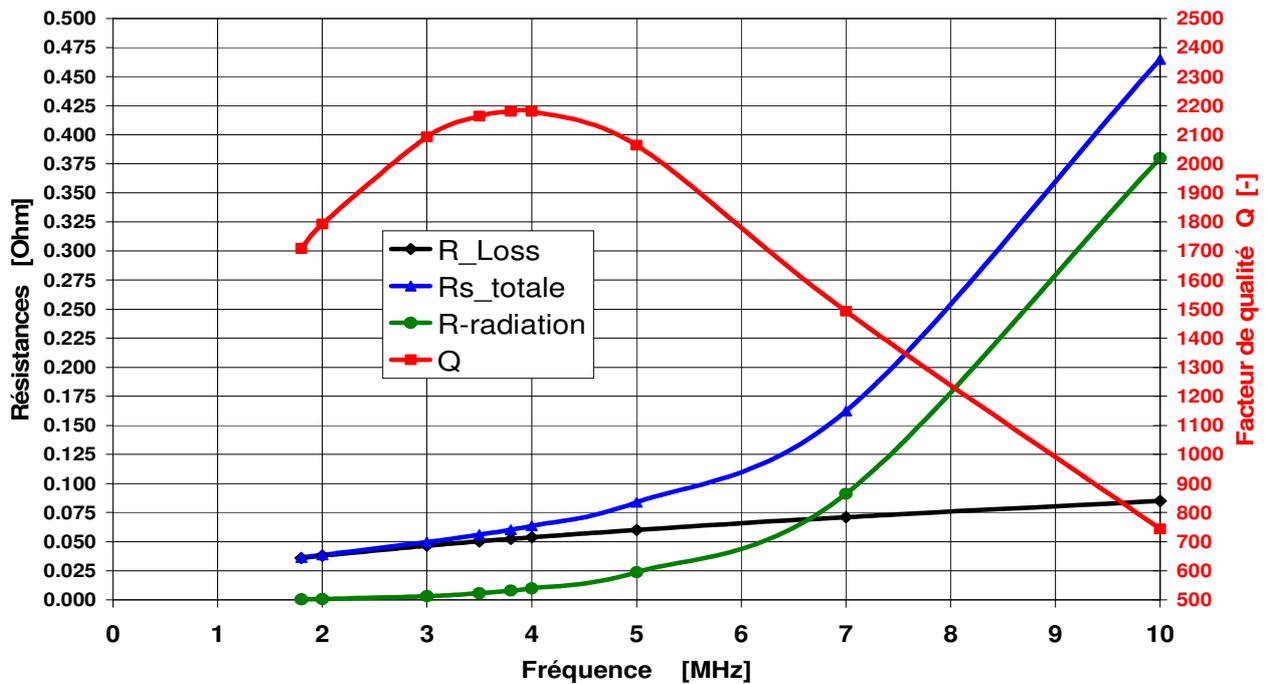


Fig. 4 : Valeur des différentes résistances et du facteur de qualité entre 1 et 10MHz.

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

Le rendement maximal possible en émission dépend du rapport entre la résistance de rayonnement et la résistance de pertes (voir la fig.4). On voit qu'il est acceptable à partir de 7MHz (56%), mais que sur la bande des 80 mètres, il n'est que de 10%, et sur 160 mètres, il est autour de 1% !

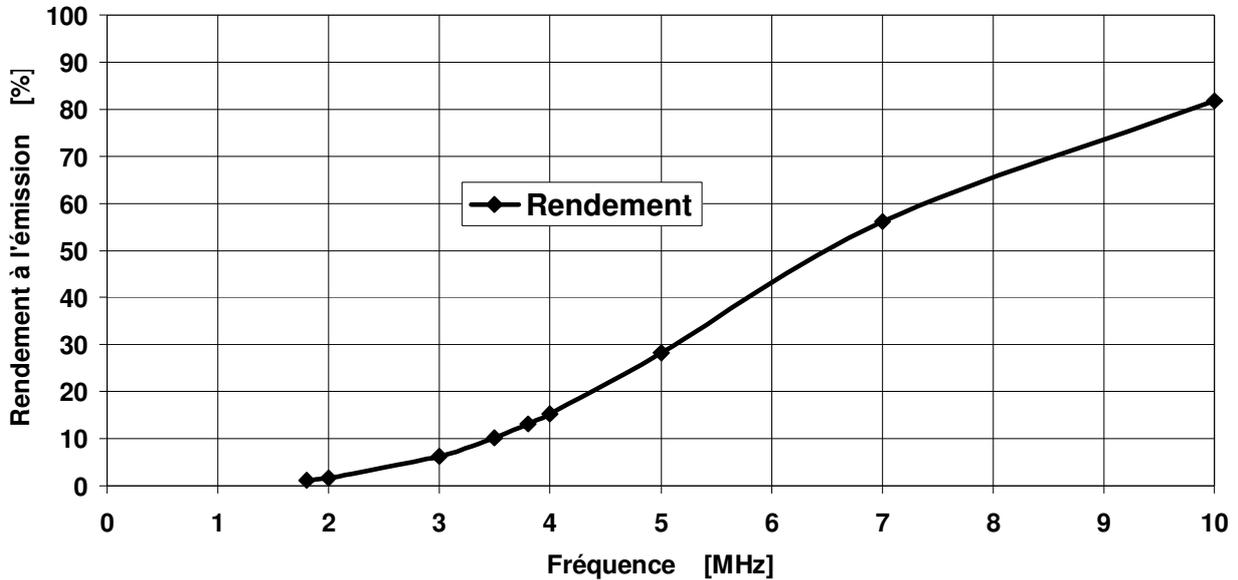


Fig. 5 : Rendement maximal en fonction de la fréquence.

La puissance envoyée par le TX dans l'antenne est absorbée par la résistance de rayonnement et la résistance de pertes. Comme leurs valeurs sont faibles, le courant est élevé ! La valeur de ce courant multiplié par l'impédance inductive qui est très grande par rapport à la résistance produit une très haute tension sur le CV d'accord (CA)

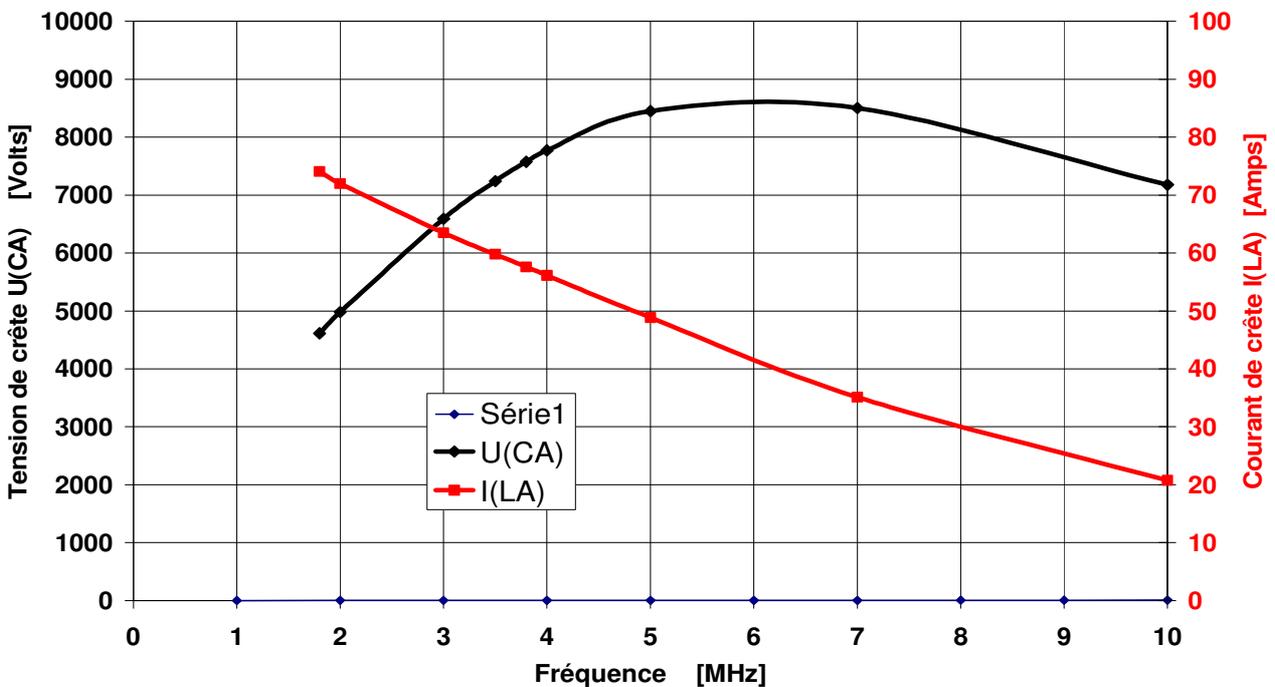
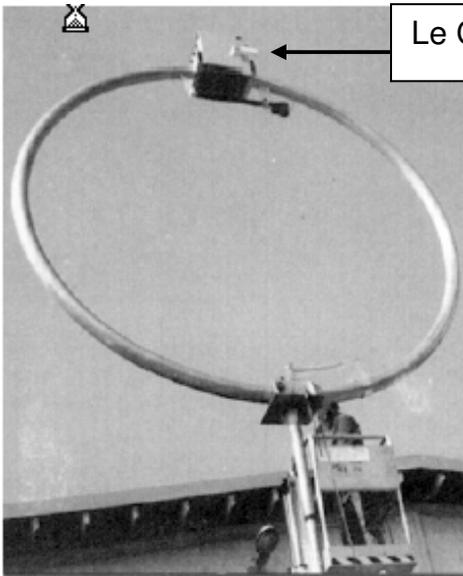


Fig. 6 : Tension de crête aux bornes du CV et courant de crête dans la boucle.

Le « Monstre » réalisé par I3VHF.

Les photos trouvée sur le site sont éloquentes...



