



Dominique Auprince, F6EPY
dominique_au91@yahoo.com

Modélisation d'antenne

par les radio-amateurs

Conférence sur la simulation d'antennes, F6KLO

15 avril 2023

Intro

D'où viennent les programmes de modélisation d'antennes ?, comment fonctionnent-ils ?, quelles sont leurs limites ?, quel est l'état de l'art ? Ces questions et d'autres seront répondues par Dominique, F6EPY, à l'occasion de ce tutoriel d'introduction à la modélisation d'antenne.

La chronologie historique des événements qui ont conduit à la simulation électromagnétique par ordinateur sera présentée.

Quels programmes de modélisation d'antennes sont répandus et gratuits ou peu coûteux ?, les capacités de différents logiciels à gérer diverses formes et matériaux, et qui affichent les résultats sous forme de graphiques, de représentations 3D seront revues.

Cette présentation montrera la puissance de la simulation d'antennes pour résoudre des problèmes pratiques dans la conception des antennes pour la station radio-amateur. Deux applications directes seront particulièrement abordées:

- Comment construire des antennes filaires qui fonctionnent vraiment ?
- Comment simuler et optimiser une antenne yagi pour le contest 50 Mhz ?

Une bonne partie de la session sera interactive et utilisera EZNEC 7.0

Sommaire

Histoire de l'électromagnétisme

Histoire de l'électromagnétisme computationnel (CEM)

Méthode des Moments (MoM)

Programmes de modélisation d'antennes pour radioamateurs

EZNEC

4nec2

MININEC

MMANA-GAL

WiPL-D

FEKO HOBBIES

openEMS

Applications avancées

Modélisation du terrain comme alternative au HFTA

Références et ressources

Logiciel de modélisation d'antennes

Livres sur les antennes

Question fondamentale

Le courant est-il uniforme partout le long d'un fil ?



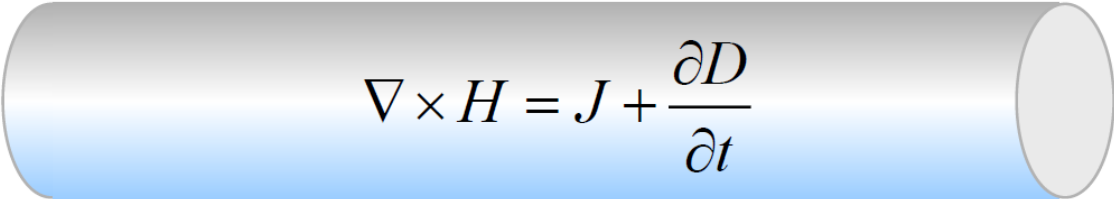
$$I_{in} \stackrel{?}{=} I_{out}$$

Réponse : Cela dépend

"Oui" pour le courant continu en régime permanent

"Presque oui" pour le courant alternatif basse fréquence ou les fils courts

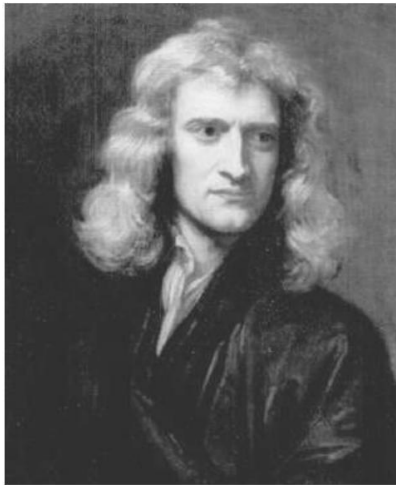
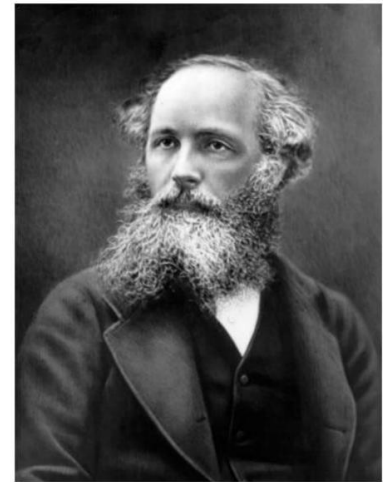
Mais "non" pour le courant alternatif haute fréquence car les électrons peuvent se regrouper ... James Clerk Maxwell a trouvé un moyen de répondre par une série d'équations


$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$
$$0 = \oiint_S \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS$$
$$I_{in} = I_{out} + \frac{\partial}{\partial t} \oiint_S D_n dS$$

Total current, conduction plus displacement current, entering is the same as that leaving every part of a wire !

