

Une antenne et un fuselage carbone

Jean-luc Foucher



1	INTRODUCTION	3
2	SYNOPTIQUE/ SCHEMA EQUIVALENT.....	3
2.1	Schéma d'ensemble.....	3
2.2	Schéma bloc de l'étude et principe.....	3
3	ETUDE DE L'ANTENNE EXTERNE	4
3.1	Impédance d'antenne.....	4
3.2	Puissance disponible sur l'antenne réception.....	4
3.3	Adaptation en puissance	5
3.4	Application à l'antenne externe	6
4	ETUDE DE LA TRANSMISSION COAXIALE.....	6
4.1	Propriétés du carbone en HF	6
4.2	Antenne interne et fuselage carbone.....	7
5	LE RECEPTEUR.....	8
5.1	RX 41 MHz.....	9
5.2	RX 72MHz.....	10
6	SCHEMA GLOBAL EQUIVALENT	12
6.1	Schéma électrique équivalent :	12
6.2	Adaptation de l'antenne au Récepteur.....	13
7	QUELQUES EXEMPLES	13
7.1	F3F	13
7.1.1	Cas d'un Récepteur à 41MHz	13
7.1.2	Cas d'un Récepteur à 72MHz	18
7.2	Lancer-main	23
7.2.1	RX2-41MHz.....	23
7.2.2	RX2-72MHz.....	24
7.2.3	Influence de la longueur d'antenne	26
8	TABLEAUX DE SYNTHESE.....	27
9	CONCLUSIONS	28
10	REFERENCES	29

1 INTRODUCTION

Beaucoup de nos modèles commencent à avoir un fuselage carbone pour allier légèreté et rigidité. Cela va du lancer-main au F3X.

L'installation d'une antenne de réception pose alors problème, le fuselage faisant une enveloppe conductrice qui ne laisse pas passer les ondes électromagnétiques.

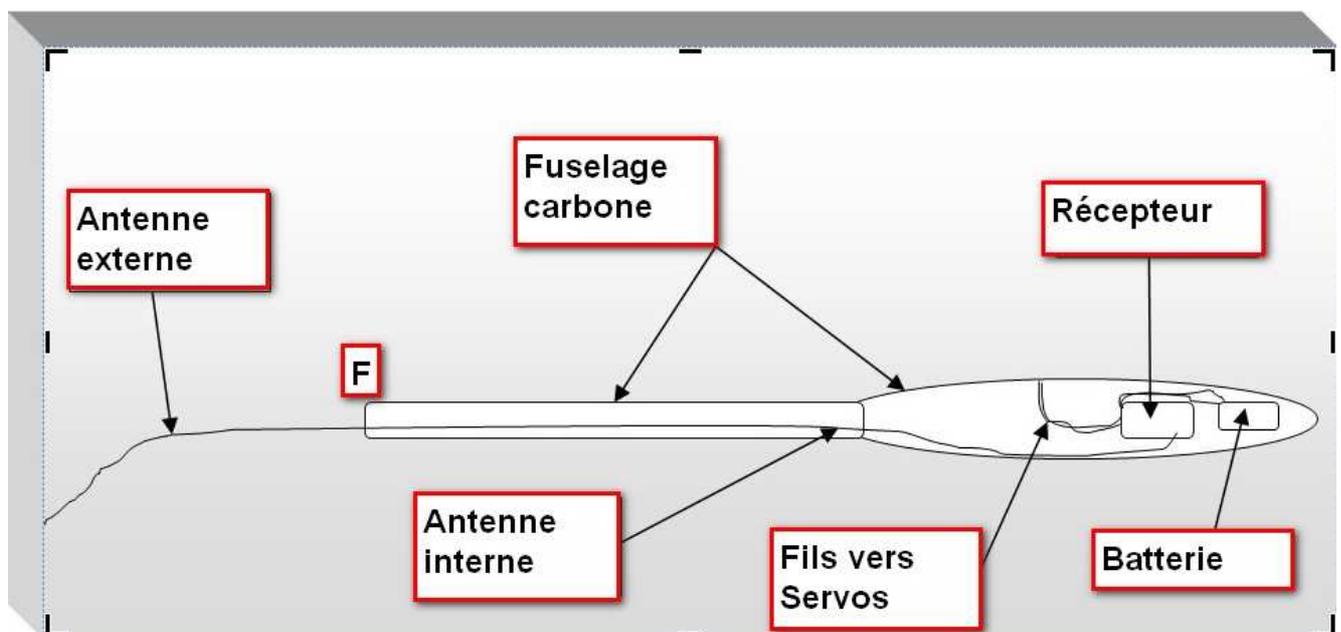
Ce qui suit est une modélisation de l'ensemble Récepteur + antenne + fuselage qui permet par une approche un peu rationnelle d'estimer la perte de portée associée, l'influence de l'implantation de l'antenne, en tenant compte de la fréquence de réception et des dimensions du modèle. Enfin des propositions sont faites permettant de partir à la recherche des dB perdus.

Comme toute approche simulée, il conviendra de l'éprouver par des tests au sol.

Ces résultats ne peuvent que nous encourager à faire les tests classiques de portée au sol avant les premiers vols.

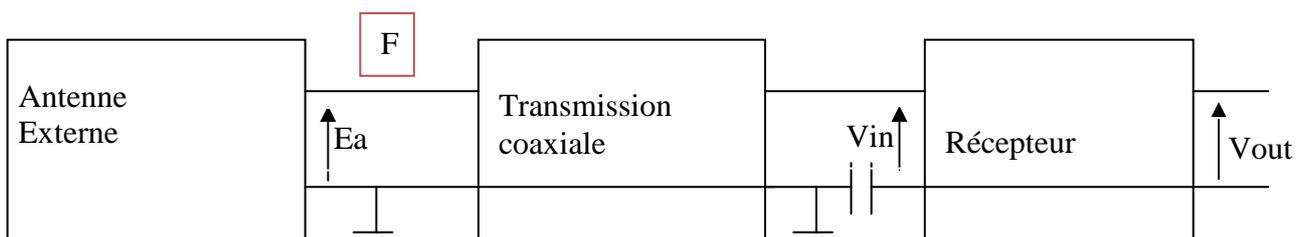
2 SYNOPTIQUE/ SCHEMA EQUIVALENT

2.1 Schéma d'ensemble



2.2 Schéma bloc de l'étude et principe.

Le schéma bloc proposé pour l'étude est le suivant :



La méthode qui va être utilisée consiste à partir d'un récepteur correctement réglé sur une antenne de 1m : ce sera la référence de gain en tension (antenne -> ampli Récepteur) pour un transfert de puissance optimal.

Dans le montage final, avec une petite antenne extérieure, on recalculera le gain en tension qui sera comparé à la référence. Les pertes seront exprimées en dB par rapport à cette référence.

3 ETUDE DE L'ANTENNE EXTERNE

3.1 Impédance d'antenne

Un dipôle 2 fois $\lambda/4$ à une impédance radiative de $Z_0=R_0=72$ Ohms, la partie imaginaire est alors nulle. La puissance rayonnée est $Z_0 \cdot I^2$; I étant le courant injecté dans l'antenne.

Réciproquement, en réception, l'impédance du générateur qu'est l'antenne est R_0 .

Si l'un des 2 brins est remplacé par un plan de masse, cette impédance devient $R_0=36$ Ohms. On obtient un monopôle.

Si ces 2 brins sont raccourcis alors $Z = R_0 + jX$; R_0 décroît fortement avec la longueur des brins ;

$$R_0 \approx 120 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 ; l \text{ étant la longueur d'un brin.}$$

La partie imaginaire X de l'impédance est négative, car l'antenne devient capacitive :

$$X \approx -60 \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{l}{d}\right) - 1}{\tan\left(2\pi \cdot \frac{l}{\lambda}\right)}\right) ;$$

d étant le diamètre du brin.

La capacité série est donc de plus en plus petite quand la longueur du brin décroît : $C = -\left(\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X}\right) ;$

$$\text{Pour } \frac{l}{\lambda} \text{ petit, } C \text{ ne dépend pas de la fréquence et vaut : } C = \frac{l}{1.8 \cdot 10^{10} \cdot \left(\ln\left(\frac{l}{d}\right) - 1\right)}$$

Ainsi pour adapter idéalement une antenne courte, il faut que le récepteur présente à l'antenne une inductance élevée et une partie résistive faible.

Enfin la force électromotrice E développée par l'antenne est proportionnelle à sa longueur (si $l < \lambda/4$) et au champ environnant :

Ainsi la puissance max disponible en sortie d'antenne qui est égale à $\frac{E^2}{4 \cdot R_0}$, ne dépend pas de la longueur de l'antenne, mais de la fréquence (via λ). Nous aborderons ce point à nouveau dans le chapitre suivant.

3.2 Puissance disponible sur l'antenne réception.

La puissance disponible aux bornes de l'antenne est : $\frac{P_t G_t}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot S_d$, P_t étant la puissance fournie par l'émetteur à l'antenne émission de gain G_t , R la distance entre TX et RX.

S_d étant la surface équivalente d'un dipôle en réception : $S_d = \frac{G_r \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi}$;

Ainsi doubler la portée (R) revient à diviser par 4 la puissance disponible, c'est-à-dire à perdre 6dB en puissance.

le gain (max) d'antenne $G_t = G_r$ d'un dipôle est à peu près constant quelque soit la longueur du dipôle ($d < \lambda/4$) ; $G=1.5$; en effet un dipôle rayonne quasiment dans tout l'espace avec un léger gain dans la direction perpendiculaire à l'antenne. En effet, ne pas oublier qu'il y a néanmoins une perte de gain importante dans l'axe de l'antenne. Le raisonnement est le même pour un monopôle, sauf que l'émission ne se fait que sur la moitié de l'espace. Ce doit être à peu près vrai pour l'antenne d'émission ; par contre heureusement que ce n'est pas tout à fait vrai en réception (car le plan de masse n'a pas une surface suffisante). Le diagramme de l'antenne de réception doit être assez patatoïde et les impédances réelles un peu différentes de celles calculées ; néanmoins ce sont les ordres de grandeur qui nous intéressent.

Il convient de remarquer que **la puissance max disponible sur une antenne de réception ne dépend pas de sa longueur** (à une fréquence donnée).

En effet : $P_{recue} = \frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4 * \pi * R)^2}$ avec :

$G_t = G_r = 1.5$ dans le plan perpendiculaire à chaque antenne.

P_t la puissance de l'émission (10 à 100mW)

R la distance entre émetteur et récepteur ;

$\lambda = 3 * 10^8 / f$

(on note un bilan moins bon à 72MHz qu'à 41MHz à cause du terme en λ^2 .)

Ce point peut paraître surprenant, mais la surface efficace de l'antenne réception ne dépend pas de la longueur de celle-ci : elle occupe toujours la même surface de captation pour une fréquence

donnée: $S_d = \frac{1.5 * \lambda^2}{4 * \pi}$

Ainsi $S_d = 6.4m^2$ à 41MHz et $S_d = 2.1m^2$ à 72MHz.

Par contre, comme on l'a vu, c'est l'impédance de source de l'antenne qui va dépendre de sa longueur.

Mais cette puissance ne sera transmise intégralement que si le Récepteur est bien adapté en puissance à l'impédance de source cette antenne.

Ce point est capital : L'adaptation en puissance du Récepteur à l'antenne est plus importante que la longueur de l'antenne.

