

Conception avancée d'un dipôle par l'utilisation de l'IA et de 4NEC2

Jean-Luc Levant – F4GSC

Le but d'une bonne conception d'un dipôle est de transmettre une puissance maximale et d'avoir une réception optimale à la fréquence de travail. Pour y arriver, les dimensions de l'antenne doivent être réglées correctement:

- **La longueur des deux brins** : Elle permet le réglage de la fréquence de résonance du dipôle ;
- **L'inclinaison des brins** : Elle agit sur le ROS. L'angle permet l'adaptation du dipôle à l'impédance de sortie de l'émetteur ;
- **La hauteur** : Elle influence à la fois la résonance et le ROS. Celle-ci se mesure entre le point d'alimentation de l'antenne et le plan sol.



Figure 1. Le dipôle 28 MHz en V inversé.

Modèle électrique d'une antenne

Une antenne peut être modélisée par une impédance complexe, c'est-à-dire comportant à la fois des éléments actifs (qui rayonnent l'énergie) et réactifs (qui l'emmagasinent localement sans la rayonner) :

- **Éléments réactifs ($X_{\text{Réac}}$)** : Ils prennent électriquement la forme d'une inductance ou d'une capacité. Cette partie réactive emmagasine de l'énergie qui ne participe pas directement au rayonnement de l'antenne. La conception doit donc faire tendre cette valeur vers zéro ;
- **Éléments actifs ($R_{\text{Ray}} + R_{\text{Pert}}$)** : Ils se modélisent sous la forme d'une résistance pure. Ils comportent une partie qui modélise la perte ohmique (résistance du fil) et une autre qui modélise le rayonnement de l'énergie radiofréquence. C'est cette dernière qu'il faut optimiser et qui est à l'origine de la propagation des ondes.

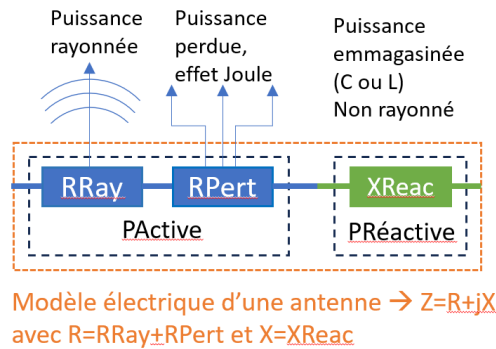


Figure 2. Modélisation d'une antenne.

Conception du dipôle

Il existe plusieurs façons pour construire son antenne. Celle qui est la plus connue est la méthode empirique. Je décris une méthode plus avancée qui permet de mieux connaître le comportement de son antenne en fonction de l'ajustement des dimensions ;

Méthode empirique

Cette méthode consiste à calculer, à partir d'une équation, la longueur de chaque brin du dipôle. Une fois ceux-ci coupés, on procède par itération pour obtenir la résonance sur la fréquence de travail souhaitée. Puis, pour optimiser le ROS, il faut alors jouer sur la hauteur et sur l'inclinaison des deux brins.

Méthode avancée

Cette méthode est plus directe et elle consiste à utiliser un calculateur électromagnétique 3D pour déterminer les dimensions du dipôle. J'utilise 4NEC2 pour sa simplicité d'emploi. Comme pour tous les outils, il est nécessaire d'en connaître l'usage, et cela peut demander un peu de temps pour mettre en œuvre 4NEC2. Je ne détaillerai pas son utilisation dans cet article, mais vous trouverez un document de formation qui en explique l'usage au travers de plusieurs exemples (1). Vous trouverez aussi le lien pour accéder à l'installation de cet outil (2).

