

Simulations d'antennes avec le programme EZNEC.

Par HB9BLF, François.

EZNEC est un programme de calcul d'antennes sur PC. Il a été développé par Roy W. Lewallen, W7EL. EZNEC signifie « Easy-NEC ». Ce programme est basé sur NEC « Numerical Electromagnetic Code », qui est un programme de calcul développé il y a longtemps déjà par une université américaine. NEC a été utilisé intensivement pour des applications civiles et militaires...

EZNEC analyse la structure d'antenne que vous avez définie, et vous fournit ses caractéristiques électriques, qui sont :

- Le gain maximal de l'antenne, à sa fréquence de travail.
- Son diagramme de rayonnement
- Son impédance en fonction de la fréquence

L'antenne doit être définie comme un ensemble de fils de longueurs et de diamètres variables. Chaque fil est divisé en un certain nombre de segments. NEC calcule le courant dans chaque segment en utilisant la méthode des moments. Le champ rayonné, le gain, l'impédance d'entrée sont calculés à partir des courants.

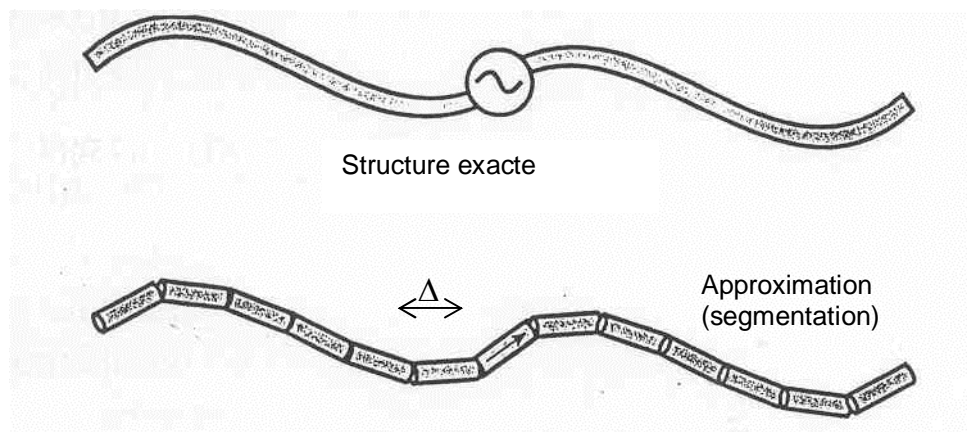


Fig. 1 : Segmentation d'un fil d'antenne.

Comme tout programme de calcul, NEC utilise des approximations. Il considère que les fils sont très minces par rapport à la longueur d'onde. Le courant dans chaque segment est dirigé exactement dans l'axe du segment, et il a la même amplitude tout le long du segment ; il y a discontinuité de l'amplitude et du sens du courant lors de la transition d'un segment à l'autre. Chaque segment participe au rayonnement EM, et influence aussi le courant dans les autres segments.

La longueur d'un segment doit être plus petite que un dixième de la longueur d'onde ($\Delta \leq \lambda/10$) ; un dipôle demi-onde $\lambda/2$ doit être divisé en au moins en 5 segments. Les résultats sont plus précis si l'on augmente le nombre de segments, au détriment du temps de calcul qui augmente. J'utilise systématiquement $\Delta \leq \lambda/20$

Le point d'alimentation de l'antenne est une source de tension située au milieu d'un segment. Les segments contigus au segment d'alimentation doivent avoir la même longueur.

Les figures 2 et 3 illustrent certaines limitations du programme.

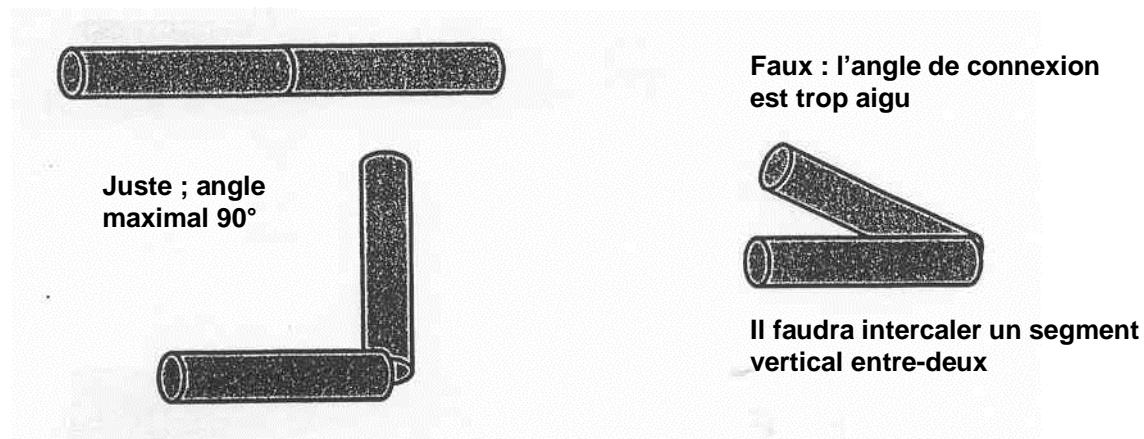


Fig. 2 : Angles de connexions possibles entre 2 fils.