3.3 Adaptation en puissance

Il y a adaptation en puissance entre l'antenne et le récepteur si leurs impédances satisfont les conditions suivantes:

La somme des parties réactives s'annule : on parle d'accord ou de résonance

La partie réelle (résistance pure) du récepteur doit être égale à la partie réelle de l'antenne (résistance de rayonnement)

Ces 2 conditions doivent être remplies pour un transfert optimal de puissance.

3.4 Application à l'antenne externe

C'est la partie « utile » de l'antenne. L'énergie transférable dépendra de la fréquence et de l'impédance présentée à l'entrée du fuselage (point F).

Vu la surface développée par le fuselage par rapport à celle de l'antenne, nous pouvons considérer que nous avons affaire à un monopôle: l'impédance de source de l'antenne est

$$Z_s = R_o + j * I_m ; \quad R_o \approx 60 * \pi^2 * \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 ; \quad I_m \approx -30 * \left(\frac{\ln\left(\frac{l}{a}\right) - 1}{\tan\left(2 * \pi * \frac{l}{\lambda}\right)}\right)$$

La partie externe du fuselage sert donc de plan de masse pour l'antenne externe "utile". Pour rappel, la force électromotrice E développée par l'antenne est proportionnelle à l.

Quelques exemples :

Longueur antenne	géné source Ref=2V @ 1m	Impédance de source de l'antenne			
		41 MHz		72 MHz	
		R _o	C	R _o	C
0,1	0,2	0,1	2,6E-12	0,3	2,60E-12
0,2	0,4	0,4	4,5E-12	1,4	4,59E-12
0,3	0,6	1,0	6,3E-12	3,1	6,63E-12
0,4	0,8	1,8	8,1E-12	5,5	8,93E-12
0,5	1,0	2,8	1,0E-11	8,5	1,17E-11
0,6	1,2	4,0	1,2E-11	12,3	1,54E-11
0,7	1,4	5,4	1,4E-11	16,7	2,08E-11
0,8	1,6	7,1	1,7E-11	21,8	3,02E-11
0,9	1,8	8,9	1,9E-11	27,6	5,21E-11
1	2,0	11	2,3E-11	36	infini

4 ETUDE DE LA TRANSMISSION COAXIALE

4.1 Propriétés du carbone en HF

Le carbone en graphite est un conducteur moyen : sa résistivité $\rho = 1400 * 10^{-8}$ ohm.m, soit 820 fois plus résistant que le cuivre.

Cependant en HF les courants pénètrent assez peu le métal quand il est bon conducteur, ce qui augmente sa résistivité (proportionnelle à \sqrt{f}). La pénétration des courant sur une petite épaisseur est appelée « effet de peau » dont la profondeur est appelée σ . (profondeur pour laquelle le courant est 2.7 fois plus faible qu'à la surface ; la décroissance de l'intensité du courant est exponentielle).

Mais σ est proportionnelle à $\sqrt{\rho}$. Ainsi pour le graphite la profondeur de pénétration des courants sera environ 30 fois plus importante que pour le cuivre.

Néanmoins au final, le carbone reste 30 fois moins bon en conductivité HF que le cuivre. (Au lieu de 820 en continu).

Par exemple :

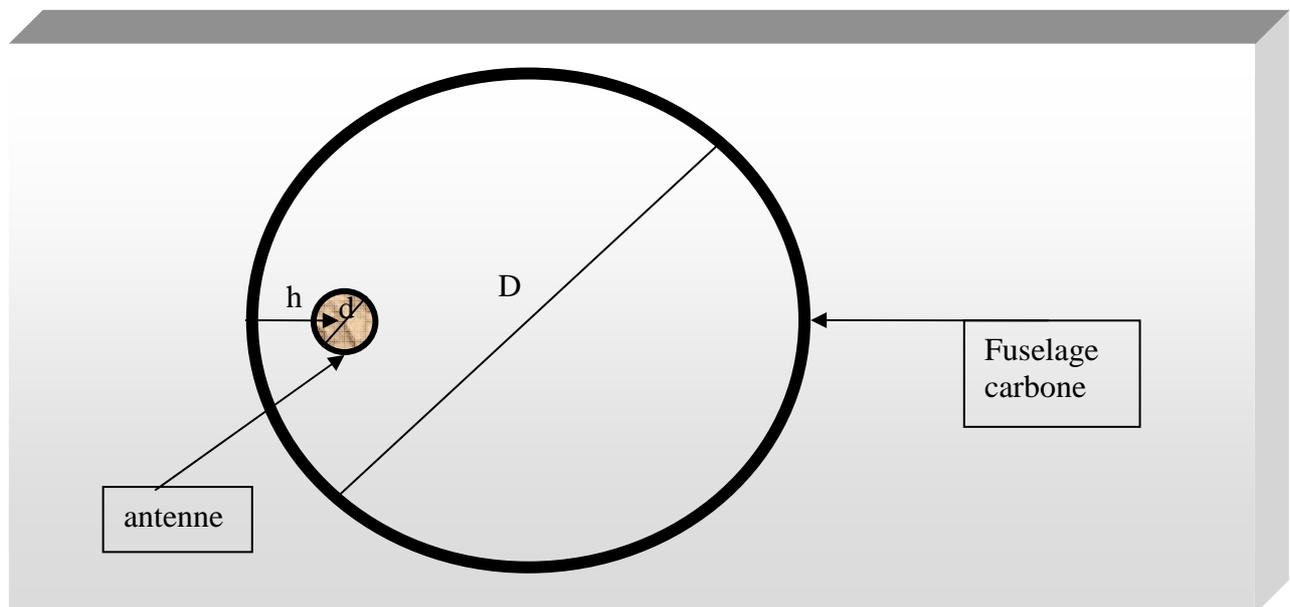
A 41MHz, la profondeur de peau est de 10 μ m pour le cuivre et de 300 μ m pour le graphite. On voit que à cette fréquence les courants HF pénètrent quasiment dans toute l'épaisseur du fuselage (qui est environ de 500 μ m).

A cette fréquence un fil de graphite de 2mm de diamètre et 1m de long a une résistance de 7.6 Ohms environ, (contre 4.5Ohms en continu) ; cette faible différence s'explique par une épaisseur de peau assez élevée par rapport au diamètre.

Comme l'épaisseur de peau est inférieure à l'épaisseur du fuselage, on peut encore considérer que le champ électromagnétique à un mode de propagation de type coaxial dans l'ensemble antenne/fuselage.

4.2 Antenne interne et fuselage carbone

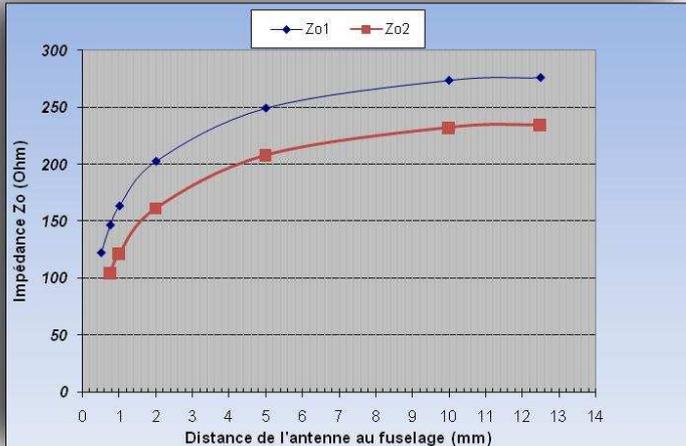
L'ensemble : fil d'antenne intérieure + fuselage carbone peut être considéré comme un câble coaxial dont l'impédance caractéristique Z_0 va dépendre de la géométrie de l'ensemble.



Nous avons l'équation générale :

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} * \cosh^{-1}(U) \quad \text{avec} \quad U = 0.5 * \left(\frac{D}{d} + \frac{d}{D} - 4 * \frac{c^2}{d * D} \right) \quad \text{et} \quad c+h = D/2$$

Cette équation n'est pas très facile à résoudre à cause de la fonction inverse du cosh; on trouvera dans le tableau suivant 2 cas représentatifs de nos modèles réduits.



Zo1 : diamètre du fil conducteur d'antenne: $d=0.25\text{mm}$; dans ce cas $h_{\min}=0.5\text{mm}$ (gaine + époxy)

Zo2 : diamètre du fil conducteur d'antenne: $d=0.5\text{mm}$; dans ce cas $h_{\min}=0.75\text{mm}$ (gaine + époxy)

Dans les deux cas la queue du fuselage a un diamètre $D=25\text{mm}$

ϵ_{eff} étant la constante diélectrique effective du coaxial.

ϵ -résine = 3.5 ; ϵ -gaine ≈ 2.5

Dans le cas où l'antenne est au milieu du fuselage $\epsilon_{\text{eff}} \approx 1$ car le champ est surtout dans l'air

Dans le cas où l'antenne est collée sur le fuselage $\epsilon_{\text{eff}} \approx 1.5$ pour tenir compte de la répartition air/diélectrique pour le champ.

Il est à noter que la ligne de transmission aura la même impédance, que l'antenne soit collée à l'intérieur ou à l'extérieur du fuselage. Le champ est confiné au voisinage de l'antenne et il ne se produit pas de rayonnement (et réciproquement). Le fuselage « cache » donc toujours l'antenne quand celle-ci est collée dessus. (Ce n'est plus vrai, si à l'extérieur, on éloigne l'antenne du fuselage.)

Comme les lignes de champ sont plus concentrées dans ce cas, on peut avoir des pertes ohmiques à cause des densités de courant plus importante dans le fuselage. Pour 1.5m de longueur, ces pertes ont été mesurées $<1\text{dB}$ à 41MHz. Ces pertes vont être un peu plus fortes pour les fréquences plus élevées.

5 LE RECEPTEUR

Le récepteur reçoit le signal issu de l'antenne et du fuselage.

La masse du Récepteur n'étant pas reliée au fuselage, le courant du signal passe par effet capacitif.

Il faut noter que la masse HF du Récepteur est constitué de tous les fils de masse et d'alimentation (+ et -) ainsi que de la batterie.

La capacité de cet ensemble par rapport au fuselage est de l'ordre de 150pF pour un F3F et de 70pF pour un lancé-main. Cette capacité peut se mesurer ou se calculer.

Pour être plus rigoureux, il faudrait simuler la ligne de transmission entre fils d'alimentation et fuselage. Cela donne à peu près les mêmes résultats pour une complexité accrue.