Le CV de réglage... (si, si)



Le CV d'accord avec son constructeur

Fig. 7 : L'antenne LOOP

Cette antenne à un diamètre de 4 mètres. Elle est réalisée avec un tube d'aluminium de diamètre 140mm et de paroi 5mm. Elle pèse 80Kg. Elle peut être réglée entre 1,75MHz et 7,3MHz avec un $SWR \leq 1,5$. Elle supporte une puissance $P_{TX} = 1000W \dots 2000W$ sans problème d'éclatement HT au niveau du CV.

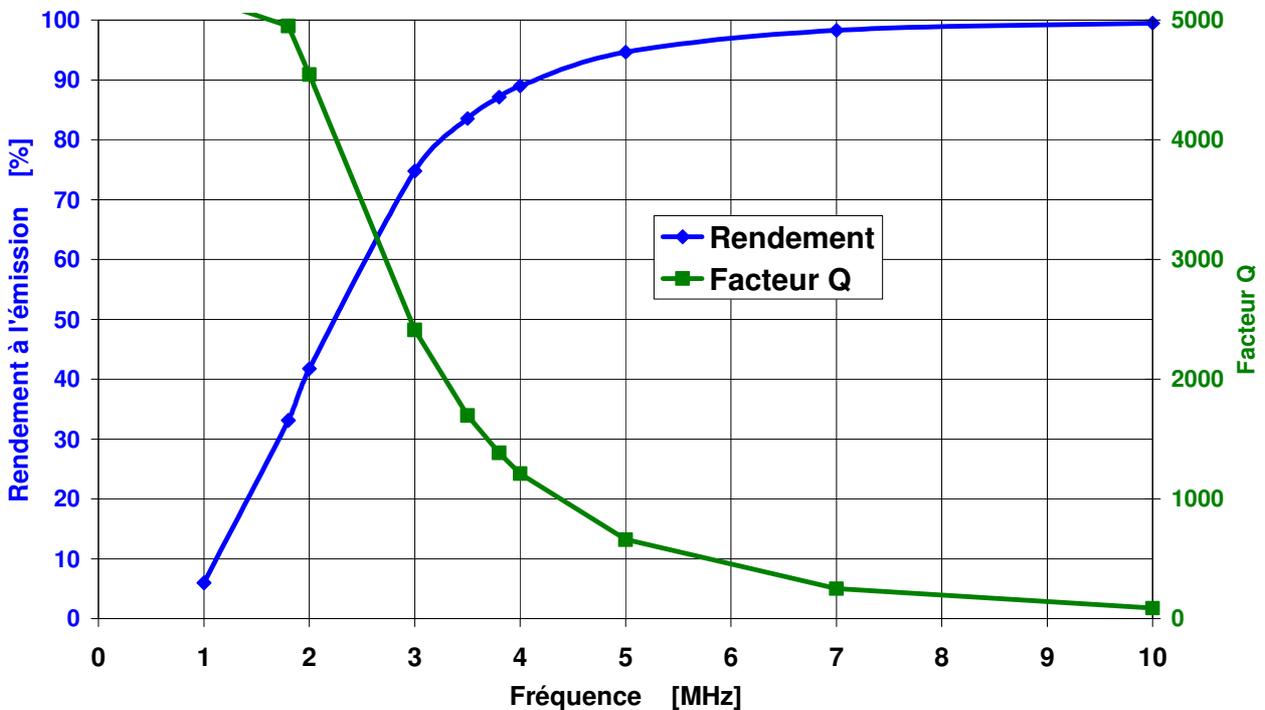


Fig. 8 : Rendement et facteur de qualité.

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

On voit sur la figure 8 que le rendement de cette antenne à l'émission est excellent sur 3,5MHz et 7MHz. Sur la bande 160 mètres (1,8MHz), il vaut encore 33%.

Si l'on envoie 1KW dans cette antenne, le courant dans la boucle vaut 320 ampères sur 1,8MHz (!). Sur 3,5MHz et 7MHz, on a « seulement » 130A et 40A respectivement. La tension aux bornes du CV culmine à 31KV sur la bande 160M. Plus bas en fréquence, la résistance de pertes limite l'augmentation du facteur Q et de la tension (à $F = 1,8\text{MHz}$, $R_{LOSS} = 13\text{m}\Omega$ $R_R = 6,4\text{m}\Omega$).

Une autre remarque importante concerne la **largeur de bande** de cette antenne. La largeur de bande à -3dB vaut $\Delta f_{-3dB} = f_{RF} / Q$. Le tableau ci-dessus donne pour les 3 bandes amateurs la largeur de bande et le mode utilisable, SSB ou CW. On voit que le facteur de qualité très élevé interdira l'utilisation du mode phonie SSB sur 160 mètres !

Fréquence f_{RF}	Facteur de qualité Q	Largeur de bande de transmission	Remarques
1,8MHz	5000	360Hz	Utilisable en CW uniquement
3,6MHz	1700	2100Hz	Utilisable aussi en SSB, mais limite...
7MHz	300	23kHz	Utilisable sans problème en SSB

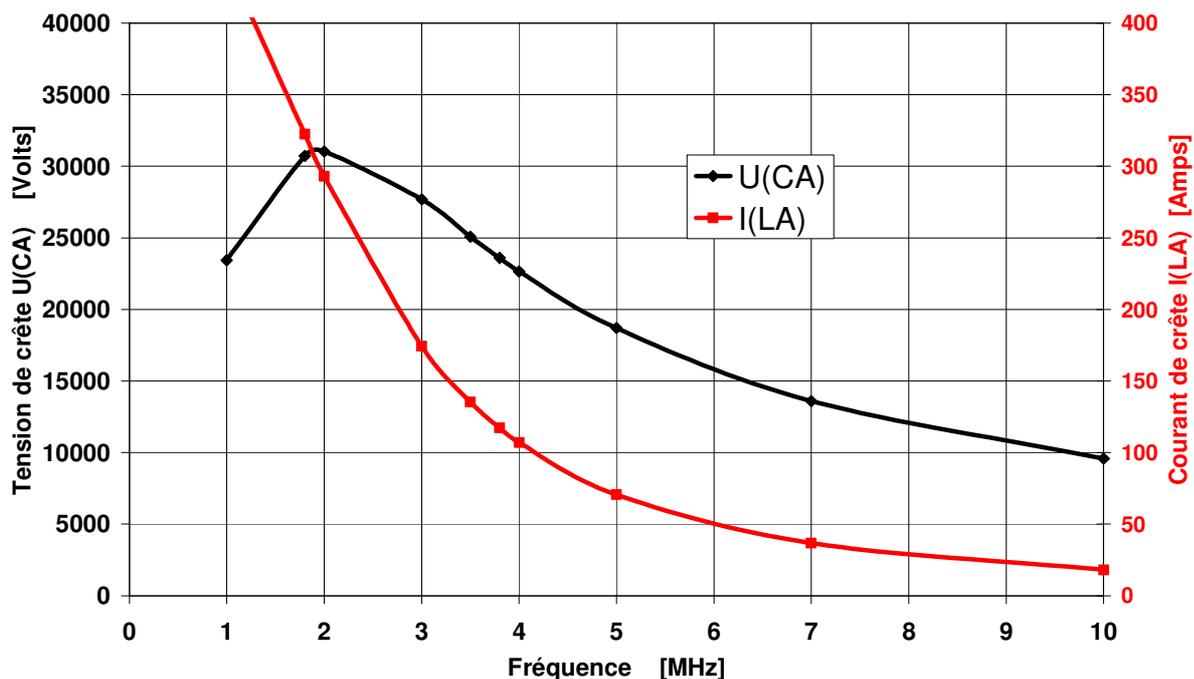


Fig. 9 : Courant dans la LOOP et tension aux bornes du CV si P=1KW.

L'inductance vaut $L_A = 8,43\mu\text{A}$. La valeur du CV vaut $C_A = 928\text{pF}$ à 1,8MHz, et $C_A = 61\text{pF}$ à 7MHz. On voit à la fig. 7 que cette antenne n'a pas été montée au ras du sol, mais bel et bien dégagée et en hauteur sur un pylône ! Une belle réalisation, qui a nécessité un bon nombre d'heures de travail. Félicitations pour les concepteurs de cette belle mécanique !

4. Facteur de bruit d'une antenne ondes courtes.

Avant d'aborder le design d'une antenne LOOP pour la réception uniquement, il est nécessaire de savoir qu'elle sera la performance de captage demandée. Celle-ci dépend du bruit du récepteur et du niveau de bruit capté par l'antenne elle-même. Ce dernier est l'objet de ce chapitre.

Les antennes reçoivent du bruit. L'amplitude du bruit reçu est variable en fonction de la fréquence, de l'endroit où on se trouve et de la saison [Réf. 1].

- Le bruit galactique provient de l'espace. Il provient du soleil, et d'un grand nombre de sources ponctuelles distribuées le long du plan galactique. Il affecte les fréquences entre 15MHz et 10GHz, étant limité en bas du spectre par l'absorption ionosphérique et en haut par l'absorption due à l'atmosphère. Le bruit galactique domine à partir de 20-30MHz.
- Le bruit atmosphérique est produit principalement par des décharges électriques dans l'atmosphère lors d'orages. Ce bruit se propage comme les autres ondes radio, car il y a toujours des orages quelque part. Le niveau de ce bruit dépend de la fréquence, de l'heure du jour, de la saison et de la météo. Il est particulièrement fort durant la saison des pluies dans des zones telles que les Caraïbes, l'Afrique équatoriale, le nord de l'Inde etc. Il est plus faible dans les zones tempérées. C'est le bruit naturel dominant aux basses fréquences (10MHz et en dessous). Voir les figures 10 et 11.
- Le bruit qui provient de l'activité humaine est très variable dans le temps. Des valeurs moyennes de ce bruit ont été mesurées à différents endroits : zone industrielle, résidentielle, rurale normale ou rurale très calme... Voir les graphes tirés de [6] aux figures 12 et 13. Ce sont des valeurs moyennes ; les valeurs de pointe peuvent être bien plus élevées...

En ondes courtes, le niveau du bruit capté par une antenne située près du sol est en général bien supérieur au bruit du récepteur radio lui-même.