L'IA (3) (Claude Opus) peut aider à générer le fichier de la géométrie de l'antenne qui sera chargé dans 4NEC2 ainsi que les paramètres nécessaires au calcul 3D. Celui-ci fournit alors différents résultats caractérisant les performances de l'antenne (SWR, impédance, diagramme de rayonnement...). De plus, cet outil possède une fonction d'optimisation qui permet d'ajuster automatiquement les dimensions de l'antenne, par exemple pour optimiser le ROS ou bien encore pour régler la fréquence de fonctionnement, en précisant les dimensions sur lesquelles il doit jouer.

Conception d'un dipôle 28 MHz

Nous voulons concevoir un dipôle qui résonne sur 28,5 MHz et qui doit transmettre le maximum de puissance (ROS proche de 1). L'IA va fournir le fichier de géométrie et de préparation à la simulation à importer dans 4NEC2. Ce fichier possède l'extension *.nec.

Voici le prompt à copier et à coller dans l'IA.

Génère le fichier antenne VInverse28MHz.nec avec le logiciel 4NEC2, d'un dipôle horizontal en V inversé dont l'angle est de 35 degrés, la fréquence de résonance de 28.5 MHz et la hauteur au point d'alimentation de 5 m.

La réponse de l'IA est le fichier produit pour 4NEC2 et qui décrit la géométrie de notre dipôle en V inversé. Je n'expliquerai pas la syntaxe et je renvoie ceux que cela intéresse à ce lien (1).

```
CM Dipole en V inverse - resonance 28.5 MHz (bande 10 m)
CM Hauteur au point d'alimentation : 5.00 m
CM Angle des brins : 35 deg sous l'horizontale (angle au sommet 110 deg)
CM Brin incline : 2.538 m (x2) + fil central 0.10 m = 5.176 m de fil au total
CM Fil cuivre diametre 2 mm, sol reel moyen (Sommerfeld, er=13, s=0.005 S/m)
CM Impedance calculee a 28.5 MHz : env. 59 + j0 ohms
CE
GW 1 21 -2.1287 0 3.5444 -0.05 0 5.0 0.001
GW 2 1 -0.05 0 5.0 0.05 0 5.0 0.001
GW 3 21 0.05 0 5.0 2.1287 0 3.5444 0.001
GE 1
LD 5 0 0 0 5.8E7
GN 2 0 0 0 13 0.005
EX 0 2 1 0 1 0
FR 0 1 0 0 28.5 0
RP 0 37 73 1000 0 0 5 5
EN
```

La figure ci-dessous présente la description de la géométrie une fois le fichier *.nec chargé.

Symbols		Geometry		Source/Load		Freq./Ground		Others		Comment	
Default straight line wire-element											
Nr	Type	Tag	Segs	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Radius	comment
1	Wire	1	21	-2.1287	0	3.5444	-0.05	0	5.0	0.001	
2	Wire	2	1	-0.05	0	5.0	0.05	0	5.0	0.001	
3	Wire	3	21	0.05	0	5.0	2.1287	0	3.5444	0.001	

Figure 3. Coordonnées et dimensions des brins du dipôle.

La figure ci-dessous illustre la géométrie en 3D, ce qui permet de vérifier si la description est correcte.

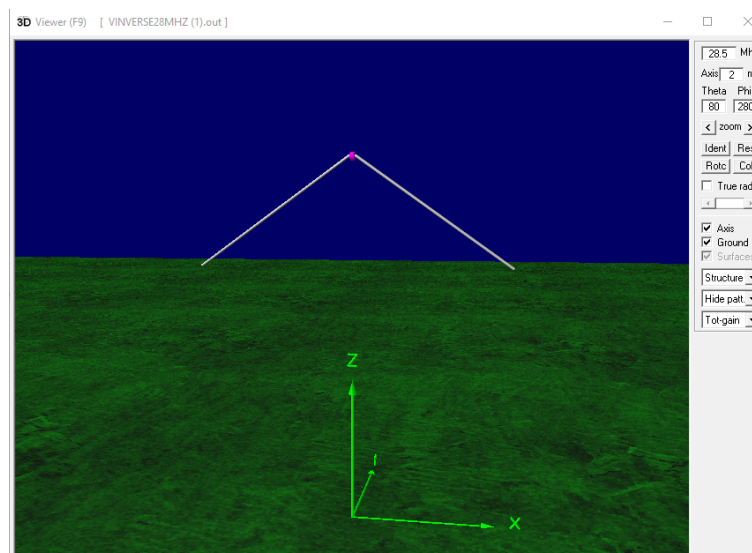


Figure 4. Vue 3D de notre antenne.