Les paramètres d'entrée du Récepteur sont adaptés en puissance à une antenne de 1m

5.1 RX 41 MHz

Ainsi en 41MHz : une antenne de 1m aura pour impédance de source : $R=11$ Ohms en série avec une capacité de $C=23$ pf

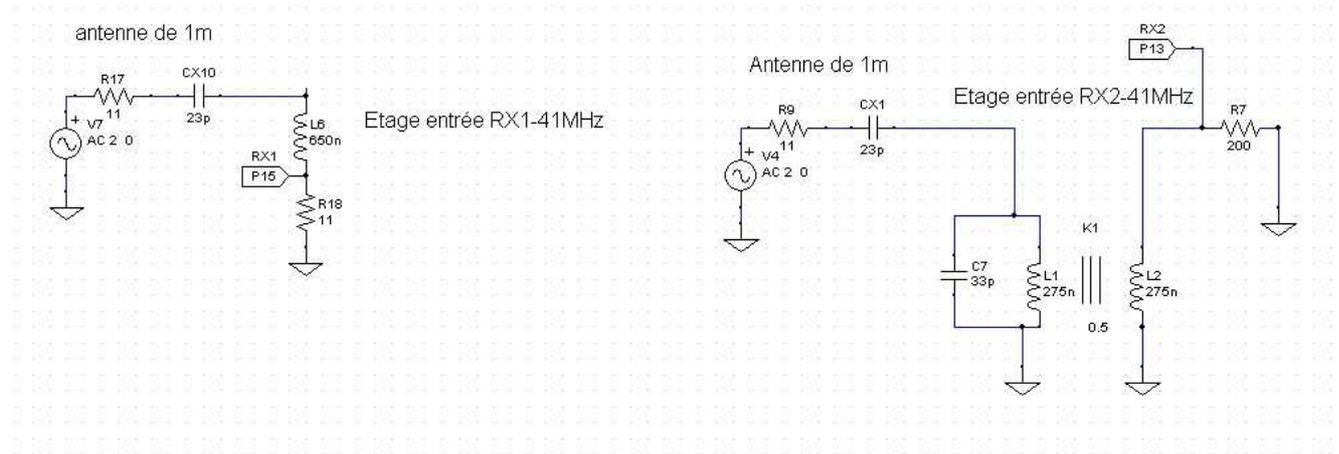
Le module de cette impédance de source est assez élevée (170 Ohms) à cause de la capacité.

Une infinité de montages sont possibles pour adapter l'ampli du Récepteur à l'antenne, dépendant essentiellement :

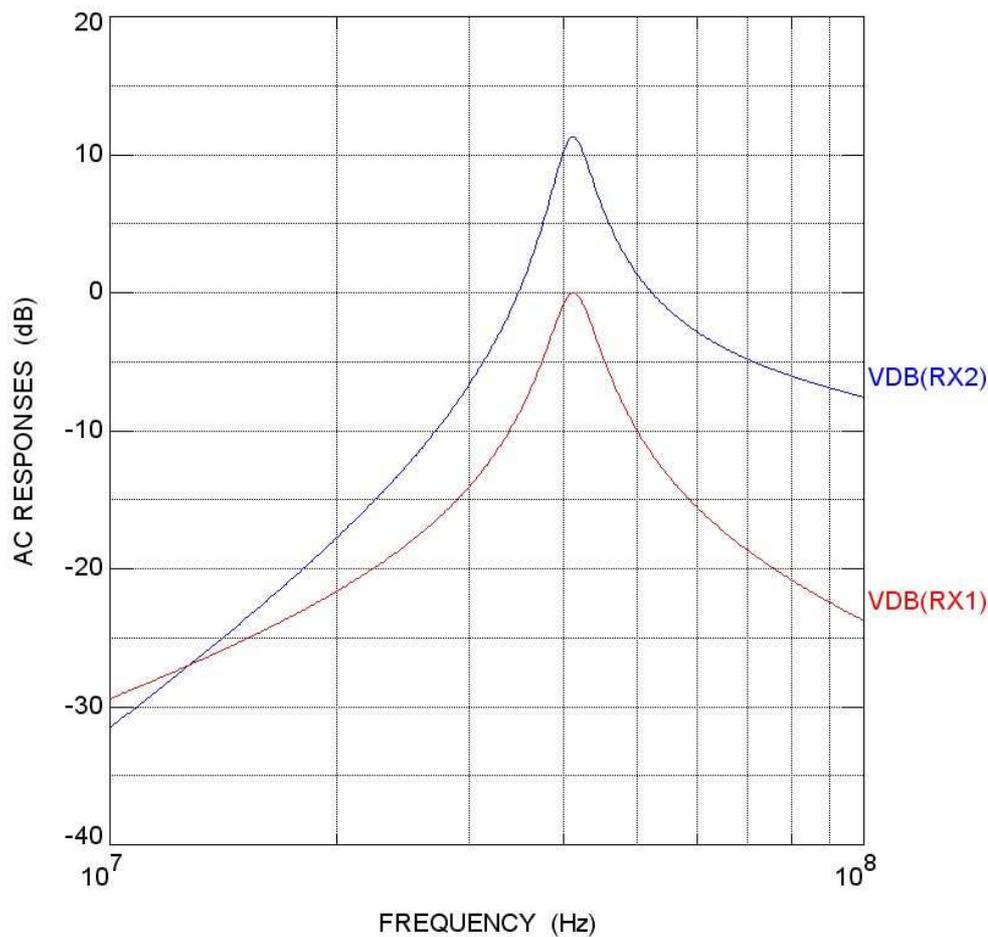
- du filtrage HF souhaité,
- des contraintes liées au choix de l'amplificateur d'entrée.
- du facteur de bruit souhaité

Nous en prendrons 2 qui couvrent de nombreux cas :

Le premier permet d'attaquer un ampli sous basse impédance, le deuxième, grâce à un transfo d'impédance servant également de filtrage, peut attaquer une impédance plus élevée.



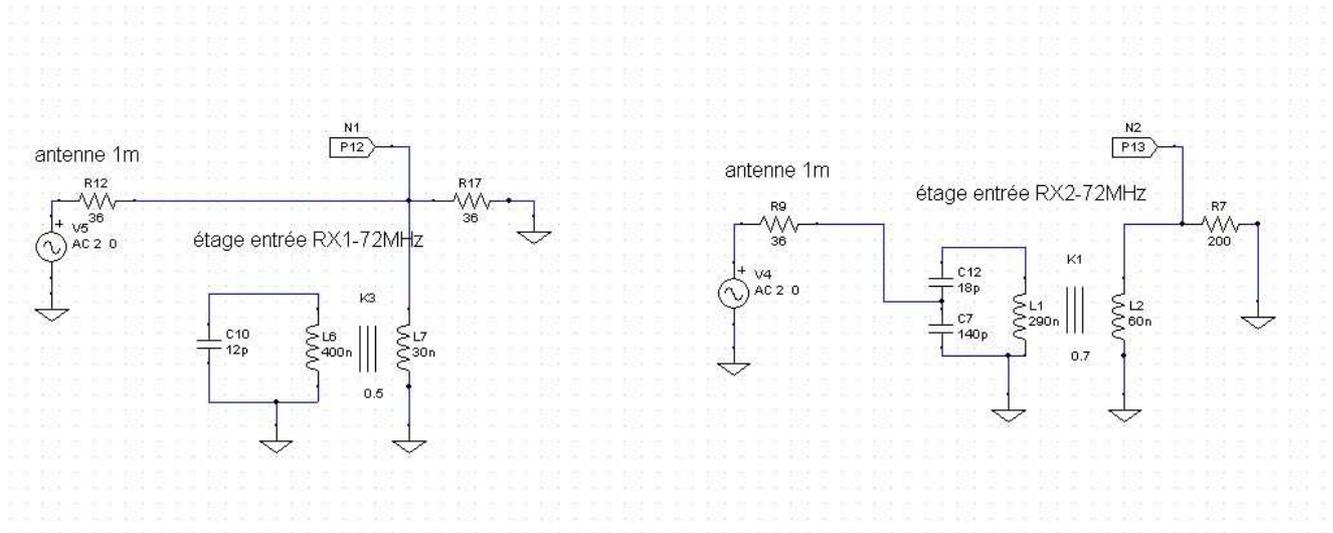
Les réponses en fréquence sur l'entrée des amplis est :



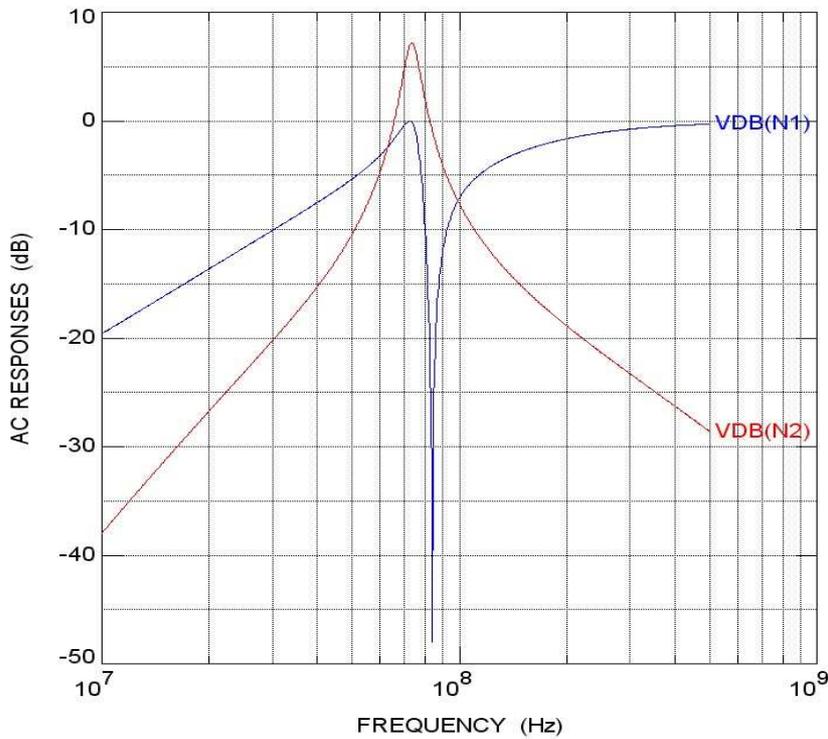
On remarque que les 2 montages réalisent un passe-bande autour de 41MHz. L'écart de gain en tension de 12dB s'explique par le fait que c'est la puissance transmise qui est constante : $\left(\frac{V^2}{R}\right)$

5.2 RX 72MHz

En 72MHz, pour une antenne de 1m, on est quasiment à $\lambda/4$, L'impédance de source de l'antenne est : $R=36$ Ohms ; $Im \sim 0$ (C très grand). Le module de l'impédance de source est donc 36 Ohm, valeur beaucoup plus basse que précédemment à 41MHz. La topologie d'adaptation devra donc être différente ; nous en retiendrons également 2 :



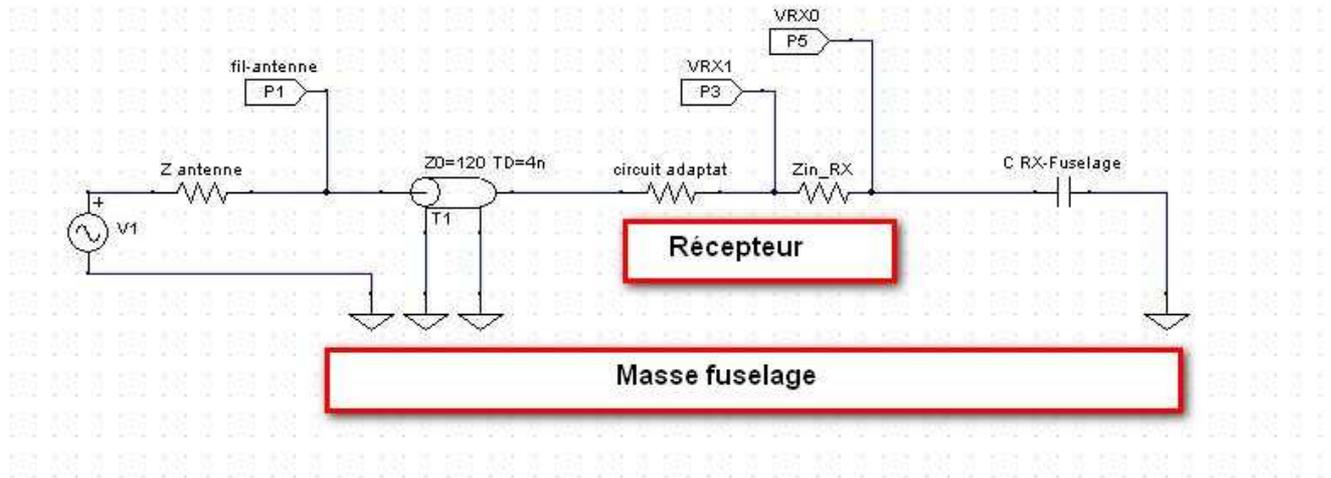
Les réponses en fréquence sur l'entrée des amplis est :



De même l'écart des gains en tension est dû aux valeurs des impédances des amplis. $\left(\frac{V^2}{R}\right)=cste$
 La solution No 2 filtre mieux les bandes adjacentes (27, 35 et 41MHz), mais on sait peut être faire un meilleur facteur de bruit avec la solution 1.