Les niveaux de bruits reçus par les antennes ondes courtes ont été mesurés depuis longtemps. On les trouve dans la littérature technique, mais malheureusement l'interprétation de ces données n'est pas chose aisée. Le bruit reçu par une antenne peut être défini de 2 façons :

- Par le facteur de bruit NF relatif au niveau du bruit thermique. Il est défini pour une antenne verticale (Réf. [1 et 6]) placée au-dessus d'un plan conducteur. Comme la surface de captation d'une telle antenne augmente avec le carré de la longueur d'onde ($S_{ISO} = \lambda^2 / 4\pi$), le facteur de bruit augmente lorsque la fréquence diminue.
- Il peut aussi être défini par le champ électrique équivalent de bruit E_{NOISE} (Réf. [6]). Je préfère cette définition qui est indépendante de l'antenne.

Le bruit atmosphérique domine sur les bandes 160m, 40m et 30m. Les figures 10 et 11 donnent l'intensité du champ électrique de bruit E_{NOISE} en décibels relatifs à $E=1\mu\text{V/m}$ pour une largeur de bande du récepteur (SSB) de 2,7kHz. *Les valeurs données aux graphiques suivants seront utilisées pour dimensionner une antenne LOOP réceptrice.*

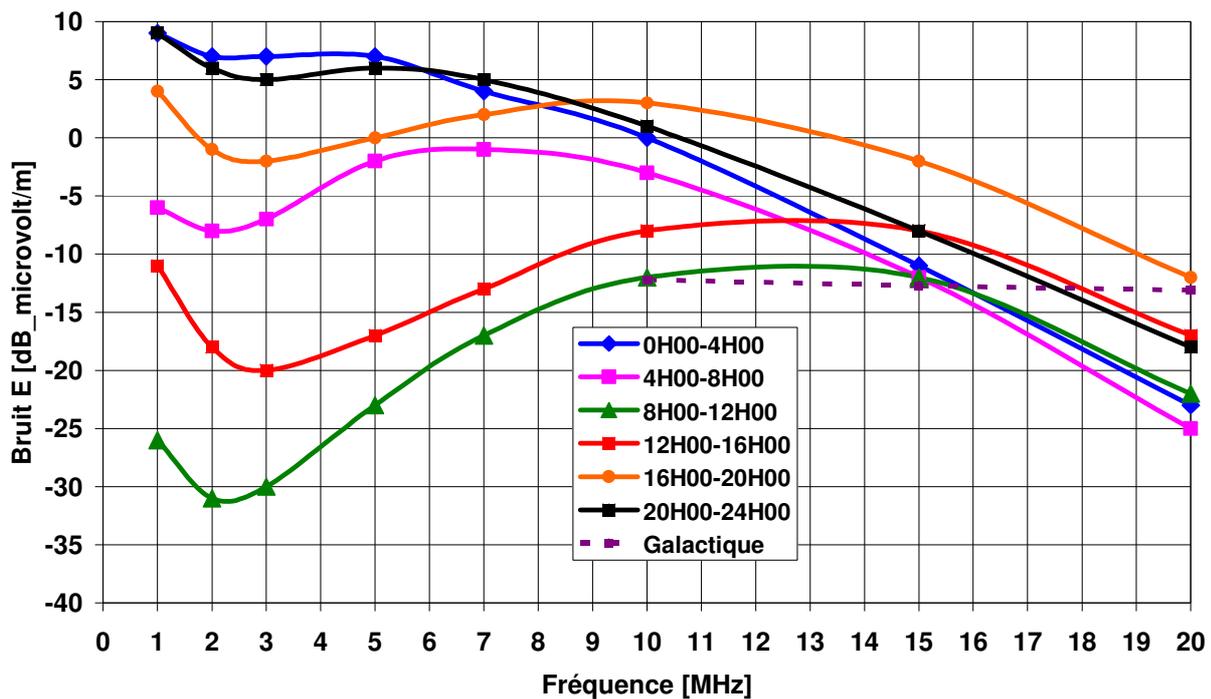


Fig. 10 : Niveau de bruit atmosphérique en été, à différentes tranches horaires.

Note : Champ électrique E_{NOISE} près du sol ; largeur de bande RX $B = 2,7kHz$;
 $E = 1\mu V / m \approx 0dB$

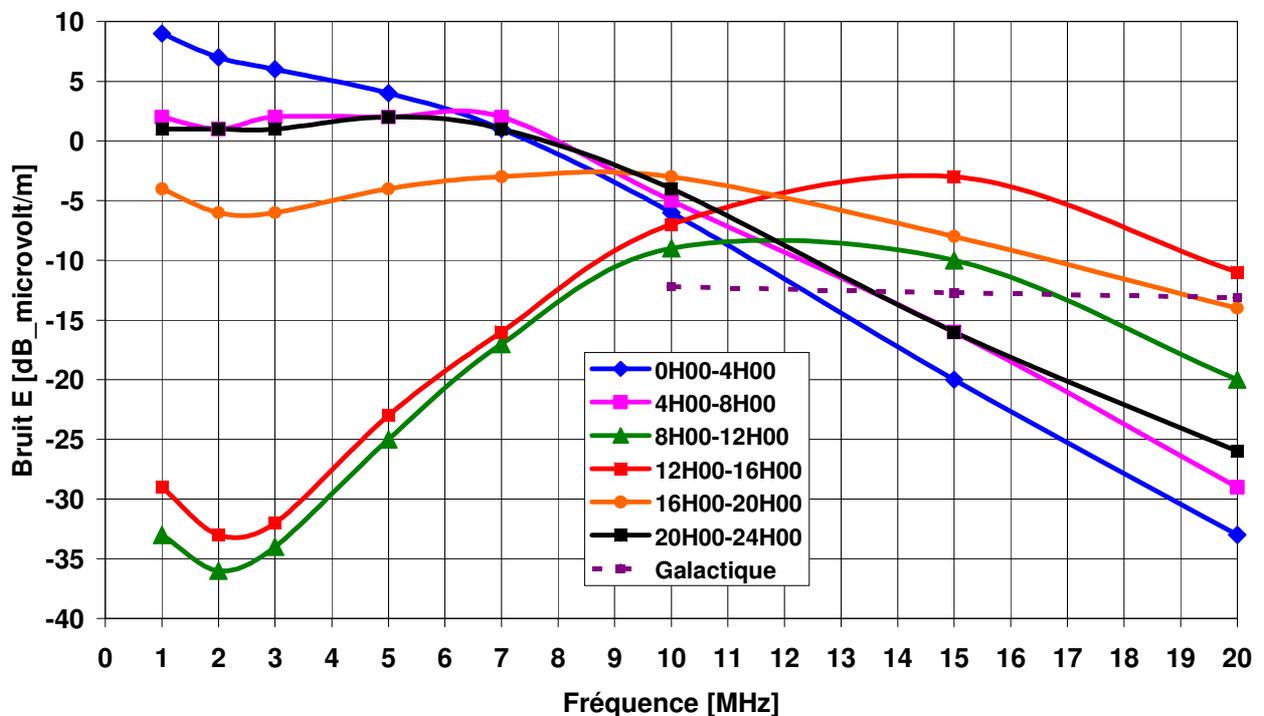


Fig. 11 : Niveau de bruit atmosphérique en hiver.

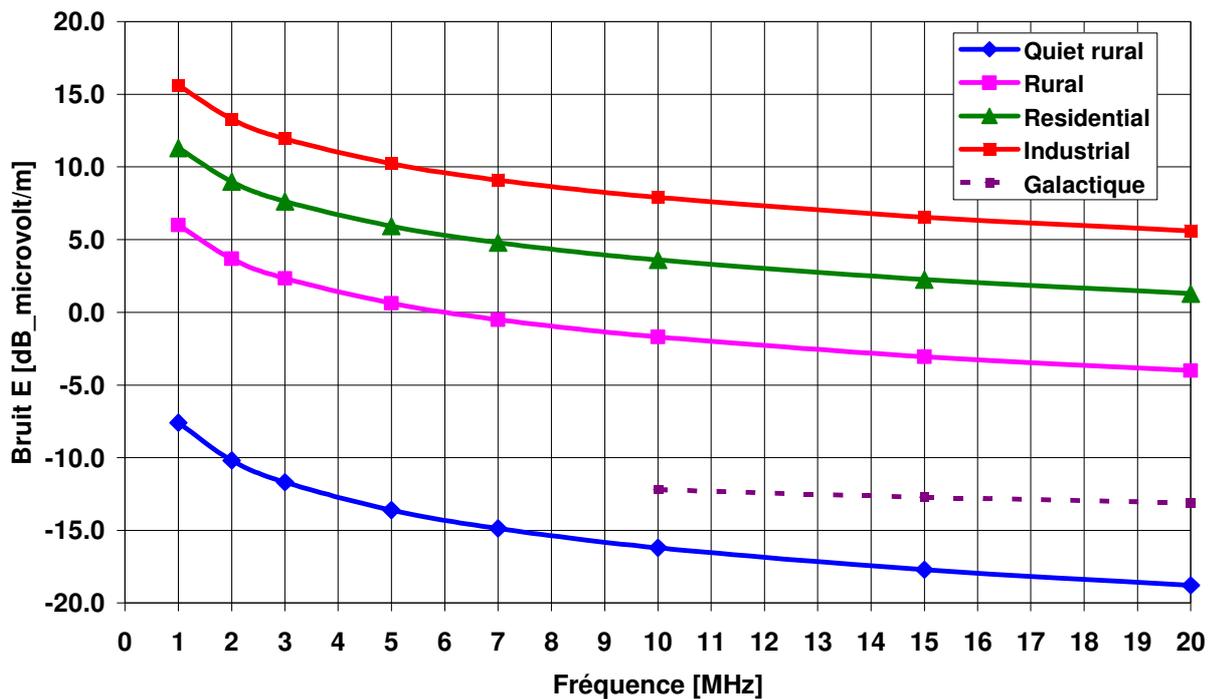


Fig. 12 : Niveaux des bruits produits par l'activité humaine, à différents endroits.
(Champ électrique E_{NOISE} près du sol, relatif à $1\mu V/m$)