Lançons le calcul pour balayer la bande de fréquences de 28 à 30 MHz en appuyant sur la petite calculatrice en haut à droite de la fenêtre (« Generate (F7) »).

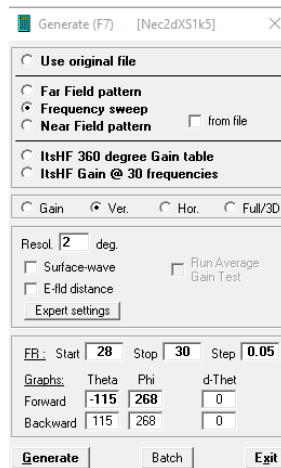


Figure 5. Fenêtre de configuration du calcul 3D, accessible en appuyant sur la touche « F7 ».

La figure ci-dessous montre le résultat du calcul. Celle-ci affiche l'évolution du ROS en fonction de la fréquence.

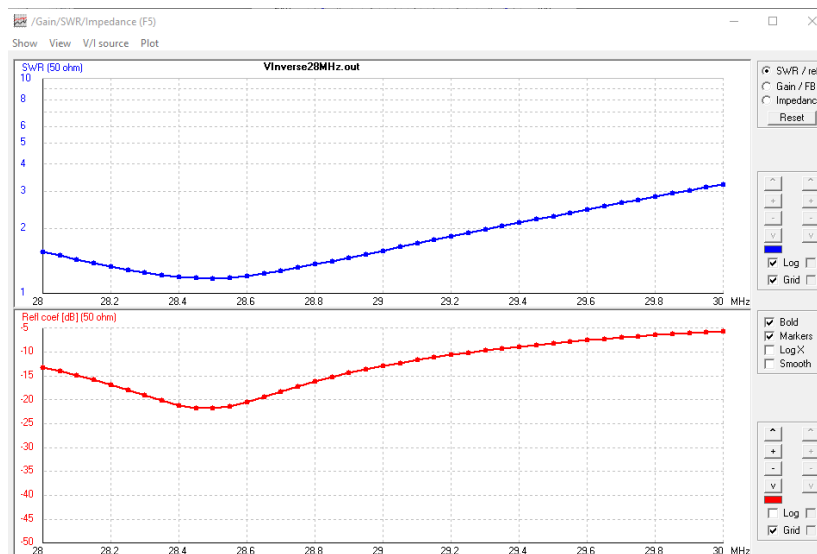


Figure 6. Le ROS en fonction de la fréquence.

La fréquence de résonance est de 28,5 MHz, mais le ROS n'est pas à son minimum. Lançons maintenant le calcul en champ lointain (Far Field pattern) pour connaître le diagramme de rayonnement de notre dipôle en 3D.

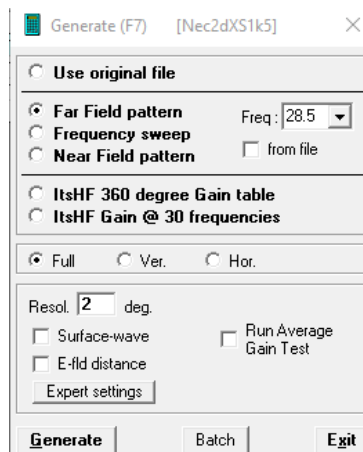


Figure 7. Le calcul en champ lointain à 28,5 MHz.