Histoire de la théorie électromagnétique et des antennes

Qui n'appartient pas à cette histoire ?



Réponse : Léonard de Vinci et Isaac Newton



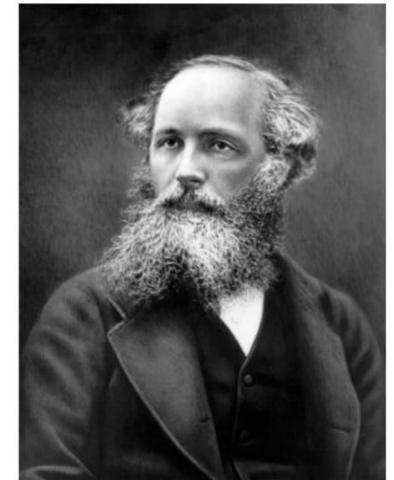
Léonard de Vinci
1452-1519



André-Marie Ampère
1775-1836



Michel Faraday
1791-1867



James Clerk Maxwell
1831-1879



Isaac Newton
1642-1727



Carl Friedrich Gauss
1777-1855



Georg Simon Ohm
1789-1854

Maxwell 1865, ..et les équations dans son traité de 1873

VIII. *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field.* By J. CLERK MAXWELL, F.R.S.

Received October 27,—Read December 8, 1864.

PART I.—INTRODUCTORY.

(1) THE most obvious mechanical phenomenon in electrical and magnetical experiments is the mutual action by which bodies in certain states set each other in motion while still at a sensible distance from each other. The first step, therefore, in reducing these phenomena into scientific form, is to ascertain the magnitude and direction of the force acting between the bodies, and when it is found that this force depends in a certain way upon the relative position of the bodies and on their electric or magnetic condition, it seems at first sight natural to explain the facts by assuming the existence of something either at rest or in motion in each body, constituting its electric or magnetic state, and capable of acting at a distance according to mathematical laws.

In this way mathematical theories of statical electricity, of magnetism, of the mechanical action between conductors carrying currents, and of the induction of currents have been formed. In these theories the force acting between the two bodies is treated with reference only to the condition of the bodies and their relative position, and without any express consideration of the surrounding medium.

These theories assume, more or less explicitly, the existence of substances the particles of which have the property of acting on one another at a distance by attraction or repulsion. The most complete development of a theory of this kind is that of M. W. WEBER*, who has made the same theory include electrostatic and electromagnetic phenomena.

In doing so, however, he has found it necessary to assume that the force between two electric particles depends on their relative velocity, as well as on their distance.

This theory, as developed by MM. W. WEBER and C. NEUMANN†, is exceedingly ingenious, and wonderfully comprehensive in its application to the phenomena of statical electricity, electromagnetic attractions, induction of currents and diamagnetic phenomena; and it comes to us with the more authority, as it has served to guide the speculations of one who has made so great an advance in the practical part of electric science, both by introducing a consistent system of units in electrical measurement, and by actually determining electrical quantities with an accuracy hitherto unknown.

* *Electrodynamische Maassbestimmungen.* Leipzig Trans. vol. i. 1849, and TAYLOR'S Scientific Memoirs, vol. v. art. xiv.

† “*Explicare tentatur quomodo fiat ut lucis planum polarizationis per vires electricas vel magneticas declinetur.*”—Halis Saxonum, 1858.

$$a = \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz} \quad (A) \quad \text{Art. 591}$$

$$b = \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx}$$

$$c = \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy}$$

$$P = c \frac{dy}{dt} - b \frac{dz}{dt} - \frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx}$$

$$Q = a \frac{dz}{dt} - c \frac{dx}{dt} - \frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy} \quad (B) \quad \text{Art. 598}$$

$$R = b \frac{dx}{dt} - a \frac{dy}{dt} - \frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz}$$

$$X = vc - wb \quad (C) \quad \text{Art. 603}$$

$$Y = wa - uc$$

$$Z = ub - va$$

$$a = \alpha + 4\pi A$$

$$b = \beta + 4\pi B \quad (D) \quad \text{Art. 605}$$

$$c = \gamma + 4\pi C$$

$$4\pi u = \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz}$$

$$4\pi v = \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \quad (E) \quad \text{Art. 607}$$