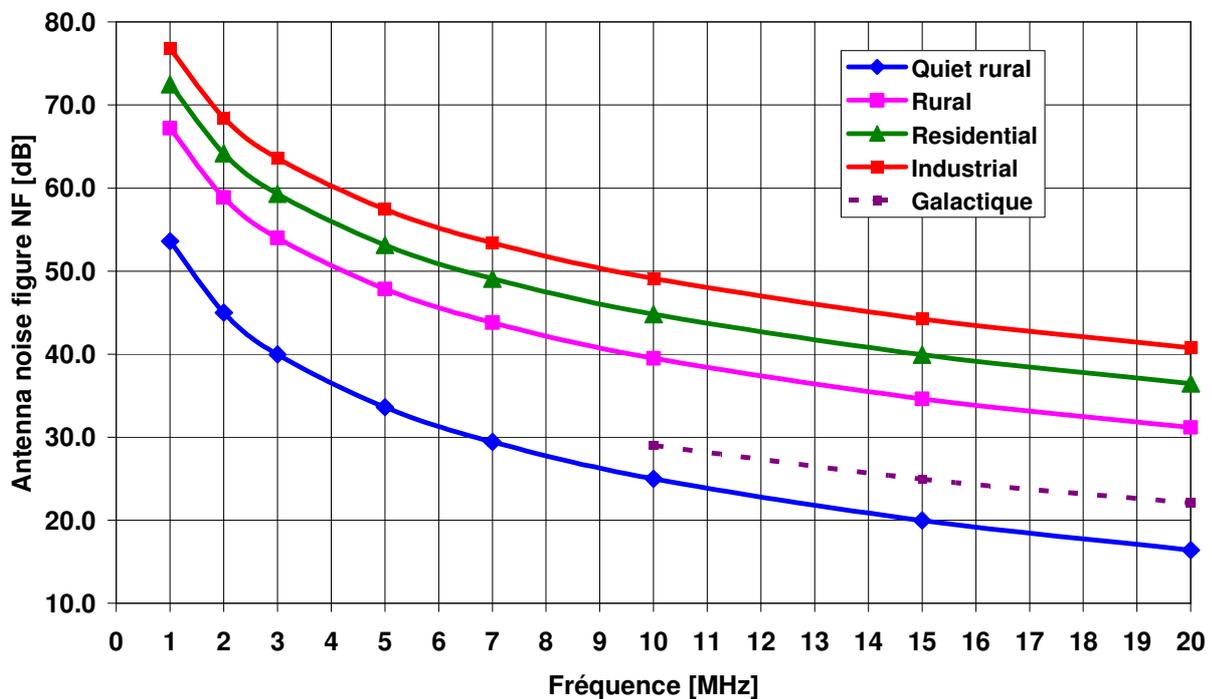


Fig. 13 : Facteurs de bruit NF d'une antenne omni directionnelle produits par l'activité humaine en différents endroits (bruit atmosphérique non inclus).

5. Antenne LOOP pour la réception ; réalisation passive.

La fig. 14 montre une antenne boucle placée dans un champ EM incident. Les équations données ci-après sont valables sous condition que la dimension de la boucle soit petite par rapport la longueur d'onde de l'onde EM incidente.

La tension produite aux bornes de la boucle par le champ EM vaut:

$$V_{oc} = j\omega N A B^i \cos \psi_i \sin \theta_i \quad (5.1)$$

- $\omega = 2\pi f$ f = fréquence
- N = nombre de tours
- $A = \pi \cdot r^2$ surface de la boucle

(5.1) peut être réécrit plus simplement:

$$V_{oc} = j\omega N A B_z^i \quad (5.2)$$

- B_z^i = composante du vecteur \vec{B}^i le long de l'axe z.

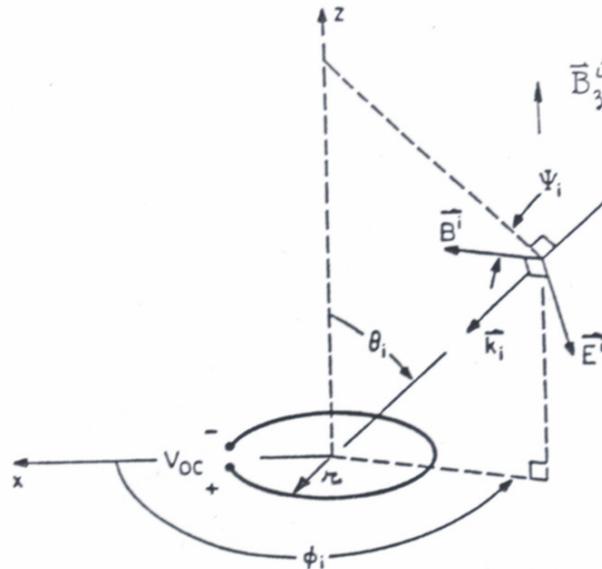


Fig. 14 : Petite antenne LOOP dans un champ électromagnétique incident.

Le signal reçu est maximal si le vecteur du champ électrique incident E est parallèle au plan XY de la boucle, ou ce qui revient au même, lorsque le champ magnétique est perpendiculaire à la boucle.

Dans l'air ou dans le vide, et à distance suffisante (champ lointain) d'une antenne d'émission, la valeur des champs B et E produits par un émetteur sont liés par l'équation suivante :

$$|B| = \frac{|E|}{c} \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s est la vitesse de la lumière}$$

On peut alors réécrire (5.2) comme :

$$V_{oc} = \frac{2\pi f}{c} \cdot A \cdot N \cdot E = \frac{\pi^2 \cdot D^2}{2\lambda} \cdot N \cdot E \quad (5.3)$$

- $D = 2r$ = diamètre de la boucle $[D] = \text{mètres}$
- $\lambda = c/f$ = longueur d'onde $[\lambda] = \text{mètres}$
- E = intensité du champ électrique incident $[E] = \text{Volts / mètres}$
- N = nombre de spires de la boucle

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

On voit que la tension induite V_{oc} est proportionnelle à la fréquence. Comme on l'a vu au §3, l'impédance de la LOOP est inductive avec en série une résistance faible de valeur $R_S = R_R + R_{LOSS} \approx R_{LOSS}$ (car en général $R_{LOSS} \gg R_R$).

On peut transformer le circuit série $V_{oc} - L_A$ en un circuit parallèle $I_{oc} // L_A$ avec :

$$I_{oc} = \frac{V_{oc}}{X(L_A)} = \frac{2\pi f \cdot A \cdot N}{c \cdot 2\pi f \cdot L_A} \cdot E = \frac{A \cdot N}{c \cdot L_A} \cdot E \quad (5.4)$$

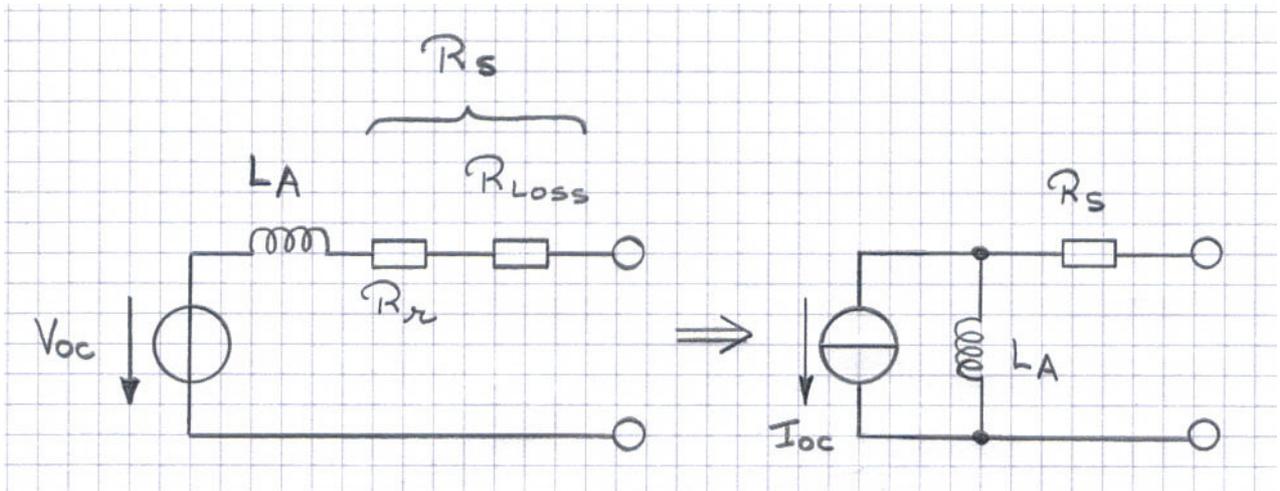


Fig. 15 : Transformation circuit série → circuit parallèle.

Une propriété intéressante de la formule (5.4) est que le courant de court-circuit I_{oc} est indépendant de la fréquence. Le facteur N au numérateur de l'équation suggérerait que I_{oc} augmente lorsque N augmente ; c'est l'inverse qui se produit, car L_A au dénominateur augmente avec N^2 ...

On fait résonner cette LOOP sur la fréquence à recevoir avec un condensateur parallèle C_A (fig. 16). On peut transformer le circuit avec résistance série R_S en un circuit équivalent avec une résistance en parallèle R_P . Comme le facteur de qualité est très élevé, on obtient :

$$R_P = (1 + Q_0^2) \cdot R_S, \quad \text{avec } Q_0 = 2\pi f \cdot L_A / R_S \quad (5.5)$$

La valeur de la résistance parallèle R_P est en général très haute.