Utiliser des angles de connexions plus faibles que 90° augmente les erreurs de calcul.

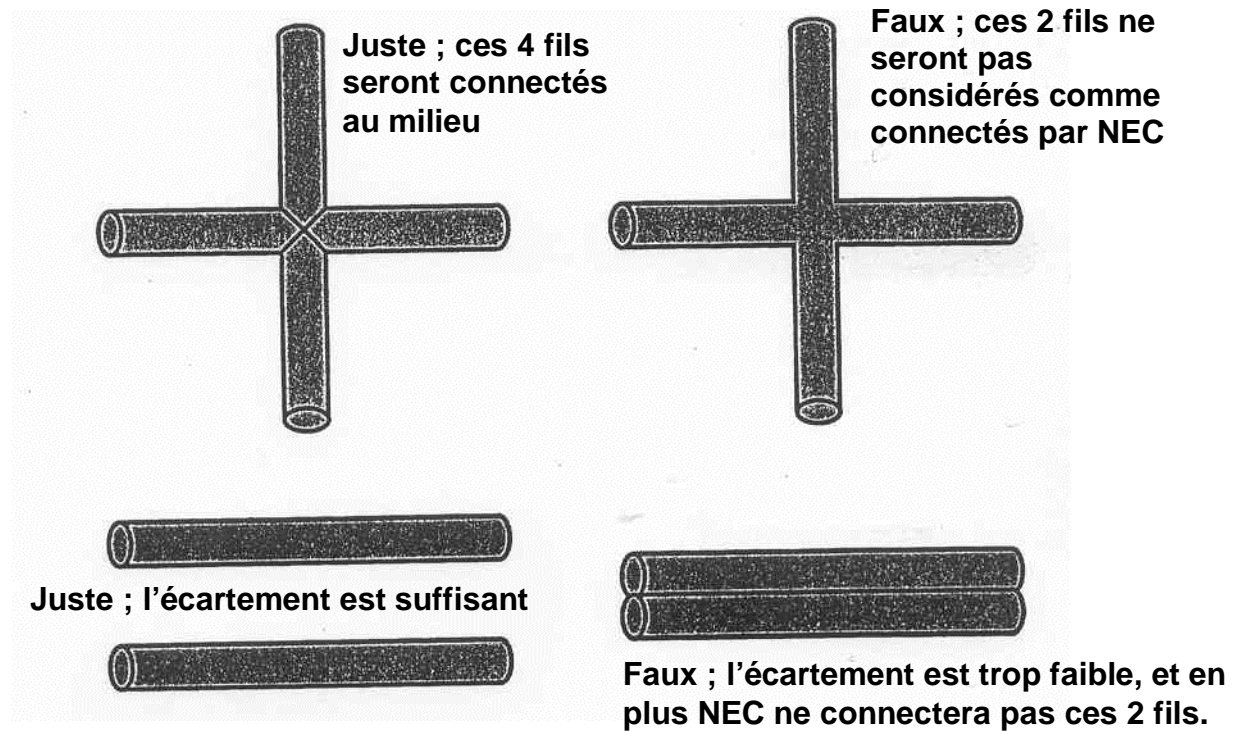


Fig. 3 : Les segments ne doivent pas être superposés.

Les versions 2 et 3 du programme sont accessibles aux amateurs ; elles peuvent être obtenues à des QST assez faibles. Il existe la version EZNEC4-pro pour les professionnels ; celle-ci est beaucoup plus onéreuse, avec en plus le prix d'une licence auprès d'une université américaine pour le programme de base NEC4. Le site <http://www.eznec.com> donne tous les détails sur les différentes versions, pour amateurs ou professionnels.

Le chapitre suivant montre comment fonctionne le programme.

Utiliser EZNEC.