$$4\pi w = \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy}$$

$$\mathfrak{D} = \frac{1}{4\pi} K \mathfrak{E} \quad (F) \quad \text{Art. 608}$$

$$\mathfrak{K} = C \mathfrak{E} \quad (G) \quad \text{Art. 609}$$

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{K} + \mathfrak{D} \quad (H) \quad \text{Art. 610}$$

$$u = p + \frac{df}{dt}$$

$$v = q + \frac{dq}{dt} \quad (H^*)$$

$$w = r + \frac{dh}{dt}$$

$$\mathfrak{E} = (C + \frac{1}{4\pi} K \frac{d}{dt}) \mathfrak{E} \quad (I) \quad \text{Art. 611}$$

$$u = CP + \frac{1}{4\pi} K \frac{dP}{dt}$$

$$v = CQ + \frac{1}{4\pi} K \frac{dQ}{dt} \quad (I^*)$$

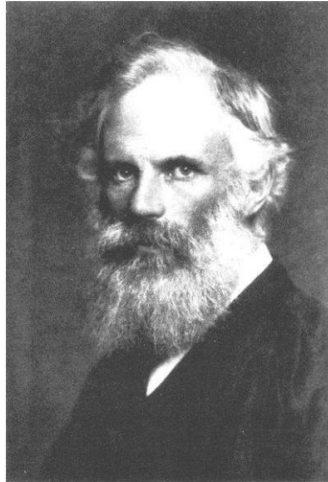
$$w = CR + \frac{1}{4\pi} K \frac{dR}{dt}$$

$$\rho = \frac{df}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dh}{dz} \quad (J) \quad \text{Art. 612}$$

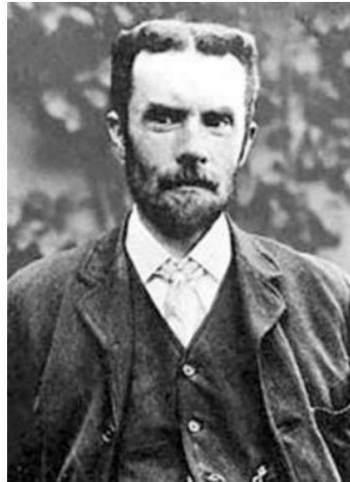
$$\sigma = lf + mg + nh + l'f' + m'g' + n'h' \quad (K) \quad \text{Art. 613}$$

$$\mathfrak{B} = \mu \mathfrak{H} \quad (L) \quad \text{Art. 614}$$

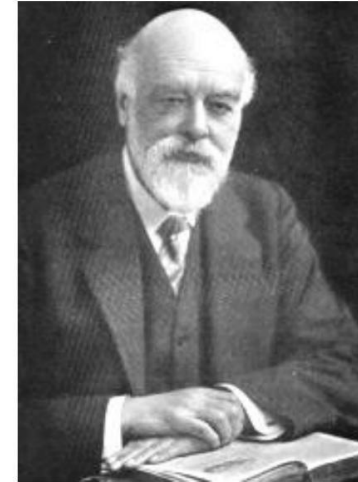
L'école Maxwellienne



George Francis Fitz Gerald
1851-1901



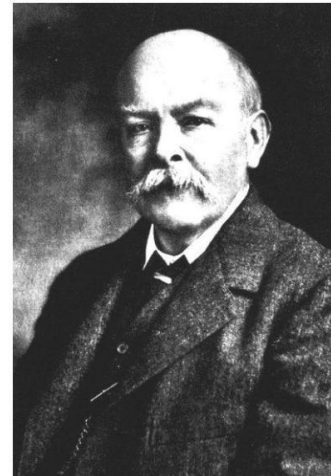
Olivier Heaviside
1850-1925



Loge Olivier Joseph
1851-1940



Heinrich Rodolphe Hertz
1857-1894



John Henry Poynting
1851-1914

La forme moderne des équations de Maxwell, que l'on doit à Heaviside

- Les 4 équations de Maxwell :

Equation de Maxwell-Gauss : $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

→ $\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$ (théorème de Gauss)

Equation de Maxwell-flux : $\operatorname{div} \vec{B} = 0$

→ $\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$ (\vec{B} à flux conservatif)

Equation de Maxwell-Faraday : $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