6 SCHEMA GLOBAL EQUIVALENT

6.1 Schéma électrique équivalent :



L'antenne externe est représentée par le générateur V1 dont l'impédance interne est représentée par $Z_{antenne}$ (dans la pratique une résistance en série avec une capacité).

L'antenne dans le fuselage est représentée par la ligne coaxiale Z_0 de retard TD.

Le Récepteur est représenté par son circuit d'adaptation suivi de l'impédance d'entrée du 1^{er} ampli (Z_{in_RX}). Il prend le signal entre le fil d'antenne et la capacité « C RX-Fuselage » qui le relie en HF au fuselage.

Un petit calcul nous permet d'anticiper l'influence de Z_0 :

Si la ligne coaxiale fait $\lambda/4$ (1m à 72MHz), et que l'impédance d'antenne est Z_a , alors l'impédance Z_r vue par le récepteur sera telle que :

$$Z_r * Z_a = Z_0^2$$

$$Z_a = R_0 - \frac{j}{C * \omega}, \text{ avec } R_0 \ll C * \omega ; \text{ soit } \text{mod}(Z_a) = \frac{1}{C * \omega}$$

$$Z_r = \frac{Z_0^2}{(C * \omega)^2} * \left(R_0 + \frac{j}{C * \omega} \right) = R_r + j * \text{Imr}$$

Comme le Récepteur à une partie résistive plus élevée que celle de l'antenne raccourcie, pour qu'il y ait adaptation il faut que $R_r > R_0$, soit $Z_0 > C * \omega$;

ainsi on verra qu'à 41MHz, $C * \omega = 220 \text{ Ohms}$, pour une antenne de 50 cm : alors $Z_0 = 250 \text{ Ohms}$ sera plus appropriée que $Z_0 = 100 \text{ Ohms}$; ce sera quasiment l'inverse à 72MHz.

De plus on remarque que Imr est positive, donc selfique : **la ligne de transmission se comporte donc en partie comme une inductance en série avec l'antenne.**

6.2 Adaptation de l'antenne au Récepteur.

Plusieurs causes font que la probabilité que l'antenne soit accordée au Récepteur est quasi nulle :

- Le Récepteur est réglé sur une antenne de 1 m environ.(hypothèse de départ)
- L'antenne derrière le fuselage est en générale plus courte et son impédance de source donc très différente de l'antenne de 1m
- Entre l'antenne extérieure et le Récepteur le signal transite via une ligne coaxiale d'impédance variant entre 100 et 250Ohm. Cette ligne fera sa propre transformation d'impédance.

Plusieurs possibilités s'ouvrent à nous pour adapter cette antenne « composite » au Récepteur :

Des montages LC en « L », « T » ou « PI ». Nous avons éliminé à priori ces méthodes car elles sont complexes à mettre en œuvre pratiquement et de plus souvent pointues à régler. L'ensemble doit encore fonctionner si l'on bouge le Récepteur ou si l'antenne se déplace un peu. Malheureusement c'est souvent la seule façon d'obtenir à coup sûr une adaptation parfaite en puissance.

Nous allons quand même essayer d'améliorer les choses en ne mettant qu'un élément série avec l'antenne. Ceci peut être fait au niveau du Récepteur ou entre l'antenne externe et l'antenne interne, ou les deux.

Dans la suite, on ne traitera que l'ajout d'une capacité ou d'une inductance à l'entrée du RX. Dans certains cas le gain est faible, car nous ne faisons pas d'adaptation en puissance sur la partie réelle des impédances. Mais c'est un moyen très simple qui peut faire gagner quelques dB voire plus si affinités.

7 QUELQUES EXEMPLES

7.1 F3F

7.1.1 Cas d'un Récepteur à 41MHz

Les paramètres sont :

$C2=150\text{pF}$

$F=41\text{MHz}$

L'antenne extérieure est longue de 50cm ce qui donne pour l'impédance de source :

$R_{\text{antenne}}=2.8\text{Ohms}$ et $C_{\text{antenne}}=10\text{pf}$

L'analyse est faite pour 2 positions de l'antenne dans le fuselage (longueur de 1m environ):

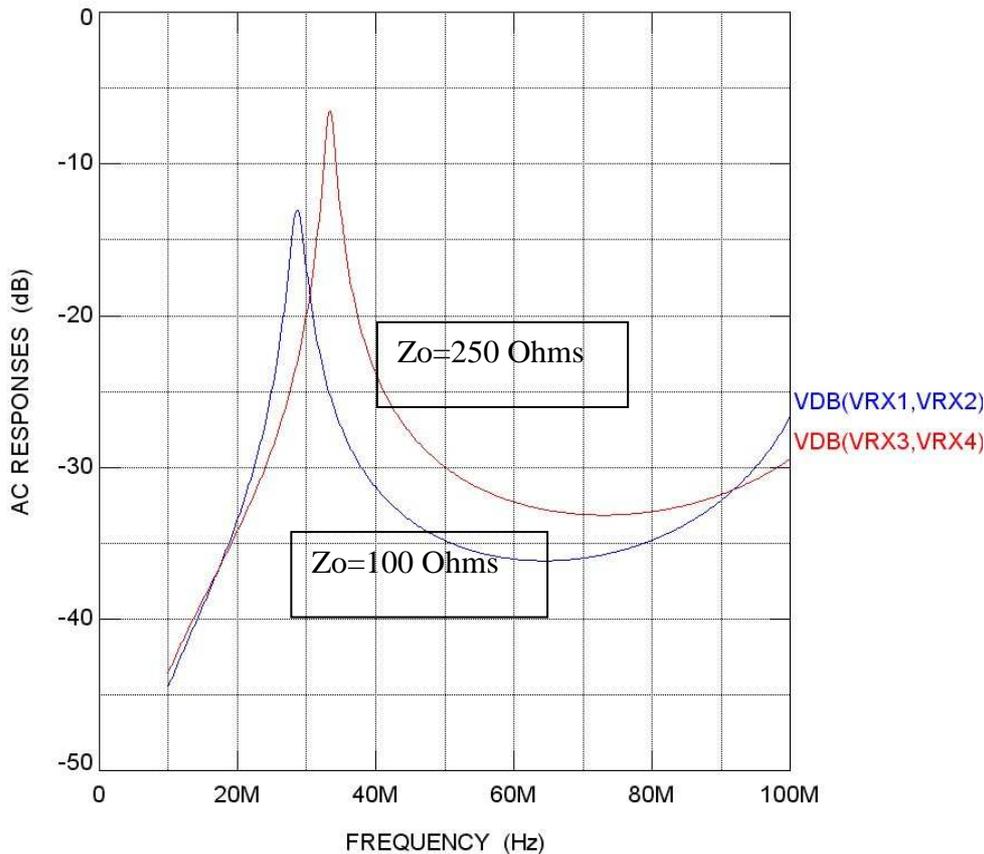
$Z_0=100\text{Ohms}$; $TD=4\text{ns}$ avec $\epsilon=1.4$ (antenne collée au fuselage)

$Z_0=250\text{Ohms}$; $TD=3.3\text{ ns}$ avec $\epsilon=1$ (antenne au milieu du fuselage)

7.1.1.1 Cas du RX1-41MHz

Pour RX1-41MHz, la référence de gain est $G_0=0\text{dB}$ à 41MHz

On obtient les courbes de transfert suivantes à l'entrée du 1^{er} ampli :



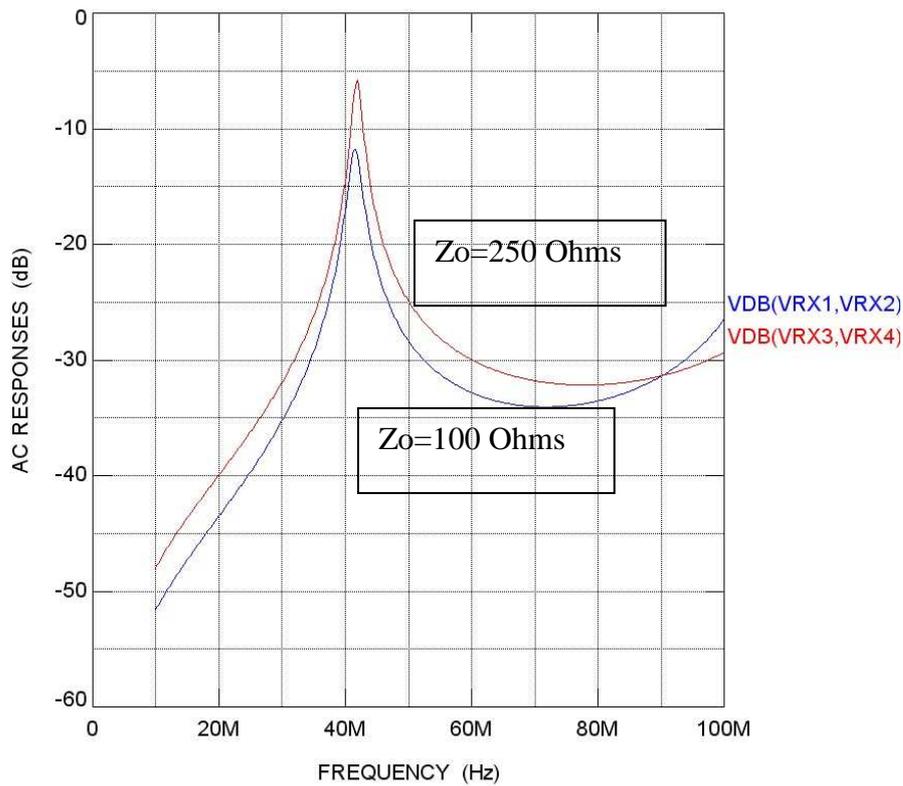
Alors que le récepteur était bien accordé sur une antenne de 1m, on observe un décalage très important de la fréquence d'accord, qui varie avec la position d'antenne dans le fuselage... Ainsi la courbe VDB(RX1,RX2) est celle pour $Z_o=100\text{Ohm}$ (antenne collée au fuselage). Dans cette position de l'antenne, on perd environ 32 dB de sensibilité ! C'est inexploitable. On perd 25dB de sensibilité pour une antenne écartée des parois du fuselage. C'est un peu mieux mais insuffisant.

Il est toujours possible de trouver un réseau d'adaptation permettant de retrouver la sensibilité initiale, mais nous allons nous limiter à une adaptation partielle, mais très simple : intercaler une capacité ou une inductance entre l'entrée du Récepteur et l'antenne. Une adaptation quasi parfaite peut être obtenue en intercalant une inductance à la sortie du fuselage en plus de la capacité ci-dessus.

C'est un peu plus compliqué, mais faisable ; ce n'est pas traité dans ce qui suit.