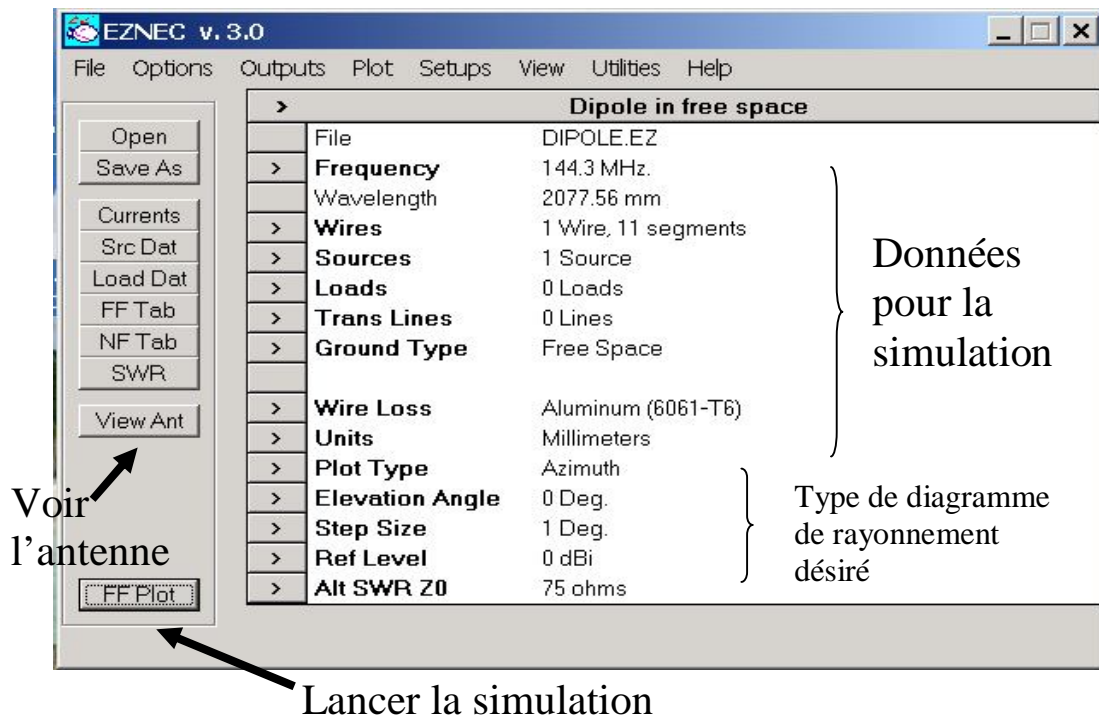
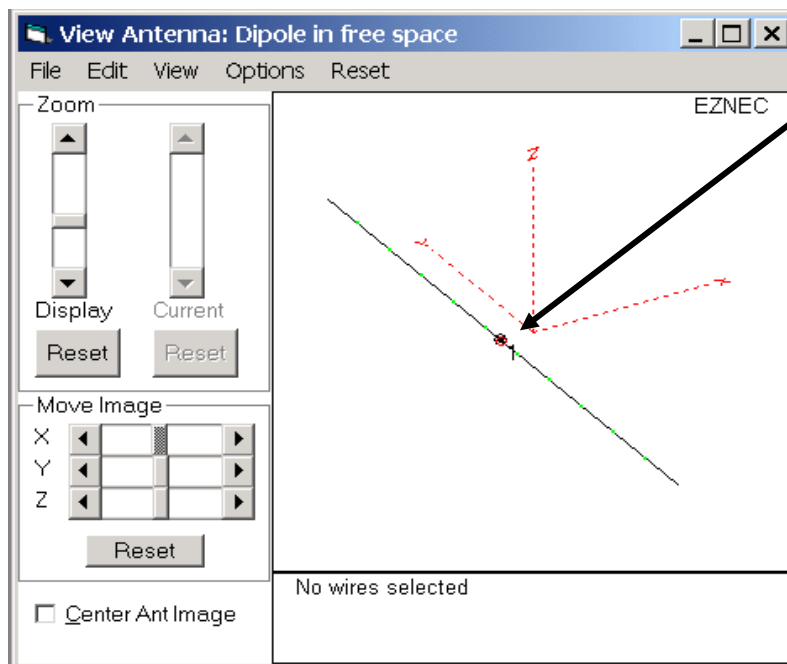


Fig. 4 : L'écran de contrôle principal de EZNEC

Pour travailler avec EZNEC, vous devez d'abord décrire l'antenne que vous voulez analyser.