→ $\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt}$

Equation de Maxwell-Ampère : $\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$

- Equation de conservation de la charge : $\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

La “préhistoire” des antennes

- 1785 Loi de Coulomb
- 1812 Loi de Poisson
- 1813 Théorème de divergence de Gauss – CF Gauss / MV Ostrogradskii
- 1820 Découverte que le courant électrique produit des effets magnétiques (concept de champ non encore articulé) – HC Øersted
- 1820 Découverte que l'électricité et le magnétisme sont des phénomènes liés – André-Marie Ampère
- 1820 Découverte de la loi de Biot-Savart – JB. Biot & P. Savart
- 1820 Publication de la loi d'Ampère – André-Marie Ampère
- 1826 Publication de la loi de Faraday – M. Faraday
- 1831 Découverte du rayonnement – J. Henry
- 1842 « Sur les lignes de force de Faraday » – JC Maxwell
- 1856 « Sur les lignes de force physiques » – JC Maxwell »
- 1861 “Une théorie dynamique du champ électromagnétique » – JC Maxwell
- 1865 “Traité d'électricité et de magnétisme” – JC Maxwell
- 1873 “Traité d'électricité et de magnétisme” – JC Maxwell
- 1879-94 La période « maxwellienne » – O. Heaviside, GF FitzGerald, OJ Lodge

Dates clés de l'histoire des antennes

- 1875-87 Premières démonstrations de rayonnement : TA Edison 1875 ; AE Dolbear 1882; H. Hertz 1887
- 1889-06 Réseaux phasés – A. Artom, SG Brown, JE Murray
- 1895-01 Communication radio, dipôle en éventail, tracés polaires – G. Marconi
- 1897 Dipôle biconique, bobine de charge, réseau d'adaptation LC accordable , contrepoids, « impédance » – OJ Lodge
- 1907 Goniomètre , réseau électrique orientable, radiogoniométrie – E. Bellini et A. Tosi
Pertes au sol, ondes de sol – J.Zenneck
- 1909-26 Problème du demi-espace infini – AN Sommerfeld
- 1919 Arbres comme antennes – G.O. Squier
- 1923 Antenne inclinable – Beverage
- 1928 "Endfire array with parasitic elements" – Yagi and S. Uda
- 1934-37 Radians, courants et pertes de sol – GH Brown
- 1940 Albert Einstein popularise la dénomination "Équations de Maxwell"
- 1947-75 Petites antennes – H. Wheeler

Dates clés de l'histoire des antennes (suite)

- 1948 Limite fondamentale de la bande passante de l'antenne - LJ Chu
- 1950 "Antennas" – JD Kraus
- 1952 Antennes : théorie et pratique – SA Schelkunoff et HT Friis
- 1952 Théorie avancée des antennes - SA Schelkunoff
- 1956 Théorie des antennes cylindriques linéaires - RWP King "Méthode des moments" - AV Kantorovich, GP Akilov
- 1959
- 1961 Manuel d'ingénierie des antennes - H. Jasik
- 1966 Méthode des éléments finis pour les problèmes de champs KS Yee
- 1967 Méthodes matricielles pour les problèmes de champs – RF Harrington
- 1974 Vivaldi antenne – LR Lewis, M. Fasset, M.Hunt
- 1976 Landstorfer antenne – FM Landstorfer
- 2003 Radômes métamatériaux – RW Ziolkowski et AD Kipple
- 2006 Antennes électriquement petites, superdirectives et supraconductrices – Hansen
- 2016 Théorie des antennes , 4 ème édition – CA Balanis

Analyse des Antenne

- Méthodes pour trouver l'impédance sans résoudre le courant distribution

Hypothèse sinusoïdale – Méthode CEM induite (Brillouin, 1922)

Hypothèse bicône mince - Ligne de transmission radiale (Schelkunoff, 1941)

Intégration du diagramme de rayonnement en champ lointain (Rhodes, 1964; Hill, 1967)

- Méthodes pour trouver la distribution de courant et l'impedance

Résolution de l'équation intégrale de Pocklington (1897)

Résolution de l'équation intégrale de Hallen (1938)

Méthodes mathématiques (asymptotiques ou variationnelles)

– King-Harrison (Proc. IRE, 1943)

– Middleton-King (J. Appl. Phys., 1946)

– Stockeur (Cruft Lab., Harvard, 1950)

– Tai (IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1955)