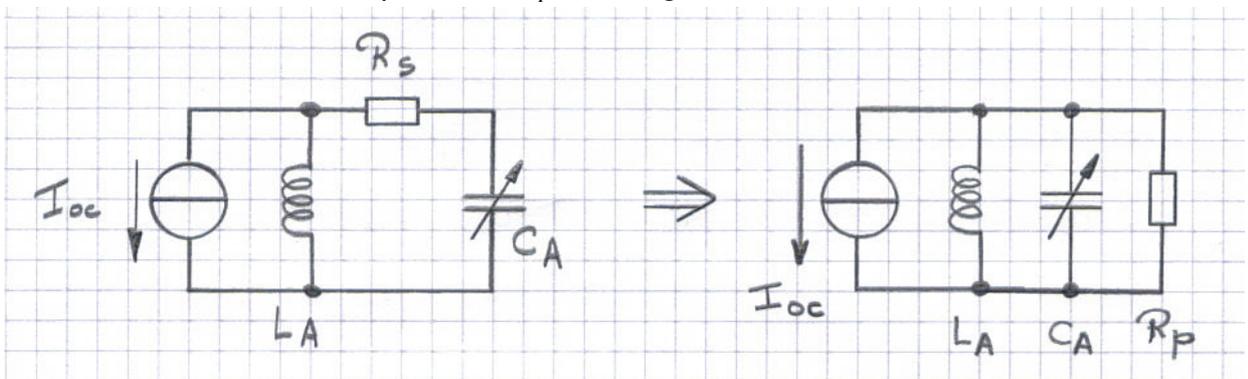
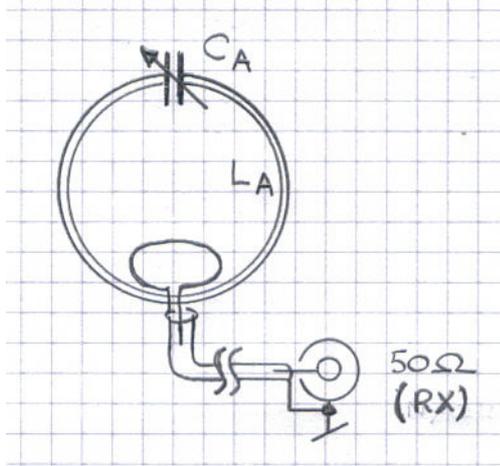


Fig. 16 : Schéma équivalent avec résistance parallèle R_P

Formules de calcul et application à une antenne de réception.



Il faut maintenant extraire le signal reçu par cette antenne LOOP réceptrice. La méthode classique est d'utiliser un couplage inductif comme à l'émission (fig. 17).

- Un couplage optimum (pas trop fort) permet d'extraire le maximum d'énergie.
- Un couplage plus « serré » que l'optimum amorti la boucle en réduisant son gain, sa sélectivité et son facteur de qualité. On peut se le permettre pour la réception en ondes courtes car le bruit reçu par l'antenne est nettement plus fort que le bruit thermique (voir §4).

Fig. 17 : LOOP avec circuit de couplage.

Le couplage au récepteur est symbolisé par un transformateur ; il transforme la résistance d'entrée du récepteur (50Ω) en une résistance équivalente ($R_L = K^2 \cdot 50\Omega$) en parallèle sur la LOOP. A la fréquence de résonance, tout le courant I_{OC} se répartit entre R_L et R_p . Le gain de l'antenne est maximal si l'on ajuste le couplage K tel que : $R_L = R_p$

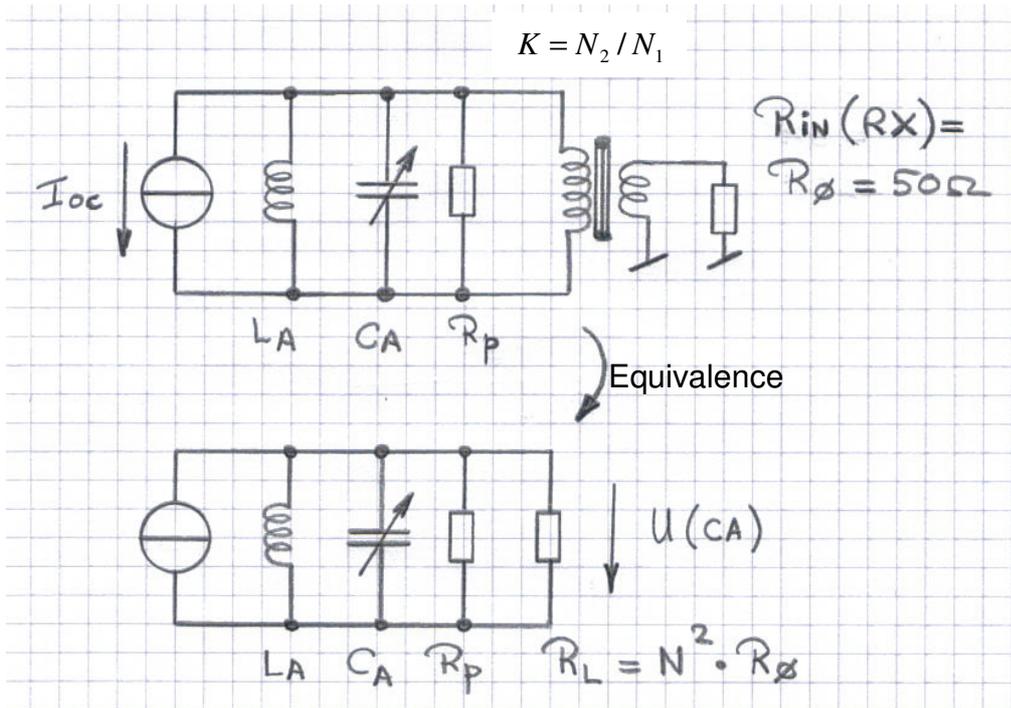


Fig. 18 : Schéma équivalent de l'antenne avec circuit de couplage au récepteur.

La tension résultante sur C_A vaudra : $U(C_A) = I_{OC} \cdot \frac{R_p \cdot R_L}{R_p + R_L}$

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

La puissance délivrée par l'antenne au récepteur vaudra :

$$P_{RX} = \frac{U(C_A)^2}{R_L} = \left(\frac{A \cdot N}{c \cdot L_A} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_L} \right)^2 \cdot R_L \cdot E^2 \quad (5.6)$$

On peut calculer le gain isotrope de la LOOP à partir des équations (9) et (23) :

$$G(LOOP) = 120 \cdot R_L \cdot \left(\frac{A \cdot N}{c \cdot L_A} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_L} \right)^2 \quad [dBi] \quad (5.7)$$

Si les impédances sont adaptées, c à d $R_L = R_p$ (power-match, comme pour une antenne utilisée en émission), on obtient le maximum de gain et de transfert de puissance au récepteur :

$$P_{RX_OPT} = \frac{U(C_A)^2}{R_L} = \left(\frac{A \cdot N}{2 \cdot c \cdot L_A} \right)^2 \cdot R_p \cdot E^2 \quad (5.8)$$

Et le gain « iso » vaut :

$$G_{OPT}(LOOP) = 30 \cdot R_L \cdot \left(\frac{A \cdot N}{c \cdot L_A} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \quad [dBi] \quad (5.9)$$

Tous ces calculs sont faits automatiquement dans le fichier « **RX_LOOP_passive.xls** »

Les paramètres électriques suivants sont calculés pour une LOOP en aluminium, à partir de son diamètre, du diamètre du tube utilisé et du couplage de sortie :

- inductance L_A , résistance série R_s , résistance équivalente parallèle R_p .
- Niveau de sortie P_{RX} dans un champ $E = 1\mu V/m$, gain isotrope et facteur de qualité en charge entre 1MHz et 10MHz.

Exemple de calcul d'une antenne LOOP de réception pour les bandes 160m – 30m.

Antenne LOOP de diamètre $D = 2m$, réalisée avec une spire (N=1) de tube d'aluminium de diamètre $a = 10mm$. On obtient :

- $L_A = 6,66\mu H$, $A = 3,14m^2$, $C_A = 38pF(f = 10MHz) \dots 1200pF(f = 1,8MHz)$

Si l'on couple cette LOOP au récepteur à travers un transformateur de rapport 10/1, la résistance de charge sera $R_L = 50\Omega \cdot 10^2 = 5K\Omega$.

La [fig.19](#) donne le niveau du signal délivré au récepteur lorsque l'antenne est placée dans un champ EM incident d'amplitude $E = 1\mu V/m$, ainsi que le facteur de qualité en fonction de la fréquence ; il est bien entendu que le niveau du signal calculé est valable si la LOOP est accordée sur la fréquence à recevoir !

On voit que le niveau de sortie est très constant entre 1MHz et 10MHz, et que le facteur de qualité n'est pas très élevé, ce qui est en fait assez pratique et évitera de devoir régler le CV à tout bout de champ...

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

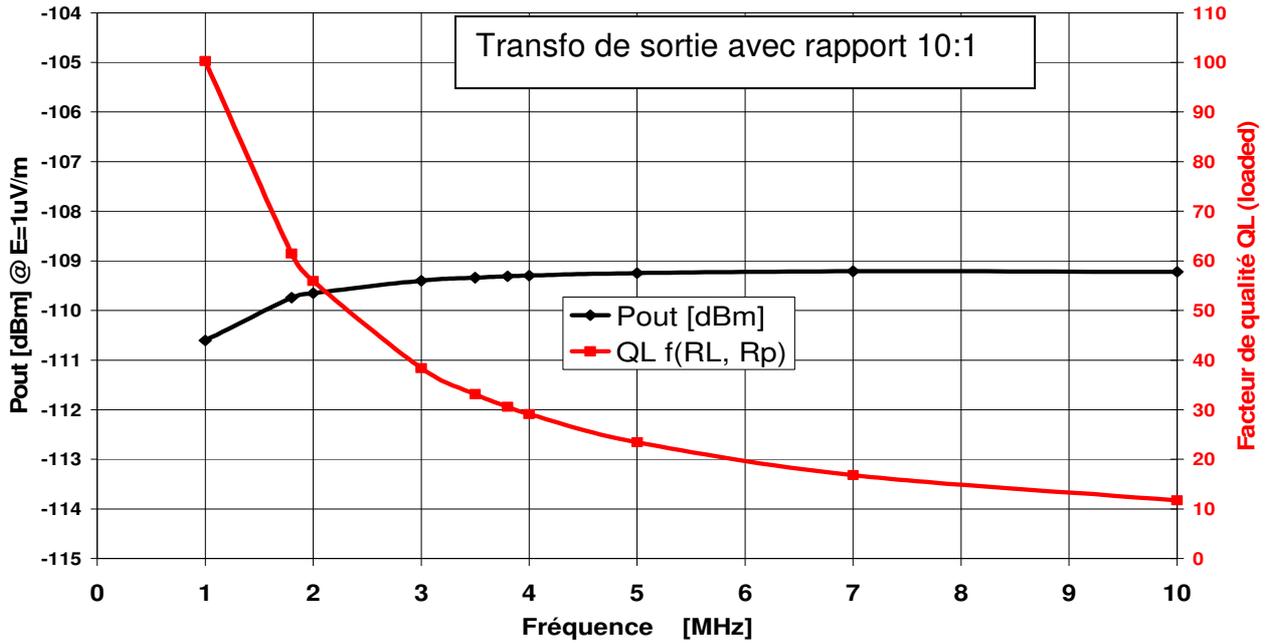


Fig. 19 : Niveau reçu dans un champ E=1uV/m et facteur de qualité.