En intercalant une capacité entre le récepteur et l'antenne, on améliore très sensiblement la situation :

On rajoute 33pf si $Z_o=100\text{Ohm}$ et également 33pf si $Z_o=250\text{Ohm}$; on obtient alors :

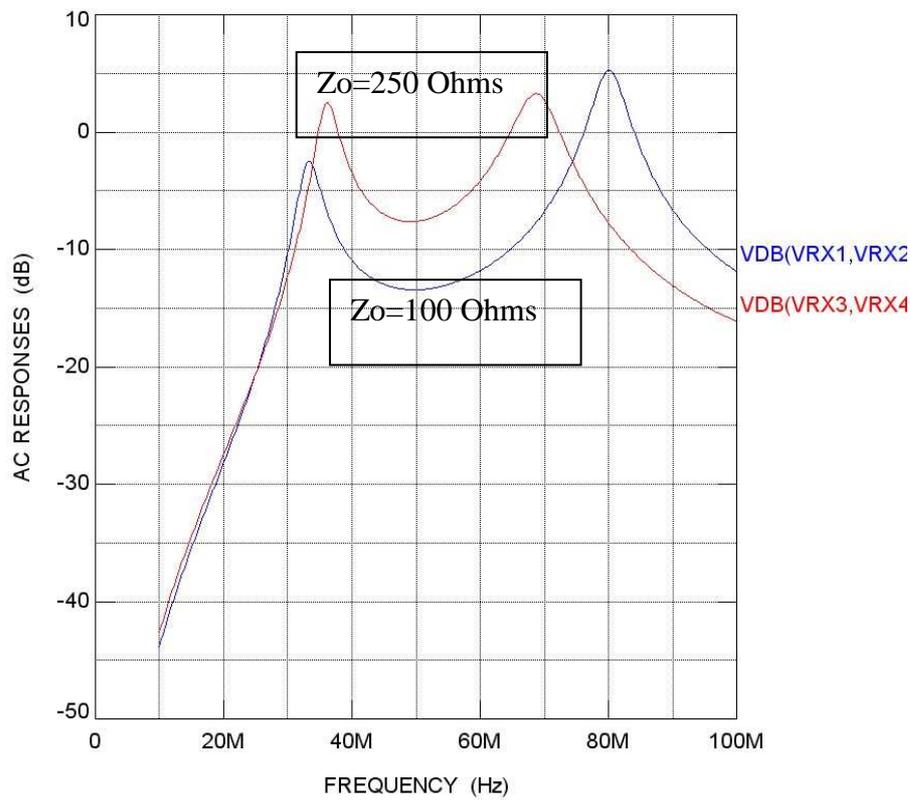


On retrouve des sensibilités plus correctes, avec un net plus pour l'antenne écartée du fuselage. On a quand même perdu entre 6 dB et 12dB de sensibilité soit 2 à 4fois moins de portée. Ce résultat final est satisfaisant si le récepteur avait au départ une bonne sensibilité.

7.1.1.2 Cas du RX2-41MHz

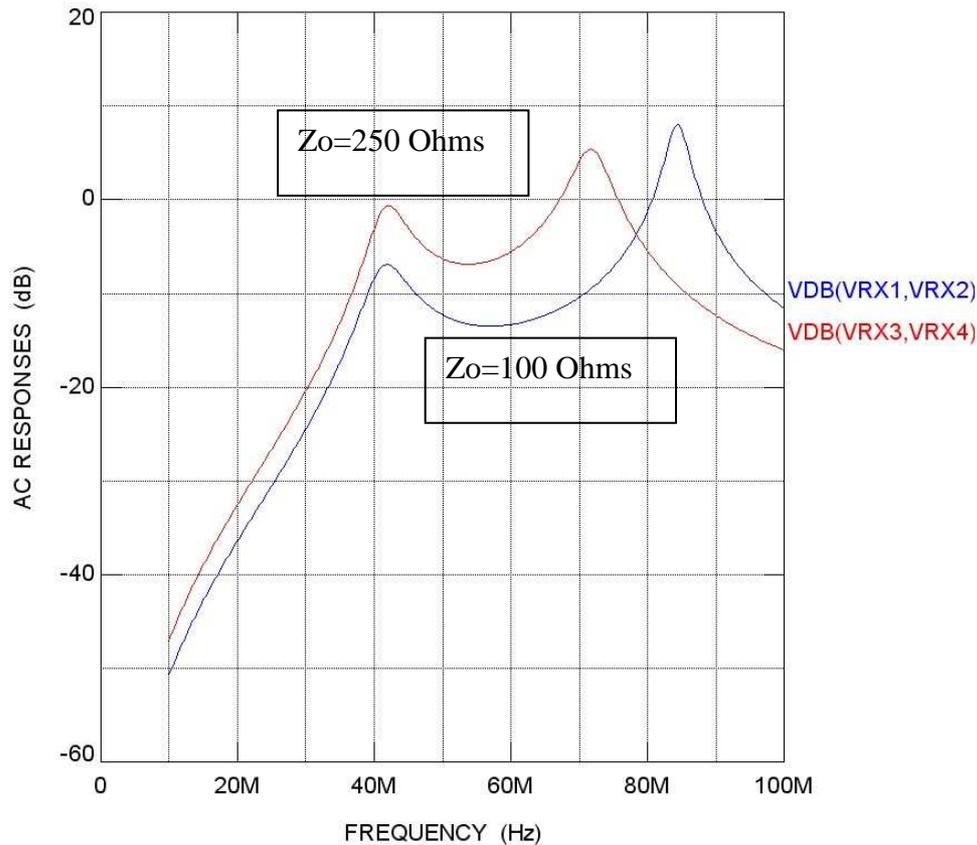
Pour RX2-41MHz, la référence de gain est $G_o=12$ dB à 41MHz

On obtient les résultats suivants :



La situation est moins catastrophique que la précédente :

On part d'une réponse à +12dB pour le Récepteur sur son antenne de 1m ; on perd donc 16dB à 41MHz pour $Z_o=250$ Ohms et 24dB pour $Z_o=100$ Ohms. On améliore encore les choses en intercalant une capacité à l'entrée du Récepteur : 33pF pour $Z_o=100$ Ohm ; 33pf pour $Z_o=250$ Ohm. On obtient alors la réponse suivante :

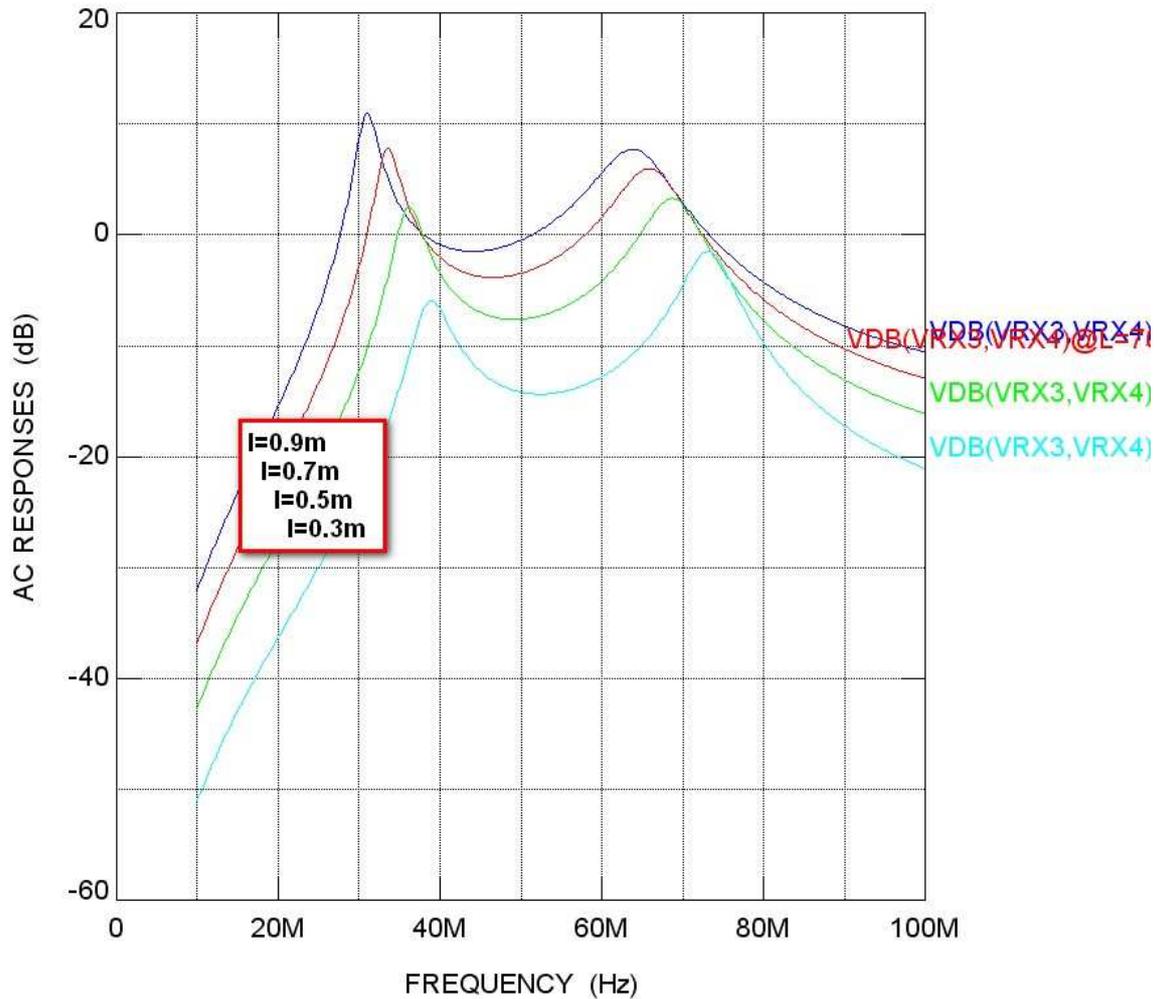


On perd 13 dB pour $Z_o=250\text{Ohms}$ et 20dB pour $Z=100\text{Ohm}$. (par rapport au gain initial de 12dB)
 On remarque également une 2eme résonance entre 80 et 100MHz (5 à 15dB plus haute) qui peut perturber le Récepteur suivant l'environnement.

La situation n'est donc pas très brillante en 41MHz: on perd entre 16 et 32dB sans rien faire et entre 6 et 20dB en réadaptant partiellement l'antenne avec une capacité série.

Mais existe-t-il une longueur optimale derrière le fuselage ? Les simulations montrent que lorsque l'on rallonge l'antenne, on gagne un peu en sensibilité malgré le fait qu'on éloigne encore plus les pics de résonance. L'antenne est accordée en fréquence pour une longueur entre 0.2m et 0.3m, mais on est loin d'être adapté en puissance.

Dans tous les cas le vrai gain est obtenu en réaccordant l'antenne avec une capa série.



7.1.2 Cas d'un Récepteur à 72MHz

Les paramètres sont :

$C2=150\text{pF}$

$F=72\text{MHz}$

L'antenne extérieure est longue de 50cm ce qui donne pour l'impédance de source :

$R_{\text{antenne}}=8.5\text{Ohms}$ et $C_{\text{antenne}}=9.6\text{pf}$

La F.e.m est la moitié de celle d'une antenne de 1m , on divisera par 2 le générateur dans la simulation.