- Cliquez sur le bouton « wires » de l'écran principal à la figure 4. La fenêtre correspondante (fig. 6) s'ouvre. Vous devez entrer la description de votre antenne comme un ensemble de fils rectilignes de diamètres et de longueurs variables. Chaque fil est défini par les coordonnées (X,Y,Z) de ses extrémités.
- Vous devez aussi indiquer où est situé le point d'alimentation de l'antenne. Ouvrez la fenêtre « sources » à la figure 6. La source du signal est en général au milieu d'un fil.
- Si votre antenne contient des trappes ou des résistances, vous pouvez les modéliser en entrant les valeurs des éléments L, C ou R correspondants. C'est la fenêtre « loads »
- Les lignes de transmission appartenant à la partie « rayonnante » de l'antenne peuvent être décrites dans la fenêtre « Trans Lines »
- EZNEC permet d'analyser l'effet du sol sur le diagramme de rayonnement vertical de l'antenne, ce qui est très important dans le cas des antennes ondes courtes. On peut choisir entre 11 types de sol ayant des caractéristiques électriques différentes, depuis l'eau salée en passant par les terrains riches ou rocailleux et enfin le sable sec. Si l'on désire faire une simulation dans l'espace libre (c à d sans inclure l'effet du plan de sol dessous l'antenne) il faut imposer : « Ground Type = Free Space »

Exemple de simulation simple : l'antenne dipôle demi-onde.



Le point d'alimentation est ici au milieu du dipôle.

Les 3 axes x,y,z sont dessinés en rouge

Fig. 5 : Visualisation de l'antenne après un clic sur « View Ant »

L'antenne dipôle dans l'espace libre (sans plan de sol) est la structure la plus simple à modéliser. Elle ne comporte que 1 fil et une source. Voir les fenêtres « wires » et « sources » à la figure 6.

Wires										
No.	End 1			Conn	End 2			Conn	Diameter (mm)	Segs
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)			
1	0	-497.059	0		0	497.059	0		1.98824	11
*										

Sources							
No.	Specified Pos.		Actual Pos.		Amplitude (V, A)	Phase (deg)	Type
	Wire #	% From E1	% From E1	Seg			
1	1	50	50	6	1	0	1
*							

Fig. 6 : Fenêtres de spécifications « wires » et « sources »

Dans cet exemple, le fil du dipôle a une épaisseur de 2mm environ. Il est défini par les coordonnées de ses extrémités END1 = (0,-497mm,0) et END2 = (0,+497mm,0) La simulation exige que chaque fil soit divisé en un nombre impair de segments. La longueur maximale d'un segment doit être inférieure à $0.1 \cdot \lambda$. Ici on a divisé le fil en 11 segments de longueurs $0.05 \cdot \lambda$.

La source est placée sur le fil no 1, au milieu du segment no 6, c à d au milieu du dipôle.

Vous devez encore indiquer la fréquence de travail ; 144.3MHz, à la figure 4. La valeur de la longueur d'ondes apparaît en dessous.

Décidez encore quel type de diagramme vous voulez. Nous avons choisi ici (fig. 4) :

- Plot Type = Azimutal
- Angle d'élévation = 0° . Attention : Si vous avez choisi un type de sol différent de « free space », vous aurez un rayonnement toujours nul à l'angle d'élévation de 0° (!)
- Step size = 1° . Vous obtenez une valeur de gain pour chaque degré d'angle entre 0° et 360° .
- Ref Level = 0dBi

Lancez la simulation en cliquant sur « FF Plot ». Le graphique du gain en fonction de l'angle (fig. 7) s'affiche à la fin du temps de calcul.

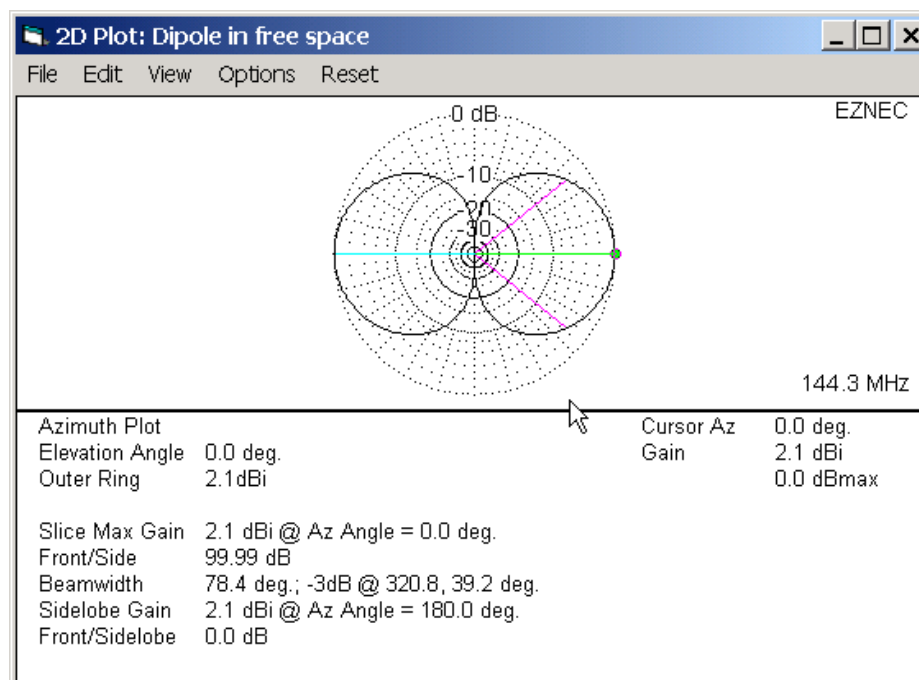


Fig. 7 : Gain de l'antenne dipôle 144MHz en fonction de l'angle azimutal.