En combinant le gain de cette antenne avec la courbe de bruit atmosphérique de la fig. 11, on obtient le niveau de bruit de sortie de la LOOP, en hiver à la fig. 20. Si le récepteur a un niveau de bruit d'entrée de -140dBm en SSB (B=2,7kHz), le bruit atmosphérique capté par l'antenne sera toujours supérieur au bruit du récepteur, même en période « calme ».

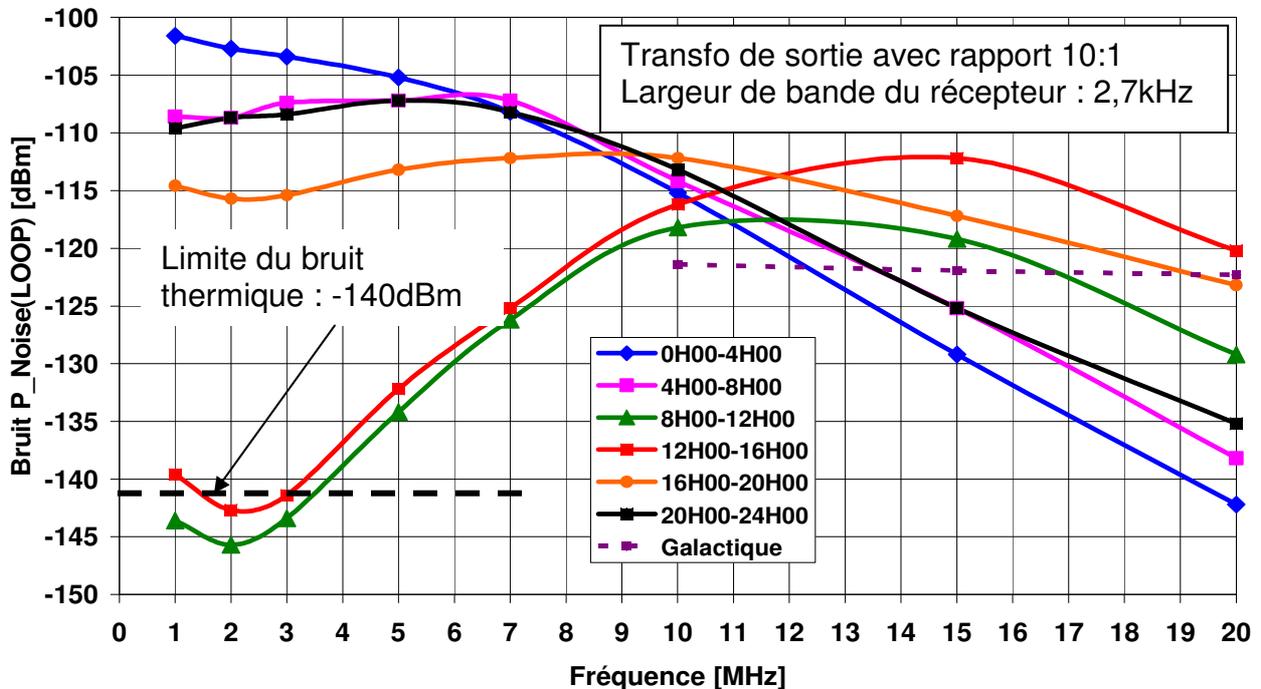


Fig. 20 : Niveau de bruit délivré par la LOOP au récepteur en fonction de la fréquence et de la tranche horaire, en hiver.

6. Antenne LOOP active à large bande pour la réception.

Une antenne LOOP active est décrite dans l' article [3]. L'avantage d'une antenne LOOP active est d'avoir une antenne de réception « sans réglage » et à large bande. Plus besoin du CV d'accord et de sa motorisation à distance. La réalisation mécanique est beaucoup plus simple. Il faut cependant alimenter l'ampli qui se trouve à la place du CV. Cela peut se faire à travers le câble coaxial, à l'aide d'une alimentation à faible bruit bien entendu...

L'ampli sera un ampli de courant à faible impédance d'entrée et aussi à faible bruit, mais il devra pouvoir supporter les signaux de fortes amplitudes reçu des stations de radiodiffusion en ondes courtes.

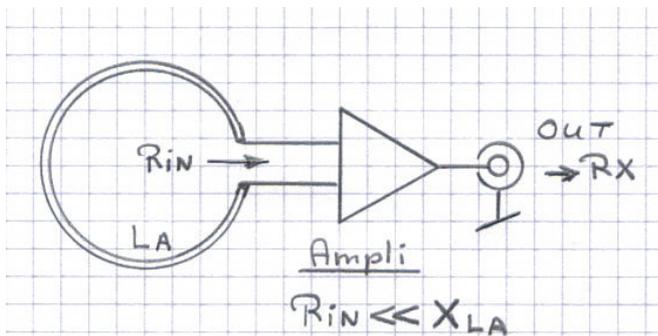


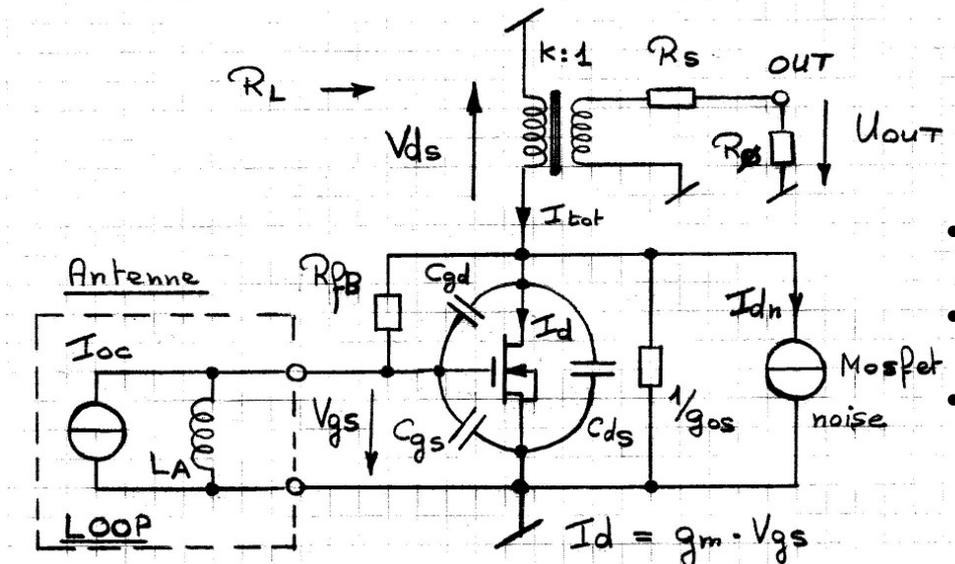
Fig. 21 : Antenne LOOP connectée à son ampli.

Le courant de court-circuit délivré par la boucle (cas : N=1 spire) vaut :

$$I_{oc} = \frac{V_{oc}}{X(L_A)} = \frac{A \cdot E}{c \cdot L_A} \quad (5.4)$$

- A = surface délimitée par la boucle
- L_A = inductance de la LOOP
- $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ est la vitesse de la lumière
- $E = 377 \Omega \cdot H$ est la composante électrique de l'onde reçue. On reçoit la composante magnétique H

L'ampli a été réalisé à l'aide d'un Mosfet de puissance. Le schéma de principe de l'ampli (sans alimentations) est donné à la fig. 22. La résistance de contre réaction R_{FB} fixe le gain et crée des impédances d'entrée et de sortie basses.



Paramètres du MOST :

- $g_m = \Delta I_D / \Delta V_{GS}$ est la transconductance
- $g_{OS} = \Delta I_D / \Delta V_{DS}$ est la conductance de sortie
- C_{GS} , C_{GD} et C_{DS} sont les capacités d'entrée, de feedback et de sortie respectivement.

Fig. 22 : Schéma de principe du préampli à large bande pour la LOOP active.

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

$R_0 = 50\Omega$ est la résistance de charge de l'utilisateur (résistance d'entrée du récepteur OC). La résistance série R_s réduit un peu le gain, mais elle sert à imposer l'impédance de sortie de la LOOP active également à 50Ω .

Le bruit de canal du MOST peut être symbolisé par une source de courant en parallèle sur la sortie. Sa valeur vaut :

$$I_{DN} = 4KT \cdot g_m \cdot B \quad (6.1)$$

- $K = 13,8 \cdot 10^{-24} J / ^\circ K$ est la constante de Boltzmann
- $T = 273 + 20^\circ C = 293^\circ K$ est la température par rapport au 0 absolu physique
- $g_m = \Delta I_D / \Delta V_{GS}$ est la transconductance du MOST
- $B = 2700 Hz$ est la largeur de bande d'un récepteur radio en mode phonie SSB

Sur la fig. 22, la résistance totale qui charge le drain du MOST vaut :

$$R_L = \frac{1}{\frac{1}{K^2 \cdot (R_s + R_0)} + g_{os}} \quad (6.2)$$

Dans les formules suivantes, on n'a pas tenu compte des capacités parasites du MOST C_{GS} , C_{GD} et C_{DS} . Les capacités parasites limitent la bande passante du préampli.