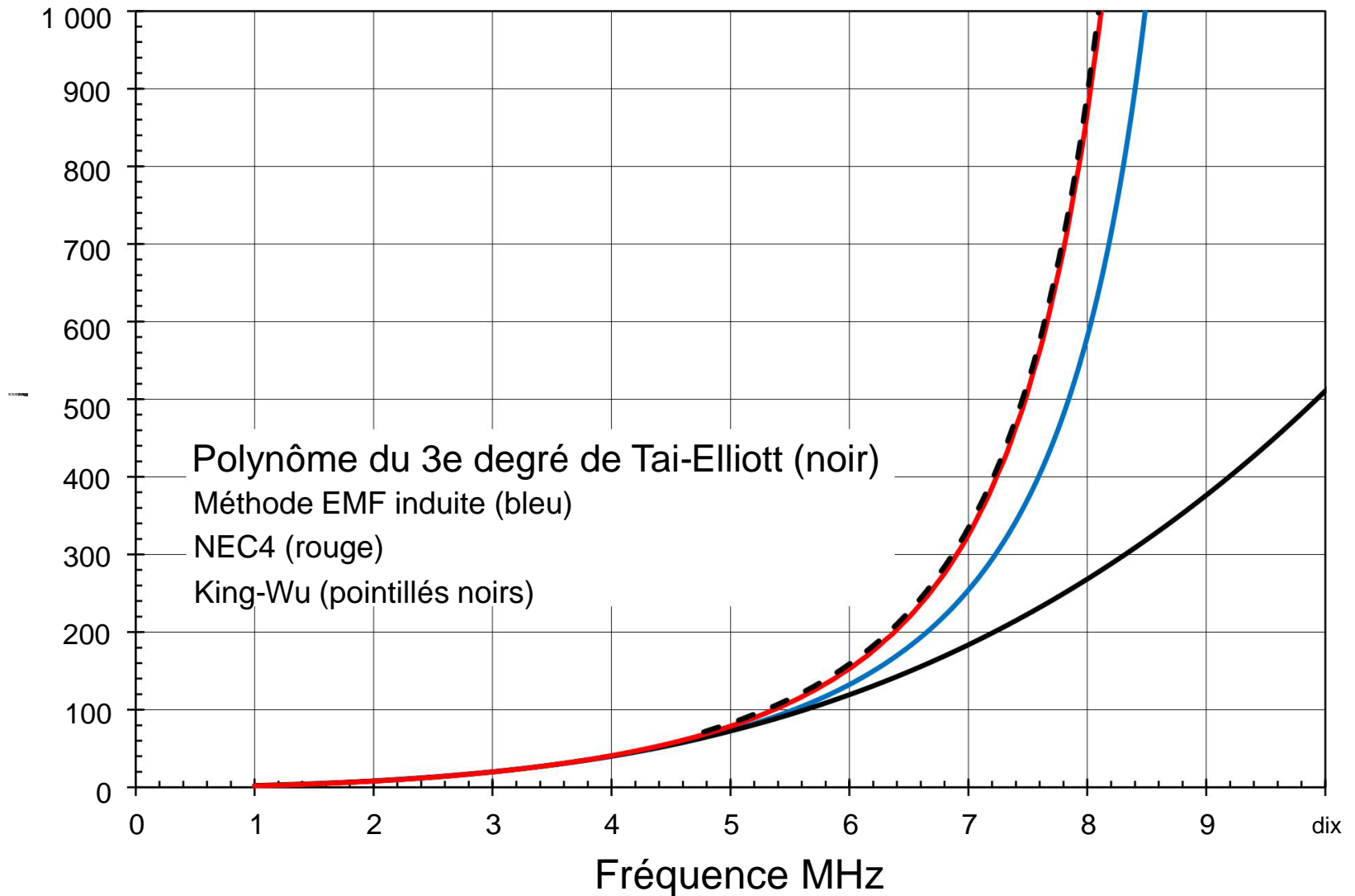
- Limitations et complications

- Toutes les formes d'antennes