Sur le graphique de la page 7, le cercle « 0dB » correspond au gain maximum de l'antenne (« Outer Ring » = 2.1dBi). L'angle d'ouverture à -3dB (Beamwidth) de même que le rapport avant/arrière sont affichés en dessous du graphe. Lorsque vous déplacez le curseur sur le graphe vous obtenez le gain absolu en dBi pour chaque angle désiré.

Maintenant, on aimerait aussi savoir si l'impédance de l'antenne est correcte. Cliquez sur le bouton « SWR » à la figure 4. Définissez les fréquences minimum et maximum de même que le pas de simulation dans la fenêtre ad-hoc et lancez le calcul.

La fenêtre « SWR Plot » s'affiche comme à la figure 8.

La valeur de l'impédance de référence Z_0 pour le calcul du SWR est indiquée en haut à gauche. J'ai choisi $Z_0=75\Omega$ (cliquez sur le bouton Alt SWR Z_0 à la fig. 4), car l'impédance d'un dipôle en espace libre est proche de cette valeur. On obtient $SWR=1.04$ sur 144.3MHz.

Si on utilise la valeur par défaut $Z_0=50\Omega$ on obtient $SWR\geq 1.4$ sur toute la bande.

Si maintenant vous amenez le curseur sur 144.3MHz, vous voyez apparaître en dessous la valeur correspondante de l'impédance de ce dipôle :

$$Z(144.3MHz)=72,14\Omega + j0.2\Omega$$

A 144.3MHz, la partie réactive de l'impédance est proche de $j\bullet 0\Omega$. Cela signifie que l'antenne simulée avec ses dimensions actuelles résonne exactement sur 144.3MHz.

La connaissance de la valeur de l'impédance permet de calculer un circuit d'adaptation d'impédance entre la ligne de transmission et l'antenne.

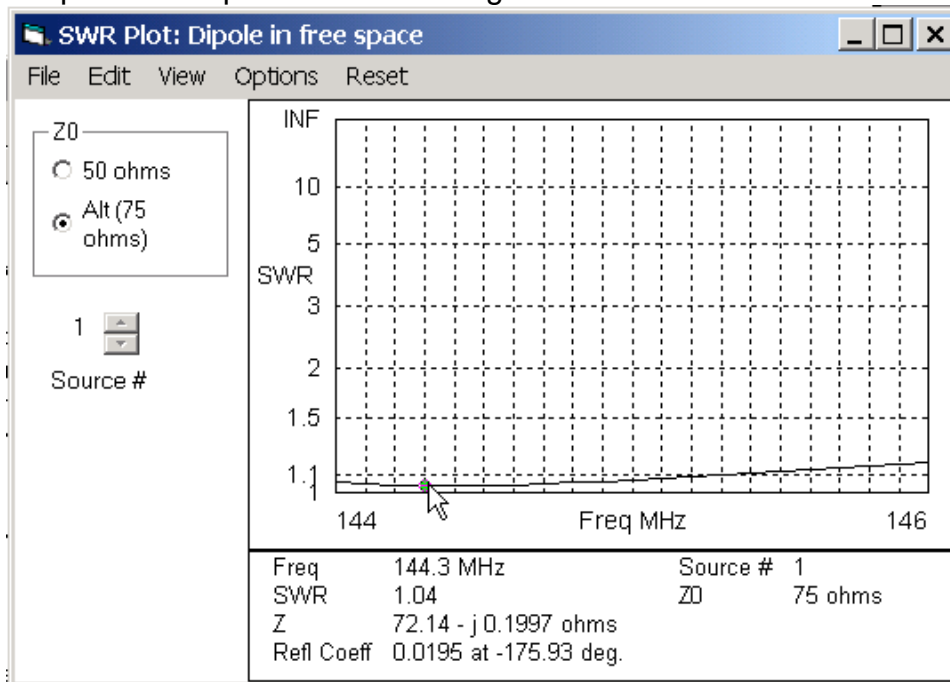


Fig. 8 : SWR de l'antenne dipôle entre 144 et 146MHz.