Avec cette approximation valable pour les basses fréquences, le niveau de sortie de la LOOP active vaut :

$$P_{OUT_SIG} = \frac{(I_{OC} \cdot R_{FB})^2}{2 \cdot R_L \cdot \left(1 + \left(\frac{1 + R_{FB}/R_L}{g_m \cdot \omega \cdot L_A} \right)^2 \right)} \quad (\omega = 2\pi f) \quad (6.3)$$

Le niveau de bruit en sortie dû au MOST seul vaut :

$$P_{OUT_NOISE} = \frac{4KTB}{2g_m \cdot R_L} \cdot \frac{1 + \left(\frac{R_{FB}}{\omega L_A} \right)^2}{1 + \left(\frac{1 + R_{FB}/R_L}{g_m \cdot \omega \cdot L_A} \right)^2} \quad (6.4)$$

Aux basses fréquences, la valeur de la résistance de CR est plus grande que l'impédance de la LOOP, donc on pose l'approximation : $R_{FB} \gg \omega L_A$. On obtient alors une équation simple pour le rapport signal/bruit de la LOOP active (qui tient compte du bruit du préampli uniquement !) :

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{OUT_SIG}}{P_{OUT_NOISE}} = \left(\frac{A \cdot E \cdot \omega}{c} \right)^2 \cdot \frac{g_m}{4KTB} \quad (6.5)$$

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

De l'équation précédente, on peut déduire le niveau de bruit équivalent au niveau de l'antenne dû au préampli de la LOOP. Le champ équivalent E_{NOISE} est obtenu en posant $S/N = 1$:

$$E_{NOISE} = \frac{c}{A \cdot \omega} \cdot \sqrt{\frac{4KTB}{g_m}} \quad (6.6)$$

Tant que E_{NOISE} est plus faible que le niveau de bruit atmosphérique, la sensibilité de l'antenne est optimale. Doubler la surface de la LOOP ou doubler la fréquence diminue la contribution du préampli au bruit total par 2 (-6dB). Doubler la transconductance MOST g_m permet de gagner 3dB.

Réalisation pratique.

L'antenne LOOP active HB9BLF a été réalisée avec un tube d'aluminium de diamètre 14mm. Elle a un diamètre de 2 mètres ce qui donne une inductance $L_A = 6,25\mu H$.

L'ampli a été réalisé avec un MOST de puissance. Il est alimenté sur 12 volts et son courant de repos vaut $I = 0,4Amp$. Son schéma est donné à la [fig. 24](#), accompagné des paramètres électriques du préampli.

L'ampli a une faible impédance d'entrée ($\leq 50\Omega$ @ $f < 10MHz$) et une très basse impédance de sortie ; la résistance en série sur la sortie sert à restituer une impédance de 50Ω , optimale pour attaquer les filtres d'entrée du récepteur (au prix d'une baisse du gain de -6dB). La commande PTT sert à mettre le préampli OFF en émission. Les relais servent aussi à protéger le préampli contre des surtensions induites à distance par la foudre. En position de repos, le relais 2 court-circuite la LOOP et la déconnecte du préampli, tandis que le relais 1 court-circuite directement la grille du MOST à la masse.

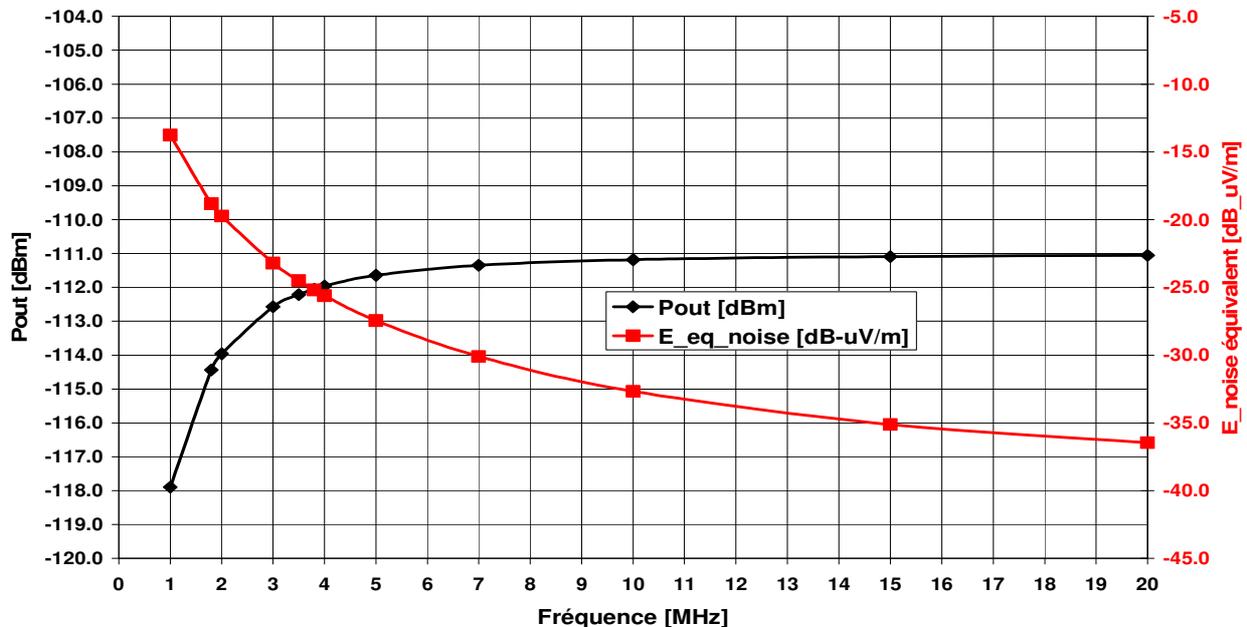


Fig. 23 : Niveau de sortie de la LOOP active pour un champ $E = 1\mu V/m$ et calcul du bruit équivalent dû au préampli.

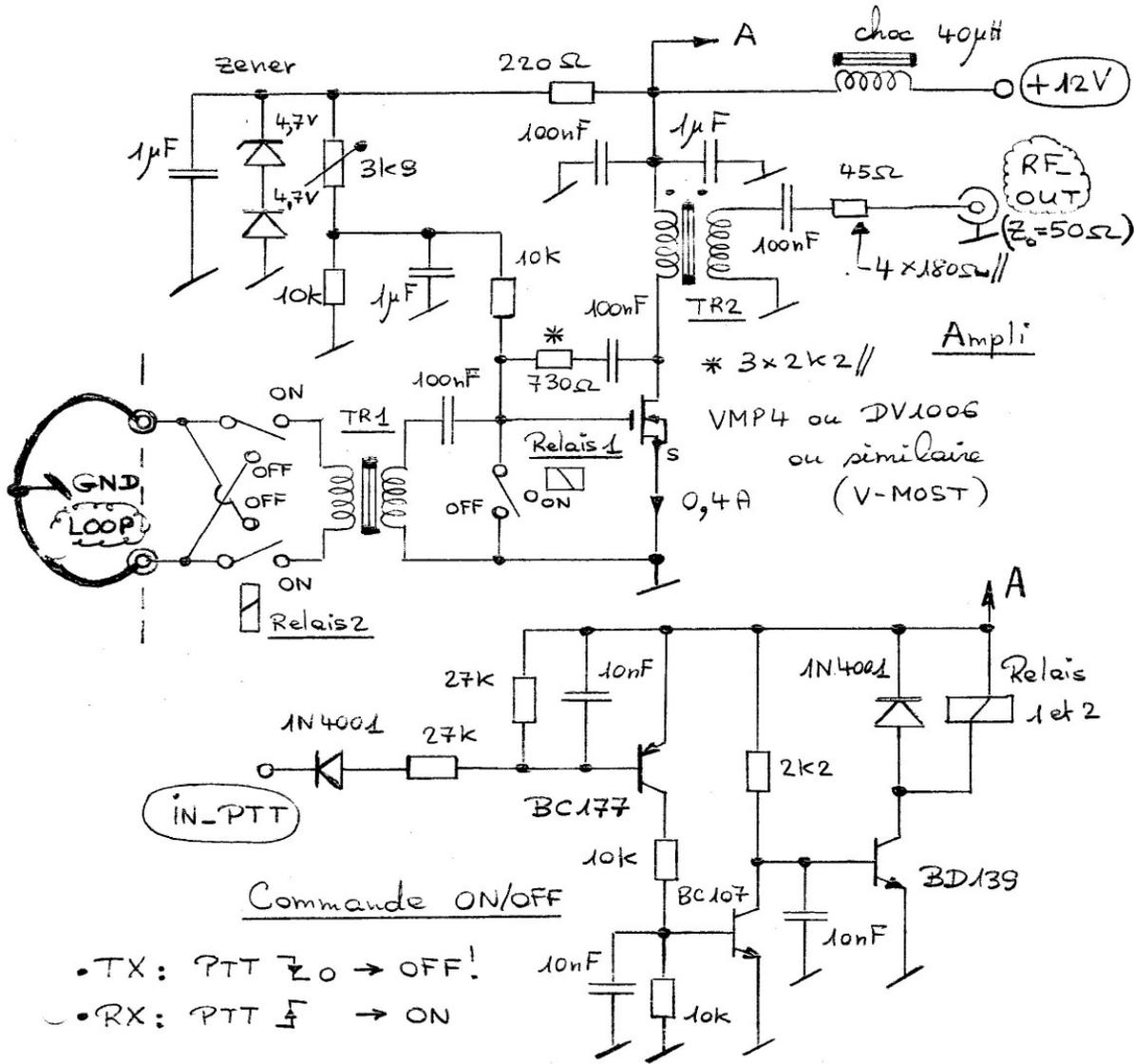


Figure 24 : Ampli à basse impédance d'entrée pour la LOOP

- Transfo TR1 : rapport 1:1. 15 spires sur pot fermé Philips P18/11 ferrite type 4C6 ; $A_L = 147nH/t^2$; inductance primaire et secondaire $L = 33\mu H$.
- Transfo TR2 : rapport 1:1. 20 spires en bifilaire, fil émaillé $\phi = 0,4mm$ sur tore Philips type 4C6 de diamètre 24mm/14mm et épaisseur 7mm ; $A_L = 52nH/t^2$; inductance $L = 21\mu H$.
- MOST : VMP4 ou DV1006 de Siliconix (cuvée de 25 ans d'âge environ...). Il doit être possible de trouver un « power-Mosfet RF » équivalent. Les données du VMP4 sont : N-Channel Enhancement mode RF Power Fet $g_m = 0,24A/V$ pour $I_D = 0,4Amp$, $C_{GS} = 50pF$, $C_{GD} = 7,5pF$, $C_{DS} = 40pF$

Les performances sont calculées à la fig. 23, en injectant les paramètres mentionnés ci-dessus dans les équations citées aux pages précédentes fichier excel ad-hoc).