L'analyse est faite pour 2 positions de l'antenne dans le fuselage (longueur de 1m environ):

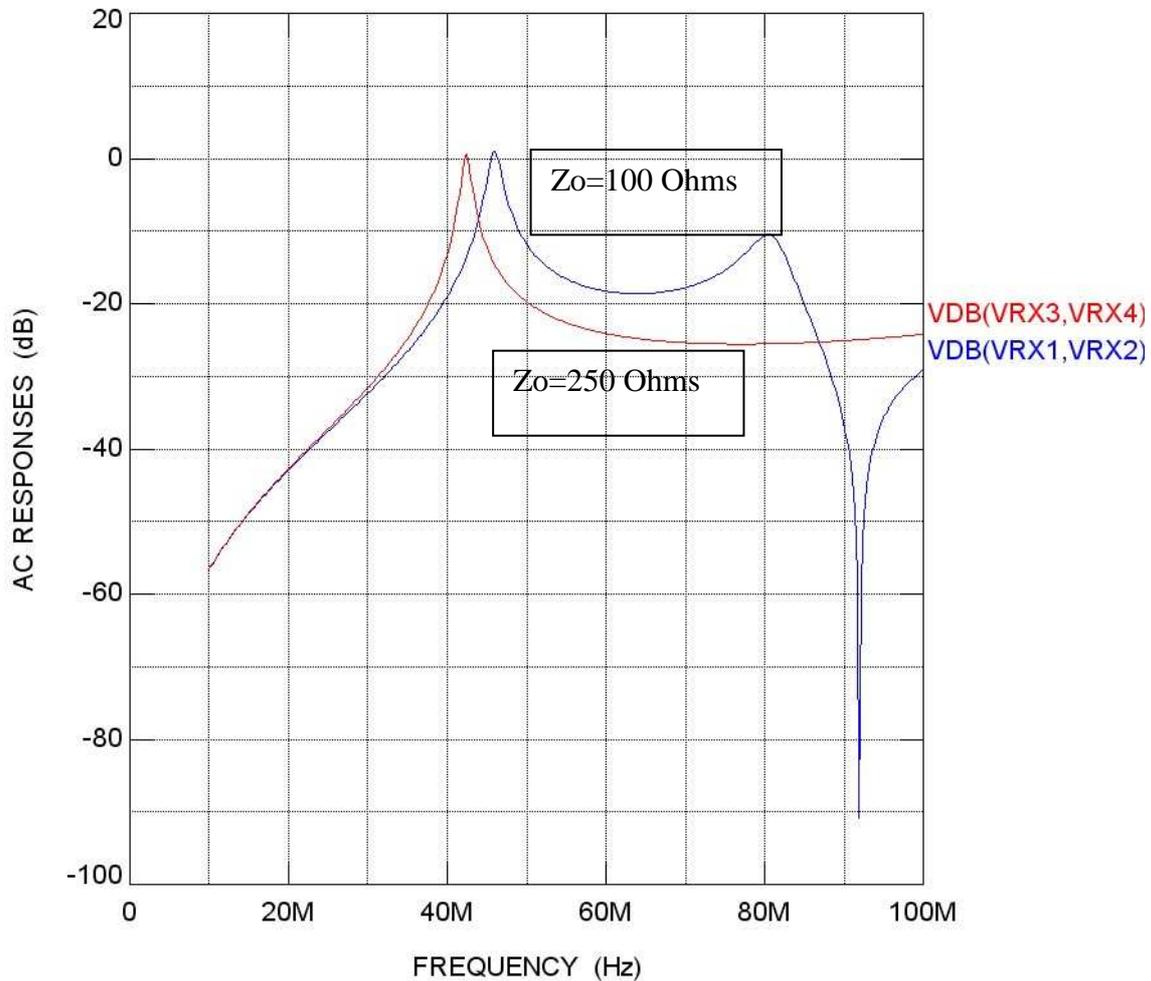
$Z_0=100\text{Ohms}$; $TD=4\text{ns}$ avec $\epsilon=1.4$

$Z_0=250\text{Ohms}$; $TD=3.3\text{ ns}$ avec $\epsilon=1$

7.1.2.1 Cas du RX1-72MHz

Pour RX1-72MHz, la référence de gain est $G_0=0\text{dB}$ à 72MHz

Si on implante le Récepteur et l'antenne tels quels dans le fuselage on obtient la courbe de transfert suivante à l'entrée du 1^{er} ampli :



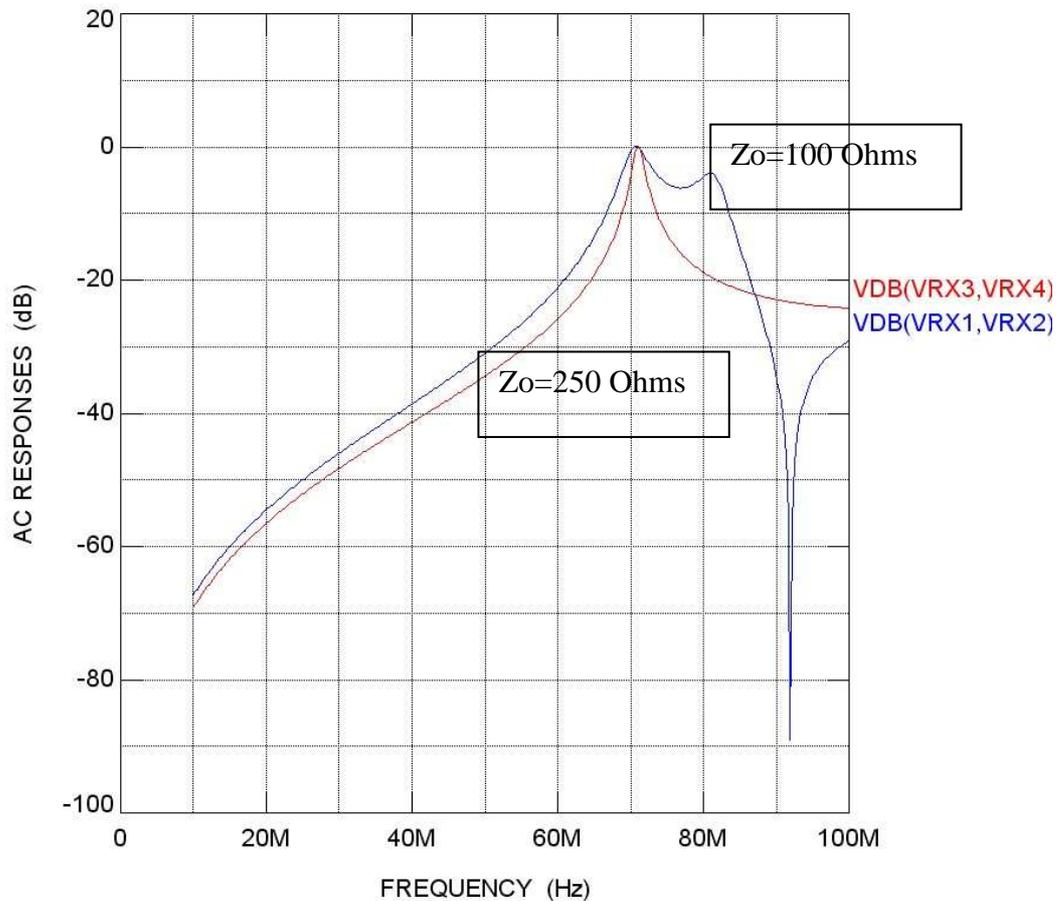
Alors que le récepteur était bien accordé sur une antenne de 1m (ref =0dB), on observe encore un décalage assez important de la fréquence d'accord, qui varie avec la position d'antenne dans le fuselage...

Ainsi la courbe VDB(RX1,RX2) est celle pour $Z_o=100$ Ohm (antenne collée au fuselage). Dans cette position de l'antenne, on perd environ 18 dB de sensibilité.

On perd 26dB de sensibilité pour une antenne écartée des parois du fuselage.

Il y a donc inversion des rôles de Z_o par rapport à un Récepteur 41MHz.

En intercalant une capacité entre le récepteur et l'antenne, on améliore sensiblement la situation : On rajoute 22pf si $Z_o=100$ Ohm et 8pf si $Z_o=250$ Ohm ; on obtient alors :



On retrouve une très bonne sensibilité, on réussit pour les 2 positions d'antenne à réadapter l'antenne en impédance.

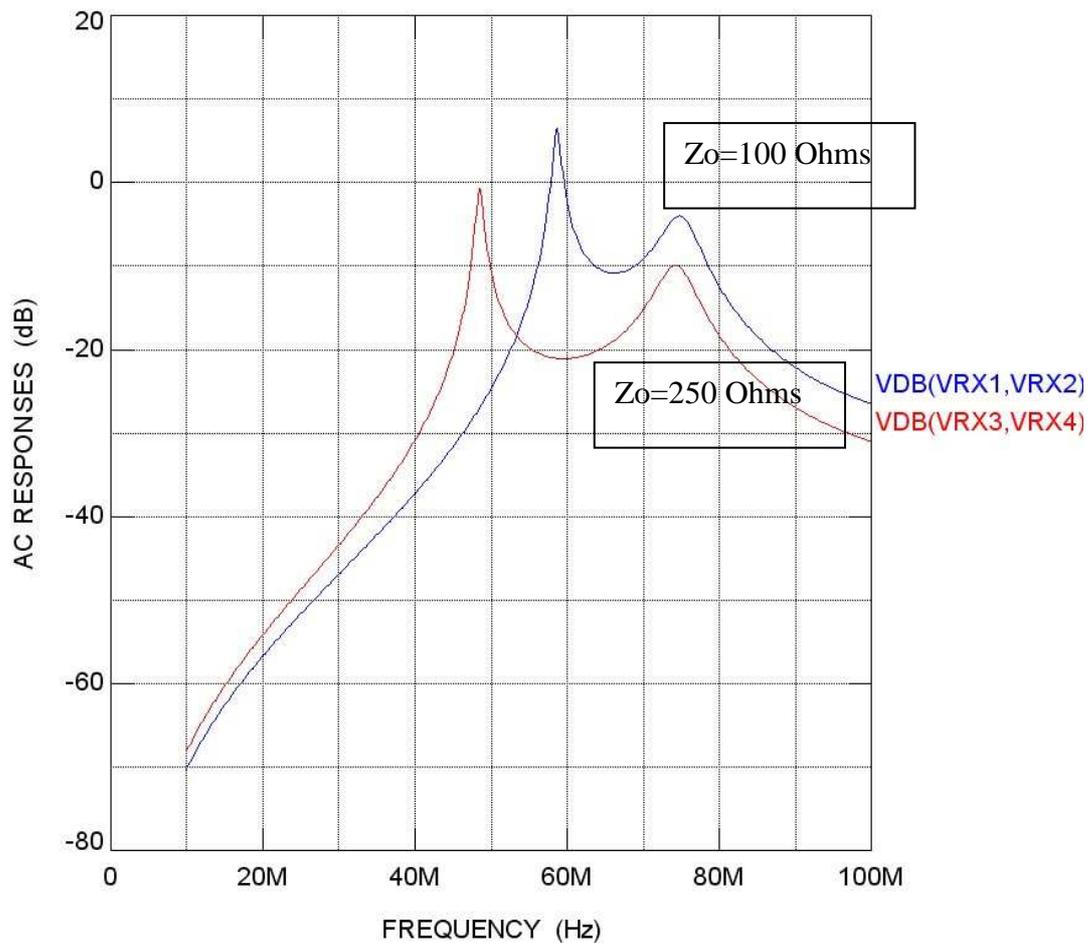
On préférera dans ce cas l'antenne collée au fuselage ($Z_o=100\text{Ohms}$), car :

- Les performances sont presque correctes sans rien faire.
- Le réglage avec la capacité à l'entrée du Récepteur n'est pas très pointu.