Cet exemple simple a permis de faire rapidement le tour du programme.

EZNEC permet de simuler des structures bien plus complexes qu'un simple dipôle, et aussi d'inclure l'effet du sol sur l'impédance et le rayonnement de l'antenne.

Le programme contient un « Test Drive » qui permet de se familiariser avec son utilisation par des exemples préparés. Le fichier d'aide est une documentation complète.

Ceux qui désirent les fichiers « Test_Drive.doc » et « Building_the_model.doc » (fichier d'aide) peuvent me les demander.

Antennes verticales 144MHz.

Voilà maintenant un exemple un peu plus compliqué.

C'est le cas d'une antenne demi-onde verticale placée sur le toit d'une voiture. Le plan conducteur du toit est simulé par une grille dont les mailles ont la dimension 0.1λ . Comme l'antenne est placée sur un pied magnétique vers l'arrière de la voiture, le plan métallique fait par le toit est plus grand devant que derrière. Le fichier descriptif est nettement plus gros que pour le dipôle. Il contient 138 fils (463 segments) et 1 source. La figure 9 est une vue de l'antenne avec son plan de masse.

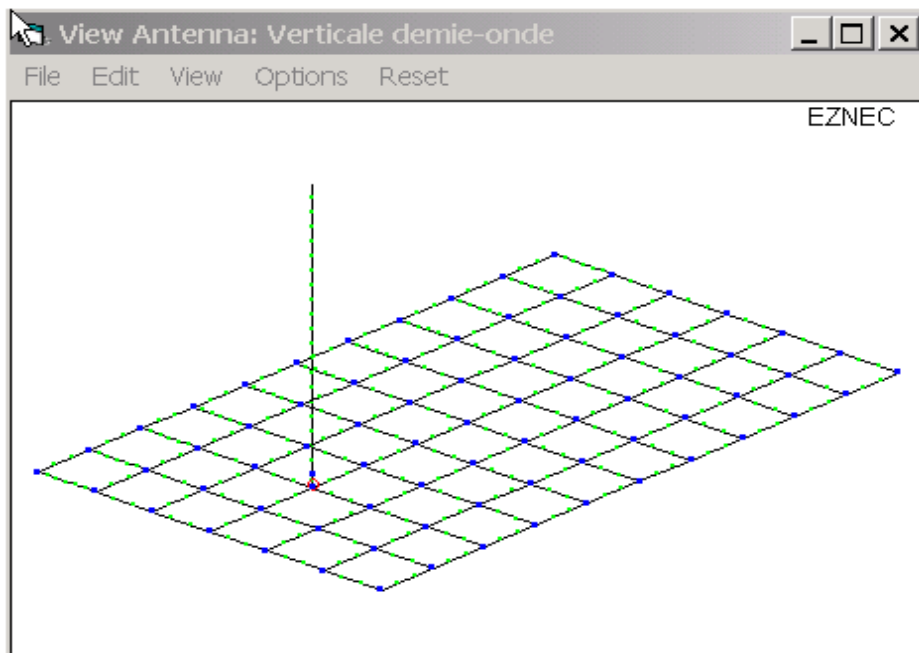


Fig. 9 : Modèle de l'antenne demi-onde sur un toit de voiture

La simulation inclut cette fois l'effet du plan de sol en dessous et autour de la voiture. Le diagramme de rayonnement en fonction de l'angle d'élévation est présenté à la figure 10, pour un angle azimutal de 0° .

On voit que le gain maximal de cette antenne vaut 2.9dBi, mais qu'il est obtenu vers l'arrière de la voiture, c à d là où le plan métallique est le plus court.

Le diagramme de rayonnement est assez plat, avec un gain valant 2.2dBi pour un angle d'élévation vers l'avant ou vers l'arrière de 9° .

L'impédance au bas de l'antenne valait $Z=1700\Omega$ à la résonance, ce qui est normal pour une antenne demi-onde attaquée à son extrémité. Un circuit d'adaptation a été ajouté pour transformer cette impédance sur 50Ω .