La figure ci-dessous montre la forme du diagramme de rayonnement de notre dipôle inversé. La directivité est conforme à celle d'un dipôle. Elle est maximale dans le plan perpendiculaire à celui formé par les deux brins.

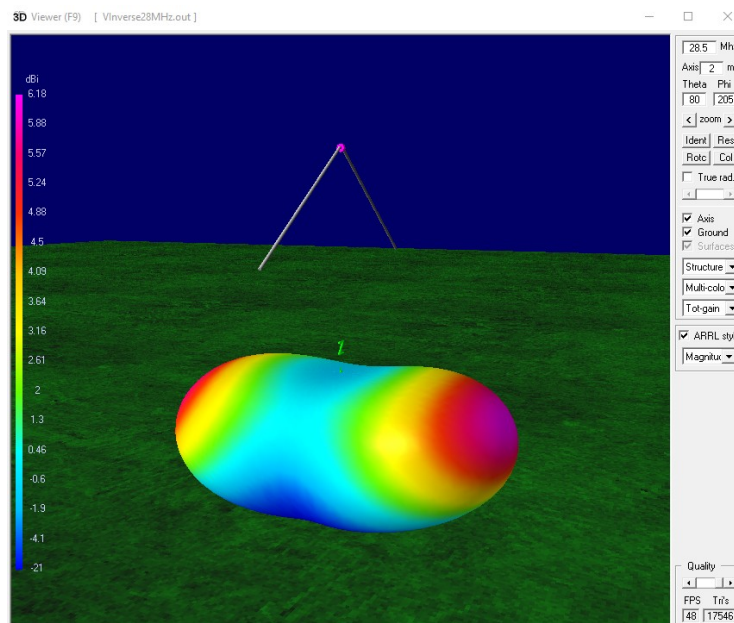


Figure 8. Diagramme de rayonnement du dipôle inversé.

Dans la description ci-dessus, les dimensions et les coordonnées sont données « en dur ». Pour changer l'angle, la hauteur, la longueur des brins..., il faudrait alors modifier à la main chacune des valeurs. Pour faciliter l'analyse de l'effet d'une modification des paramètres de l'antenne, nous allons remplacer certaines valeurs de la description par des symboles.

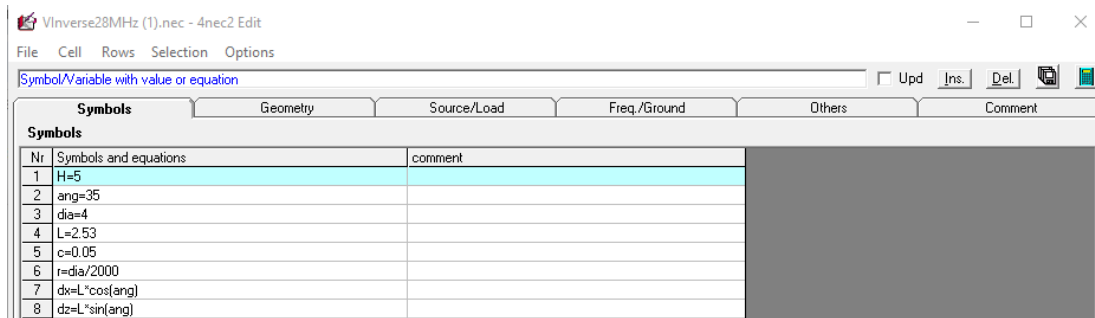
Voici le prompt à copier et à coller dans l'IA.

Peux-tu créer des symboles H (5 m par défaut), angle (35 degrés par défaut) et diamètre du fil (4 mm par défaut) ?

Les symboles importants pour dimensionner le dipôle sont décrits ci-dessous:

- **H** : est la hauteur mesurée au point d'alimentation de l'antenne ;
- **ang** : est l'angle mesuré entre le brin incliné et l'horizontale du plan de sol, exprimé en degrés ;

- **dia** : est le diamètre du fil constituant le dipôle, exprimé en mm ;
- **L** : est la longueur mesurée entre le point d'alimentation et l'extrémité. Elle est exprimée en mètres.