7.1.2.2 Cas du RX2-72MHz

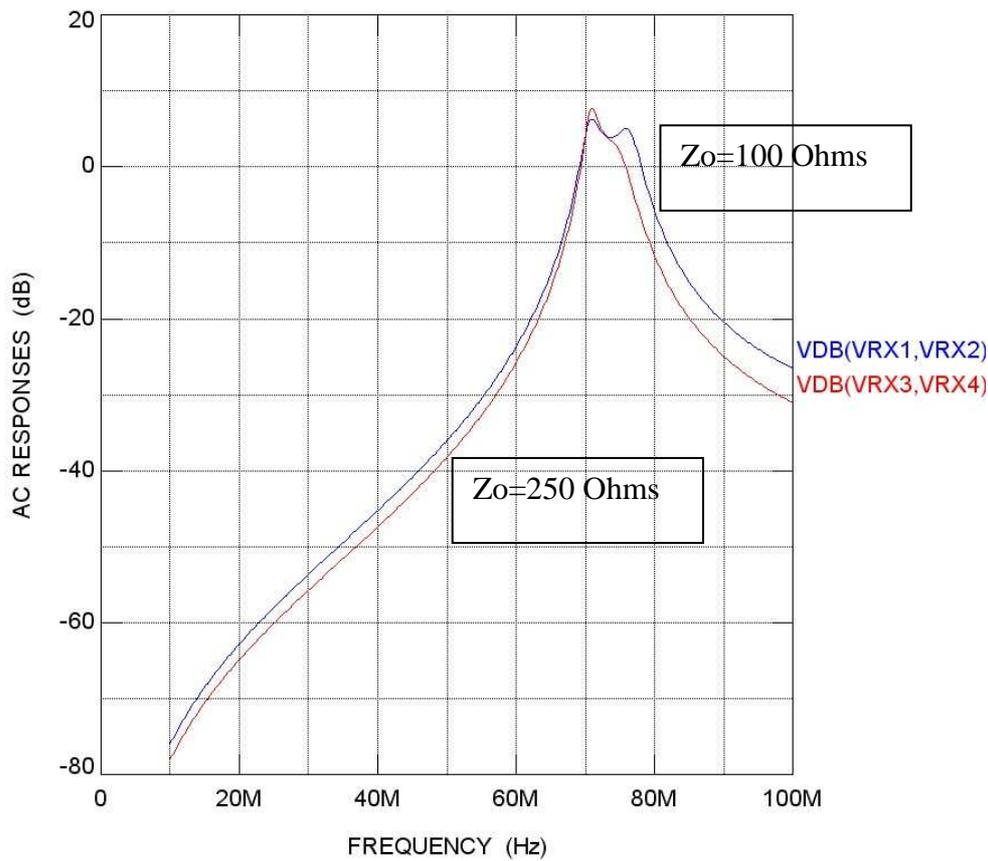
Pour RX1-72MHz, la référence de gain est $G_o=7\text{dB}$ à 72MHz

On obtient les résultats suivants :



On part d'une réponse à +7dB pour le Récepteur sur son antenne de 1m ; on perd donc 22dB à 72MHz pour $Z_o=250$ Ohms et 15dB pour $Z_o=100$ Ohms.

On améliore encore les choses en intercalant une capacité à l'entrée du RX: 33pF pour $Z_o=100$ Ohms ; 9pf pour $Z_o=250$ Ohms. On obtient alors la réponse suivante :

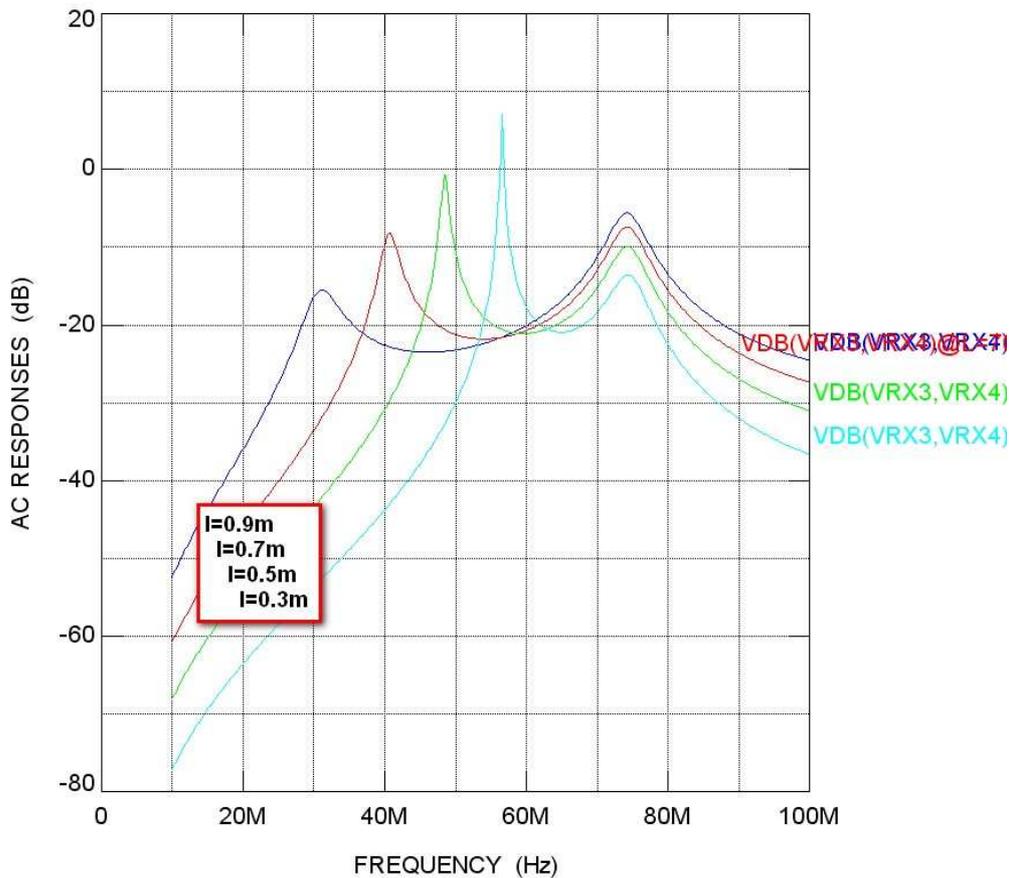


On retrouve encore le gain initial (7dB) dans les 2 cas de figure pour quasiment les mêmes capacités de compensation que précédemment à l'entrée du RX.

Les remarques précédentes sur le RX1-72MHz s'appliquent donc encore : on préférera un Z_o de 100 Ohms.

7.1.2.3 Influence de la longueur d'antenne externe

Sans re-réglage de l'antenne, y a-t-il une longueur optimale ?



A 72MHz, il n'y a que 8 dB d'écart entre une antenne de 30cm et une de 90cm. On observe 2 pôles : un qui bouge beaucoup avec la longueur d'antenne et l'autre indépendant en fréquence de l'antenne. C'est ce dernier pôle qui pilote les pertes vers 72MHz.

7.2 Lancer-main

Les paramètres sont :

$C1=70\text{pF}$

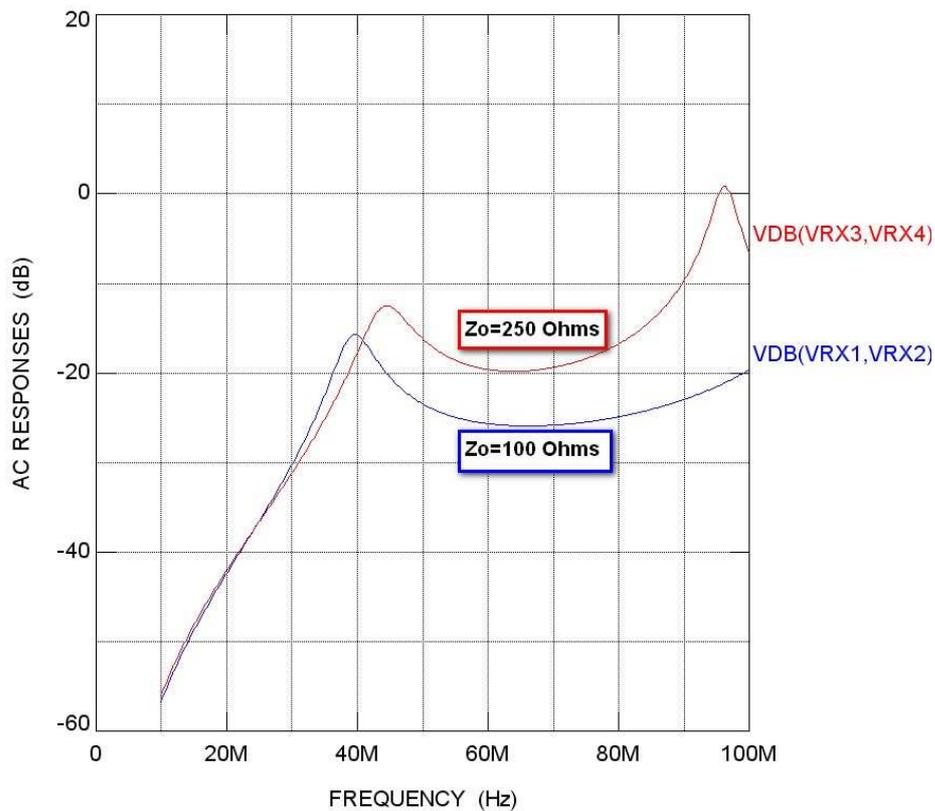
$TD=2.1\text{ns}$ qui correspond à 70cm avec $\epsilon=1$.

$TD=2.5\text{ns}$ si $\epsilon=1.4$

Longueur d'antenne extérieure : 22cm

7.2.1 RX2-41MHz

On obtient le résultat suivant :



La référence de gain dans ce cas étant : $G=12\text{dB}$, on voit que l'on perd 27dB de gain dans cette configuration.

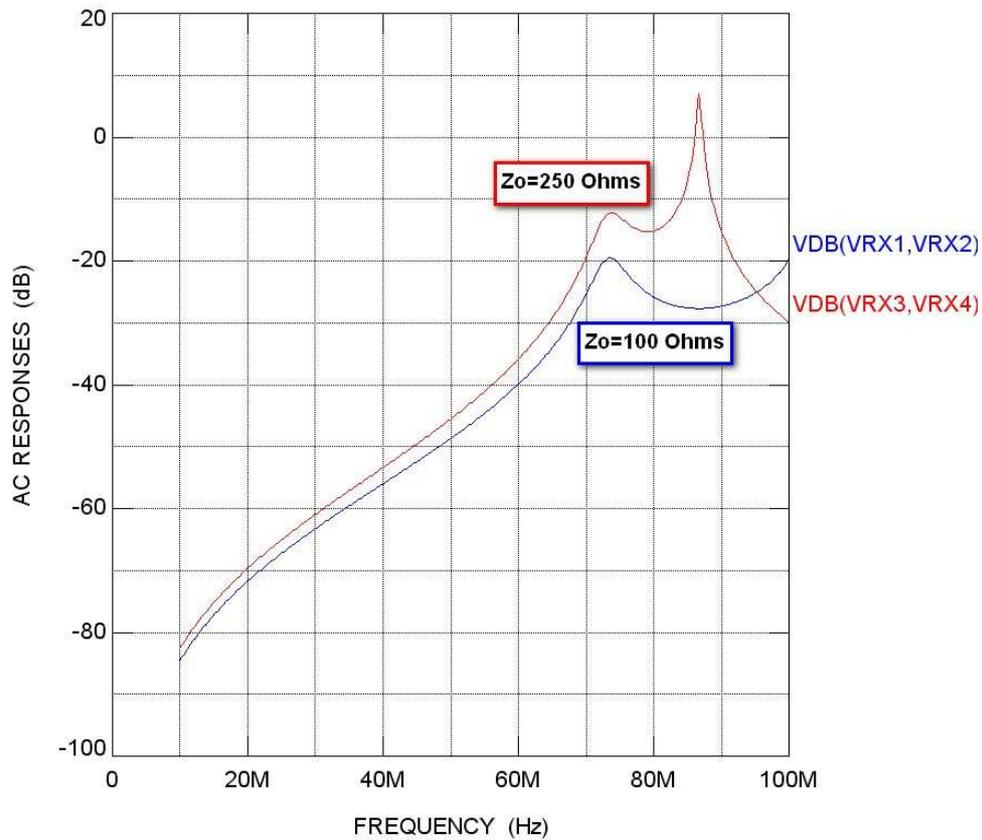
Pour $Z_o=100\text{ Ohms}$, on ne gagnera rien avec seulement un élément en série.