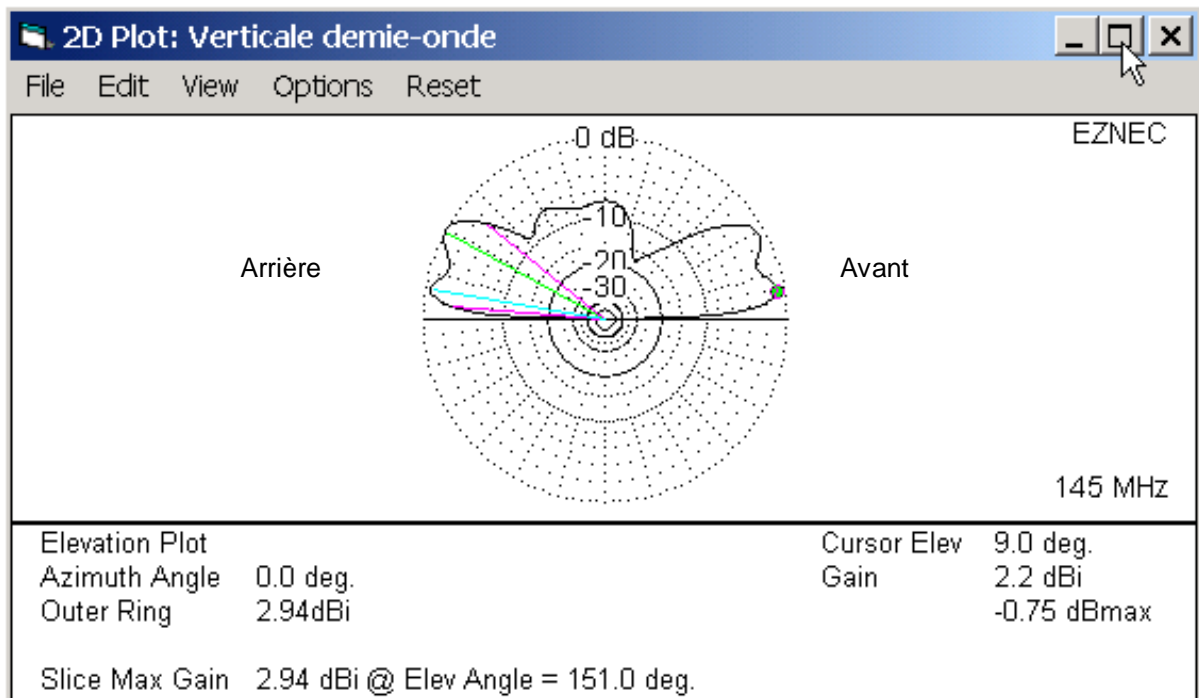


Fig. 10 : Diagramme de rayonnement vertical de l'arrière à l'avant de la voiture

Il est d'usage de penser qu'une antenne verticale ne rayonne pas contre le ciel, et en tout cas pas « droit en haut » !

Eh bien c'est faux ! Cette antenne rayonne aussi droit vers le haut en direction de sa pointe ! Il y a bien un « trou » dans le diagramme de rayonnement mais pour un angle vertical de 64° et non de 90°. La raison est que l'antenne n'est pas réduite seulement à son élément vertical qui est l'élément rayonnant principal, mais que la structure complète inclut aussi le toit de la voiture dessous.

Le rayonnement vers le haut est causé par l'asymétrie du plan métallique sous l'antenne ; les courants HF induits dans le toit ne sont pas identiques vers l'avant et l'arrière. Ce sont les courants HF induits dans le toit de la voiture qui provoquent ce rayonnement droit vers le haut. Cet exemple montre que toutes les masses métalliques au voisinage de l'élément rayonnant principal font partie de l'antenne !

La figure 11 suivante est une comparaison des diagrammes de rayonnement des antennes $\lambda/4$ et $\lambda \cdot 5/8$:

- On voit que la $\lambda/4$ rayonne davantage vers le haut. Les diagrammes des antennes $\lambda/2$ (fig. 10) et $\lambda \cdot 5/8$ étant plus « plats », ces antennes seront plus efficaces. L'antenne $\lambda/4$ a un gain max. de 3dB mais pour un angle d'élévation de 30°. Elle a un gain de 0.5dB à 1dB sous un angle d'élévation de 10°. L'antenne $\lambda \cdot 5/8$ a un gain max. de 2.9dB pour un angle d'élévation de 10°.
- L'impédance de la $\lambda/4$ vaut $Z=25\Omega$ à la résonance, ce qui donne $SWR=2$
- L'impédance de la $\lambda \cdot 5/8$ reste haute. Comme avec la $\lambda/2$, son impédance doit être transformée sur 50Ω par un circuit d'adaptation.