VinVerse28MHz (1).nec - 4nec2 Edit

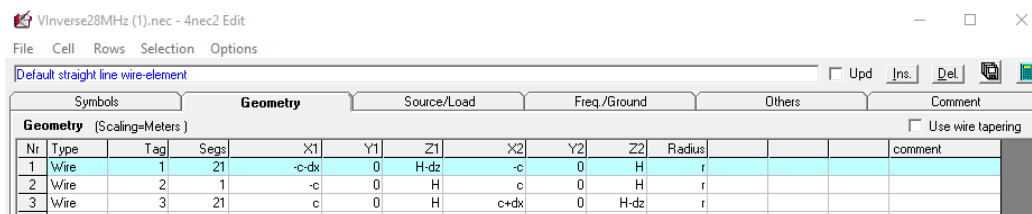
File Cell Rows Selection Options

Symbol/Variable with value or equation ☐ Upd ☐ Ins ☐ Del ☐ Print

Symbols		Geometry	Source/Load	Freq./Ground	Others	Comment
Nr	Symbols and equations	comment				
1	H=5					
2	ang=35					
3	dia=4					
4	L=2.53					
5	c=0.05					
6	r=dia/2000					
7	dx=L*cos(ang)					
8	dz=L*sin(ang)					

Figure 9. Utilisation des symboles.

La figure ci-dessous décrit la géométrie de l'antenne en utilisant les symboles pour faciliter l'analyse et l'optimisation des dimensions.



VinVerse28MHz (1).nec - 4nec2 Edit

File Cell Rows Selection Options

Default straight line wire-element ☐ Upd ☐ Ins ☐ Del ☐ Print

Symbols		Geometry		Source/Load	Freq./Ground	Others	Comment
Geometry (Scaling=Meters)							
Nr	Type	Tag	Segs	X1	Y1	Z1	comment
1	Wire	1	21	-c-dx	0	H-dz	
2	Wire	2	1	-c	0	H	
3	Wire	3	21	c	0	H	

Figure 10. Description de la géométrie avec l'emploi des symboles.

Cherchons maintenant à optimiser ROS en maintenant la fréquence de travail à 28.5 MHz.

Copions et collons le prompt ci-dessous dans l'IA.

Lance un jeu de calculs pour optimiser le SWR en fonction de l'angle et de la longueur des brins tout en maintenant la fréquence de résonance à 28.5 MHz.

Voici le résultat des différentes étapes d'optimisation menées par Claude. Il en ressort que l'angle optimisé est de 43 degrés et que la longueur des brins est de 2,548 m. Le SWR est alors de 1 et l'impédance de 50,2 ohms.

Angle	L brin	R à 28,5 MHz	ROS 28,5	ROS 28,0	ROS 29,0	Hauteur des bouts
0°	2,505 m	72,1 Ω	1,44	1,61	1,69	5,00 m
20°	2,515 m	69,4 Ω	1,39	1,58	1,65	4,14 m
30°	2,525 m	63,1 Ω	1,26	1,52	1,57	3,74 m
35°	2,533 m	58,7 Ω	1,17	1,50	1,53	3,55 m
40°	2,542 m	53,6 Ω	1,07	1,50	1,50	3,37 m
43°	2,548 m	50,2 Ω	1,00	1,53	1,50	3,26 m
45°	2,553 m	47,8 Ω	1,05	1,55	1,51	3,19 m
50°	2,566 m	41,6 Ω	1,20	1,68	1,59	3,03 m
60°	2,602 m	28,2 Ω	1,77	2,28	2,09	2,75 m

Figure 11. Évolution du ROS en fonction de l'angle et de la longueur du brin.

Il n'y a que les symboles qui changent, puisque la description géométrique est inchangée.