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

Après quelques calculs, on trouve que le niveau de sortie du préampli connecté à une boucle de 2 mètres de diamètre vaut $P_{OUT} = -111dBm$, dans un champ électrique $E = 1\mu V/m$. La fig. 25 donne le niveau de bruit total équivalent de l'antenne, compte tenu du bruit du préampli et du bruit atmosphérique (courbes en traits pleins). Sur la bande 160 mètres (1,8MHz), le bruit du préampli dominera de 10 à 12dB le bruit atmosphérique de jour ; la nuit, le bruit atmosphérique sera dominant à toutes les fréquences.

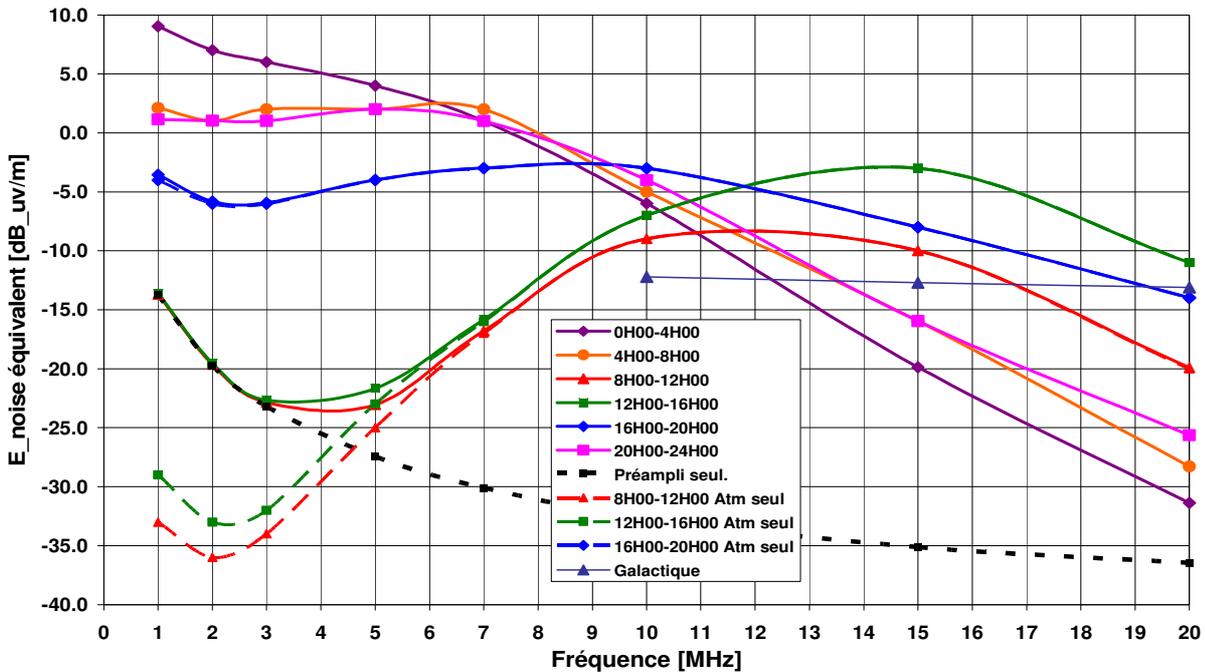
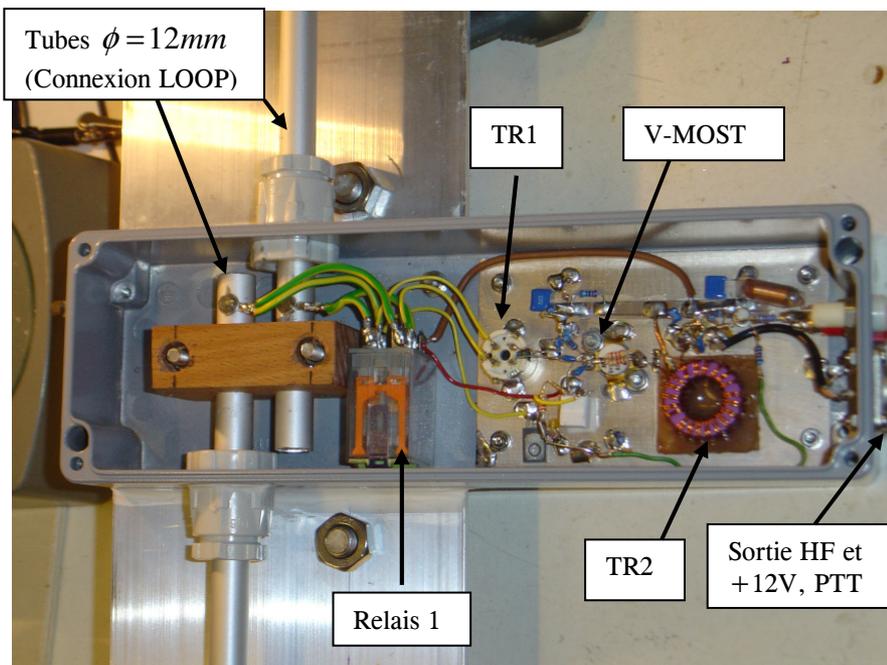


Fig. 25 : Niveau de bruit équivalent de l'antenne LOOP, relatifs à $E=1\mu V/m$.



Le MOST est fixé dans le fond du boîtier qui sert de refroidisseur.

La boîte est fixée sur une plaque support, elle-même fixée par une bride au mat d'antenne.

La plaque maintient les tubes de 12mm, sur lesquels sont emmanchés les tubes de 14mm de la LOOP.

La sortie HF et les connexions DC sont ici à droite (en bas lorsque la LOOP est montée sur son mât)

Figure 26 : Le préampli dans sa boîte imperméable.

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

Cette LOOP est opérationnelle depuis quelques semaines. Il est possible de recevoir toutes les bandes OC jusqu'à 30MHz, bien qu'elle soit prévue surtout pour les bandes basses, entre 1,8MHz et 10MHz. L'écoute est agréable sur toutes les bandes, sans saturation ni intermodulation remarquées jusqu'à présent.



La LOOP avait d'abord été montée tournée de 90° (parallèle au boom de l'antenne 144MHz). Sur 14MHz elle recevait pas mal de bruit. Le boom ayant une longueur de 10 mètres, il se comportait comme une antenne dipôle sur 14MHz et l'antenne LOOP captait le bruit reçu par le boom...

L'antenne est plus silencieuse sur 14MHz et plus haut dans l'orientation actuelle.

Il faudra la monter un peu plus sur le mât, car elle est trop près des éléments directeurs de l'antenne 144MHz.

Fig. 27 : La LOOP en place au dessus de l'antenne 144MHz

7. Conclusions

Tout système d'antenne a ses limitations.

Les antennes LOOP sont des antennes en principe compactes.

Utilisées à l'émission, elles sont associées avec un circuit d'accord télécommandé, car il est nécessaire de régler la résonance de façon exacte à cause du très haut facteur de qualité de l'antenne.

La conséquence du haut facteur Q est la haute tension aux bornes du condensateur variable d'accord, qui doit pouvoir tolérer des kilovolts ou même des dizaines de KV suivant la puissance mise en jeux. La 2^{ème} conséquence est le courant énorme qui circule dans la LOOP et dans le CV et l'exigence d'une continuité électrique irréprochable pour éviter de dissiper la puissance du TX en pure perte dans les résistances parasites.

Formules de calcul et application à une antenne de réception.

L'utilisation d'une LOOP comme antenne de réception est plus facile, car il n'y a pas de problème de surtensions ou de surintensités.

Une antenne magnétique est connue pour être peu sensible au bruit (QRN) généré par des appareils électriques ou des décharges statiques (brouillard ou gouttelettes chargées statiquement) dans le voisinage de l'antenne.

Il n'est pas nécessaire de réaliser une antenne à faibles pertes, comme c'est le cas pour une LOOP émettrice. Le bruit atmosphérique ambiant dominera même pour une LOOP accordée de relativement petites dimensions (diamètre 1 à 2 mètres).

Il est possible de réaliser une LOOP active large bandes, avec un ampli de courant à la place du circuit d'accord. Avec un diamètre de 2 mètres, les performances sont tout à fait acceptables sur 40 et 80 mètres, même de jour lorsque le bruit atmosphérique est au plus bas. Pour la bande 160 mètres, un diamètre de 3 mètres serait plus optimal.

La technique des antennes LOOP est intéressante. Il faut cependant l'utiliser pour ce qu'elle vaut, en connaissance de ses avantages pour la réception, et de ses difficultés de mise en œuvre pour l'émission.

Références bibliographiques.

[1]: "Reference Data for Radio Engineers", Howard W. Sams and CO INC, ITT 1968 1975, ISBN 0-672-21218-8

[2]: "Antennas for Communications", Ed Joy, 2004, Cours du CEI à Nice

[3]: "Aktive magnetische Empfangsantennen", Jochen Jirmann, DB1NVCQ-DL 5/95

[4]: „How Antenna Aperture relates to Gain and Directivity“, Robert J. Zavrel, W7SX, QEX quarterly May/June 2004

[5]: "Rechnerische Behandlung von Magnetantennen", Dieter Glesner, DF5VX, CQ-DL 1/97

[6]: ERC Report 67. „Propagation Model and Interference Range Calculation for Inductive Systems in the 10kHz to 30MHz Frequency Range, Marbella, February 1999

[7]: "Loops and Whips, Oh My! On Low Frequency Measurements Issues." Isidor Straus. www.conformity.com August 2002