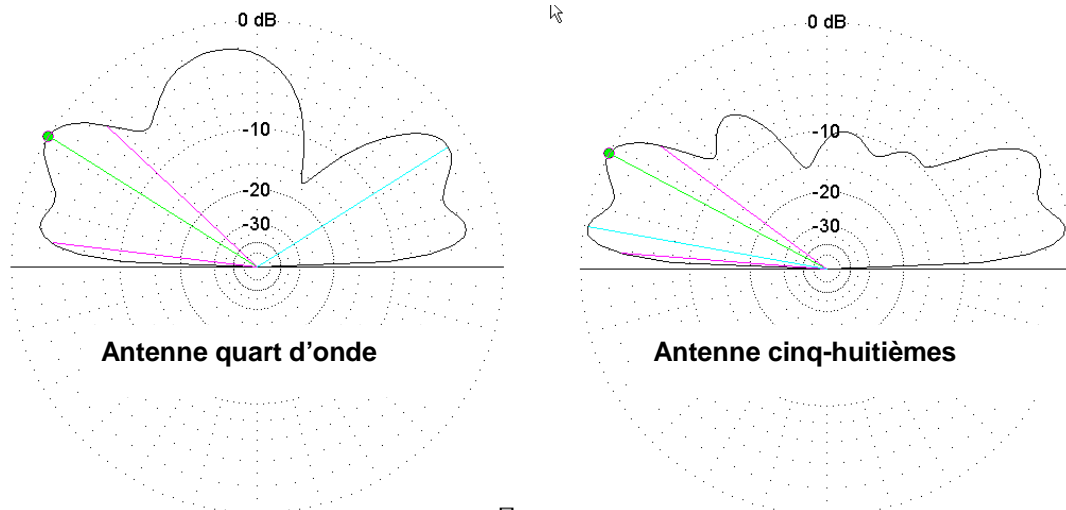
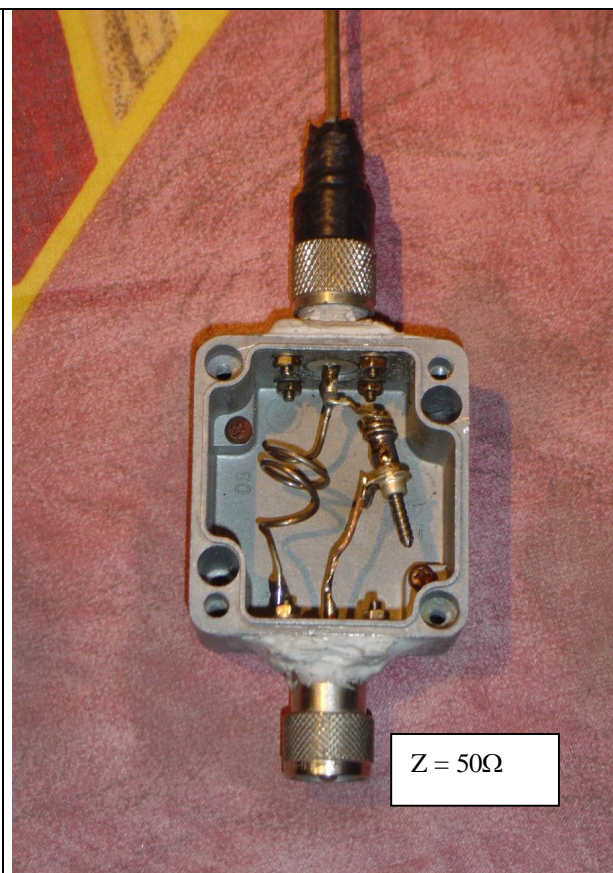
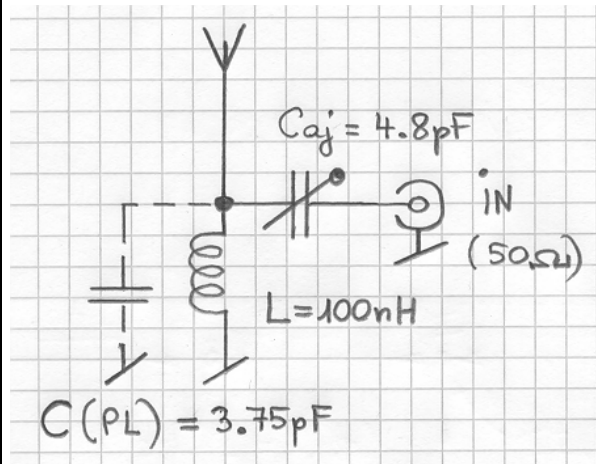


Fig. 11 : Comparaison des diagrammes de rayonnement verticaux des antennes $\lambda/4$ et $\lambda \cdot 5/8$

Circuit d'adaptation pour l'antenne demi-onde

Il comporte une self et un condensateur. L'élément vertical a une longueur de 1m. Son extrémité est plantée dans une fiche PL qui assure la connexion à la boîte d'accord.

La capacité parasite de la prise PL et la capacité de couplage résonnent ensemble avec la self sur 145MHz



Des courants et tensions importants sont mis en jeu dans le circuit d'adaptation si la puissance est élevée. Par exemple avec $P=150W$ la tension au pied de la verticale vaut $U_{RF}=400V_{RMS}$!!