VInverse28MHzSymbOpt1.nec - 4nec2 Edit

File

Cell

Rows

Selection

Options

Symbol/Variable with value or equation

Upd

Ins

Del

Symbols	Geometry	Source/Load	Freq./Ground	Others	Comment
Symbols					
Nr	Symbols and equations		comment		
1	H=5		hauteur au point d'alimentation (m)		
2	ang=43		inclinaison des brins (deg) - valeur optimisee		
3	dia=4		diametre du fil (mm)		
4	L=2.548		longueur d'un brin incline (m) - valeur optimisee		
5	c=0.05		demi-longueur du fil central (m)		
6	r=dia/2000		rayon du fil (m)		
7	dx=L*cos(ang)				
8	dz=L*sin(ang)				

Figure 12. Les symboles mis à jour avec l'outil d'optimisation.

La figure ci-dessous montre les performances de l'antenne optimisée, avec un ROS proche de 1 et une résonance maintenue à 28,5 MHz.

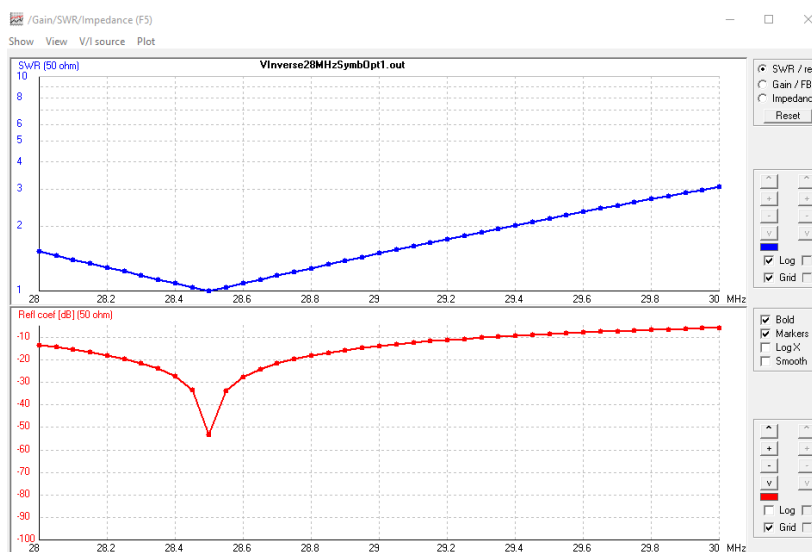


Figure 13. Le ROS est proche de 1 et la fréquence de résonance est maintenue à 28,5 MHz.

Conclusions

Nous avons maintenant les ordres de grandeur de notre dipôle 28 MHz et nous savons comment le ROS et la fréquence de résonance varient en fonction de l'angle, de la longueur du brin et de la hauteur au point d'alimentation. Les ordres de grandeur sont pertinents.

Lors de la réalisation, nous saurons donc comment jouer sur ces différents paramètres pour régler le ROS et la fréquence de résonance. D'autres paramètres plus marginaux ne sont pas pris en compte, mais ils pourront influencer, dans une moindre mesure, les performances.

L'IA nous a donc permis de décrire la géométrie de notre dipôle sans même nous soucier de la syntaxe du fichier de description. Nous avons pu aller directement à l'analyse et à l'optimisation des dimensions.

L'IA nous permet aussi de mieux appréhender le fonctionnement de notre antenne et d'être moins à l'aveugle sur le réglage des différents paramètres. C'est donc un excellent outil d'apprentissage et de formation.

Notes

(1) https://arml.r-e-f.org/download/Developpement_antennes_Decametriques-40m80m.zip

(2) <https://qsl.net/4nec2/4nec2.zip>

(3) <https://claudio.ai>

Lien pour obtenir les fichiers 4NEC2 d'essai utilisés pour cette publication. <https://arml.r-e-f.org/download/A3.zip>