ne sont pas simples

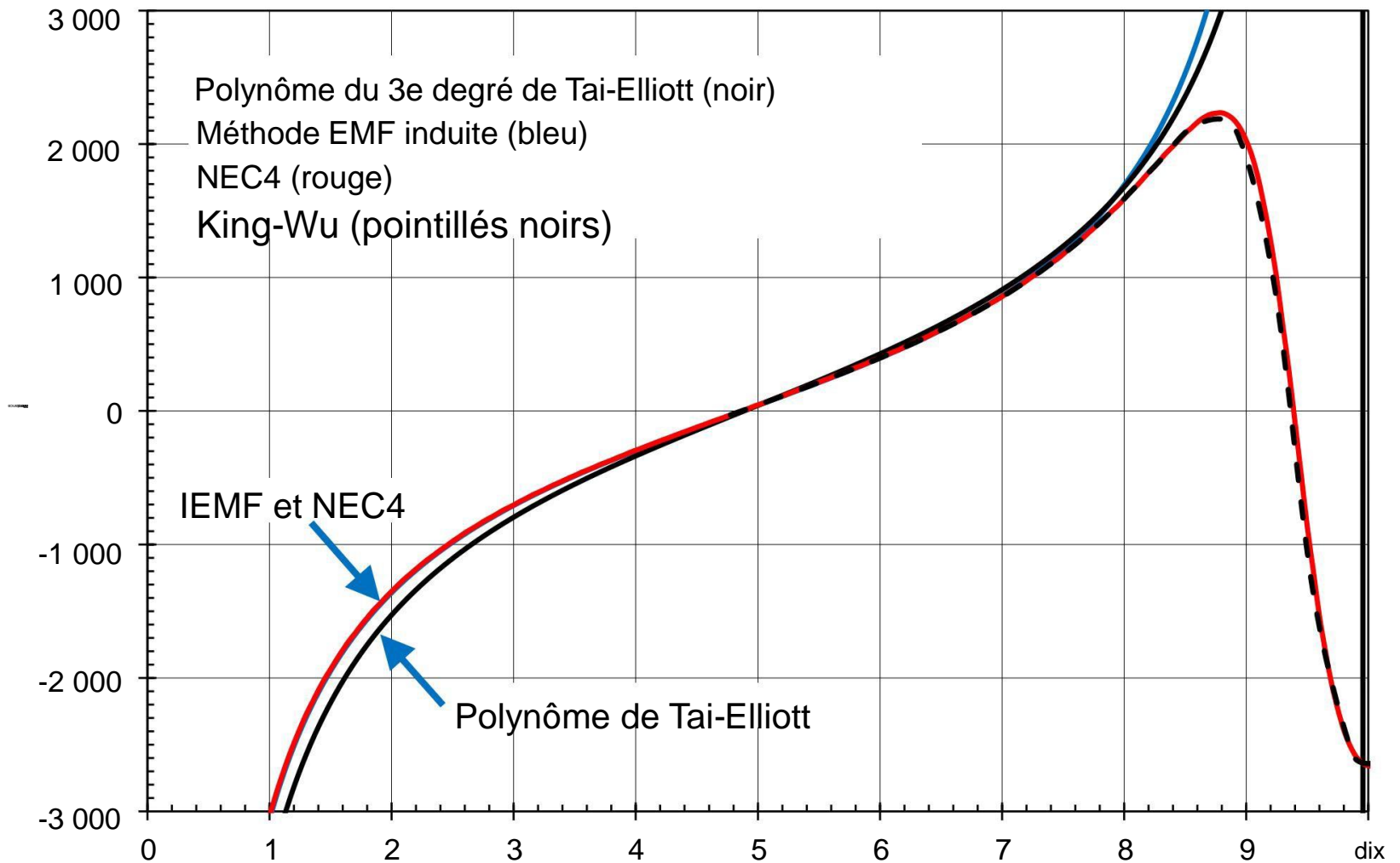
Toutes les antennes ne sont pas en métal ;