Pour $Z_o=250\text{ Ohms}$, en insérant 400nH en série avec le RX, on gagne 3dB (maigre butain , vis-à-vis de la perte initiale).

C'est un cas typique où, il faut rallonger l'antenne en 41 MHz : passer à 30 ou 40cm malgré l'esthétique et la trainée induite.

7.2.2 RX2-72MHz

Dans ce cas nous obtenons :

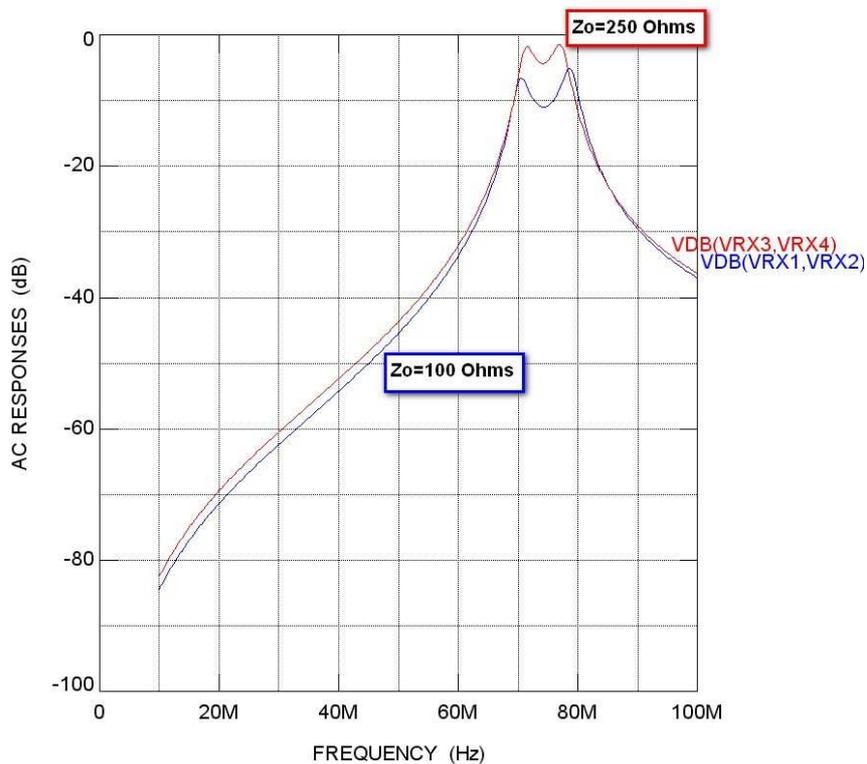


Ayant une référence de gain de 7dB , les pertes sont à 72MHz:

24dB pour $Z_o=250\text{ Ohms}$

29dB pour $Z_o=100\text{ Ohms}$

La encore, c'est une inductance série qu'il faut rajouter à l'antenne diminuer les pertes :



Il a fallu rajouter une inductance de 140nH pour ramener les pertes à :

11dB pour $Z_o=250\text{Ohms}$

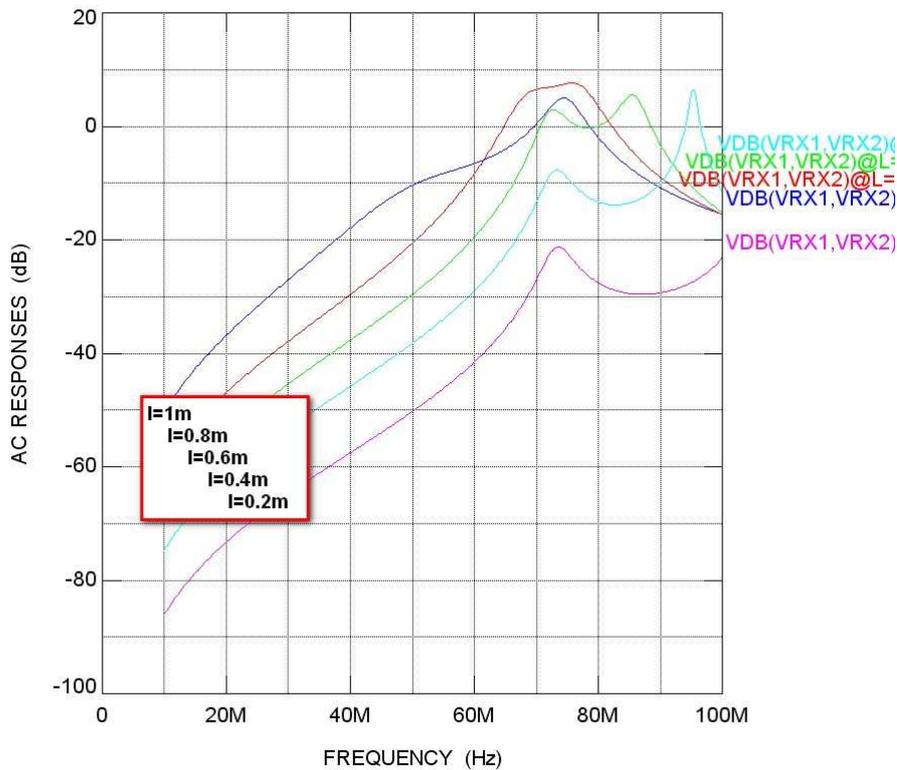
13dB por $Z_o=100\text{Ohms}$

Ce résultat semble plausible pour un petit planeur: pour gagner du gain, il faut rallonger l'antenne par une inductance.

Cette adaptation a de plus l'avantage de supprimer la réponse parasite à fort gain qui pouvait se trouver dans les bandes FM.

7.2.3 Influence de la longueur d'antenne

Sans ré-accorder l'antenne, les pertes en fonction de la longueur du bout d'antenne extérieure sont :



De 0.2 à 0.6m, on voit très clairement l'intérêt d'augmenter la longueur du brin qui dépasse !
 On double la portée (+6dB) tous les 10cm en plus !
 Au-delà de l=0.6m il n'y a pas d'intérêt à l'augmenter.

8 TABLEAUX DE SYNTHÈSE

Le tableau suivant concerne un planeur de 2m80 d'envergure type F3X, dont la longueur d'antenne extérieure a été prise à 50cm. Ce tableau permet de voir l'influence de la longueur d'antenne autour de cette valeur et l'influence d'un réglage éventuel à l'entrée du RX.

l=50cm/ F3F	41MHz		72MHz	
Zo=100 Ohms	RX1	RX2	RX1	RX2
atténuation (dB)	32dB	24dB	18dB	15dB
sensibilité à la longueur dB/10cm	6dB/10cm	3dB/10cm	3dB/10cm	1,5dB/10cm
réaccord d'antenne pertes associées	33pf /12dB	33pf /20dB	22pf / 0dB	33pf / 0dB
l=50cm/ F3F	41MHz		72MHz	
Zo=250 Ohms	RX1	RX2	RX1	RX2
atténuation (dB)	25dB	16dB	26dB	22dB
sensibilité à la longueur dB/10cm (sans accord)	1dB/10cm	1dB/10cm	2dB/10cm	1dB/10cm
réaccord d'antenne / pertes associées	33pf / 6dB	33pf / 13dB	8pf / 0dB	9pf / 0dB

Le tableau suivant concerne un petit planeur de 1m25 d'envergure. La longueur d'antenne a été prise à 20cm ; la conclusion est qu'il vaut mieux rajouter 10cm pour la sécurité du modèle et un réglage simple pourrait être très bénéfique.

l=20cm/ HLG	41MHz		72MHz	
Zo=100 Ohms	RX1	RX2	RX1	RX2
atténuation (dB)		28dB	18dB	29dB
sensibilité à la longueur dB/10cm (sans accord)		8dB/10cm	8dB/10cm	8dB/10cm
réaccord d'antenne / pertes associées		28dB	18dB	140nH / 14dB
l=20cm/ HLG	41MHz		72MHz	
Zo=250 Ohms	RX1	RX2	RX1	RX2
atténuation (dB)		28dB	18dB	24dB
sensibilité à la longueur dB/10cm (sans accord)		8dB/10cm	10dB/10cm	10dB/10cm
réaccord d'antenne / pertes associées		400nH / 25dB	40nH / 3dB	140nH / 10dB

9 CONCLUSIONS

- L'adaptation en puissance entre le Récepteur et l'antenne est plus importante que la longueur de l'antenne elle-même.
- Augmenter le gain de conversion de l'antenne de 6dB revient à doubler la portée.
- Systématiquement on perd de la portée avec un récepteur monté sans réglages dans un fuselage carbone.
- Pour un F3X, ces pertes peuvent aller jusqu'à 26dB avec 50cm de fil extérieur : la portée est alors diminuée dans un rapport 16 environ!
- Cette dégradation est variable d'un type de récepteur à l'autre, ceci dépendant de la structure de l'étage d'entrée du récepteur.
- D'une manière générale on peut améliorer les choses en ré-accordant l'antenne avec une capacité ou une inductance série suivant les cas. Néanmoins dans nombres de cas on ne pourra pas revenir à une bonne adaptation en puissance antenne <-> Récepteur. On perdra alors en sensibilité. Ces réglages peuvent être faits par essais successifs en comparant la portée au sol.
- Bien souvent sont créées des réponses parasites dont les gains sont plus élevés, dans des bandes utilisées également. Ceci peut être gênant et détériorer encore davantage la sensibilité.
- Comment disposer l'antenne dans le fuselage ? : Il n'y a pas de règle absolue. Cela dépend de la fréquence et des dimensions du modèle : En général, il vaut mieux être écarté du fuselage (Zo plus élevé), quand la partie réactive de l'antenne est élevée : antenne courte ou fréquence plus basse.
- Pour les petits modèles, les mêmes règles s'appliquent, avec le plus souvent un accord d'antenne par inductance au lieu d'une capacité. On peut tolérer un peu plus de pertes sachant que le modèle évolue moins loin.
- Dans tous les cas un test au sol est nécessaire pour valider l'installation

10 REFERENCES

Reference Data for Radio Engineers (ITT)

TopSPICE pour les simulations circuits.

RFSIM99 pour les simulations RF en paramètres S (optimisation des adaptations).