Les diélectriques affectent aussi le rayonnement

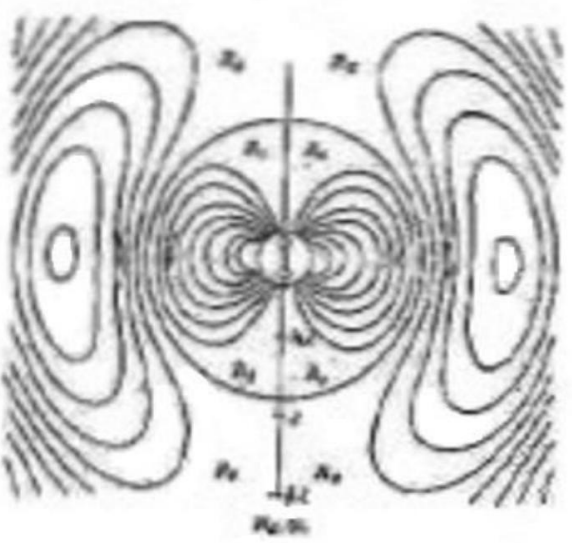
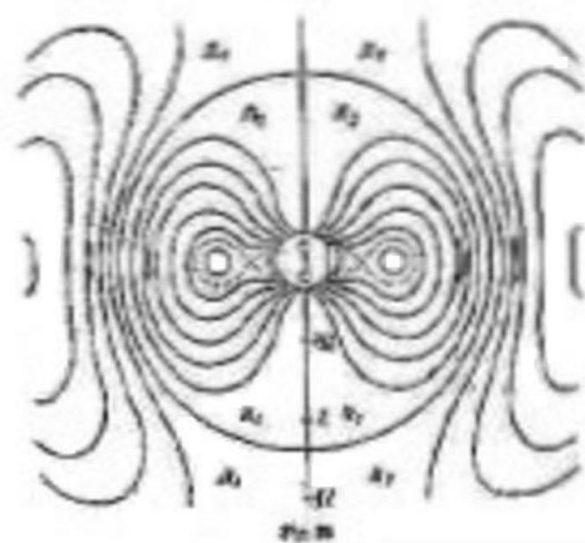
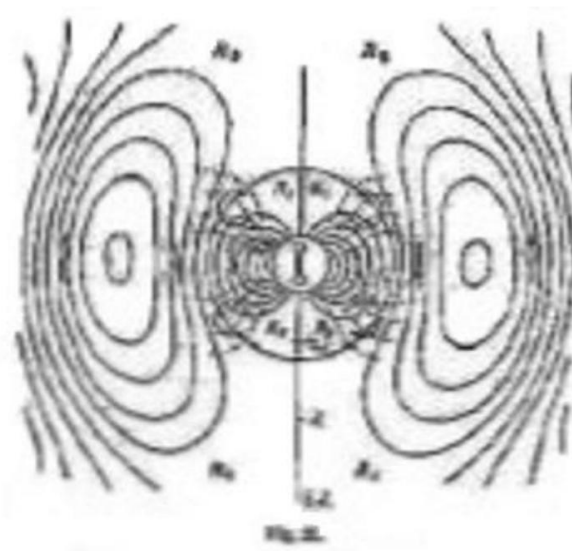
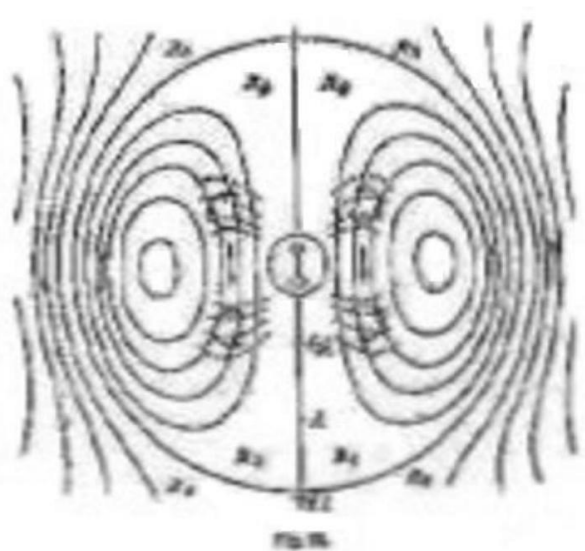
Résistance du dipôle, $L = 98,4$ pieds, $L / d = 11,013$



Réactance du dipôle, $L = 98,4$ pieds, $L / d = 11,013$



Dessins de Heinrich Hertz des champs électriques d'un dipôle vers 1888



Simulation Electromagnétique

Évolution des outils et des méthodes pour les antennes

Analyse d'antenne à l'ancienne (1880 à 1970)

Mathématiques utilisées, règles à calcul, nomogrammes, calculatrices de bureau, mesures en laboratoire et tests sur le terrain

Limité à des géométries simples et à quelques propriétés d'antenne

- Impédance
- Champ lointain

Analyse d'antenne moderne (de 1970 à aujourd'hui)

Utilise des codes informatiques sophistiqués d'électromagnétisme (CEM), c'est-à-dire un logiciel de modélisation d'antenne, et moins de dépendance à la mesure

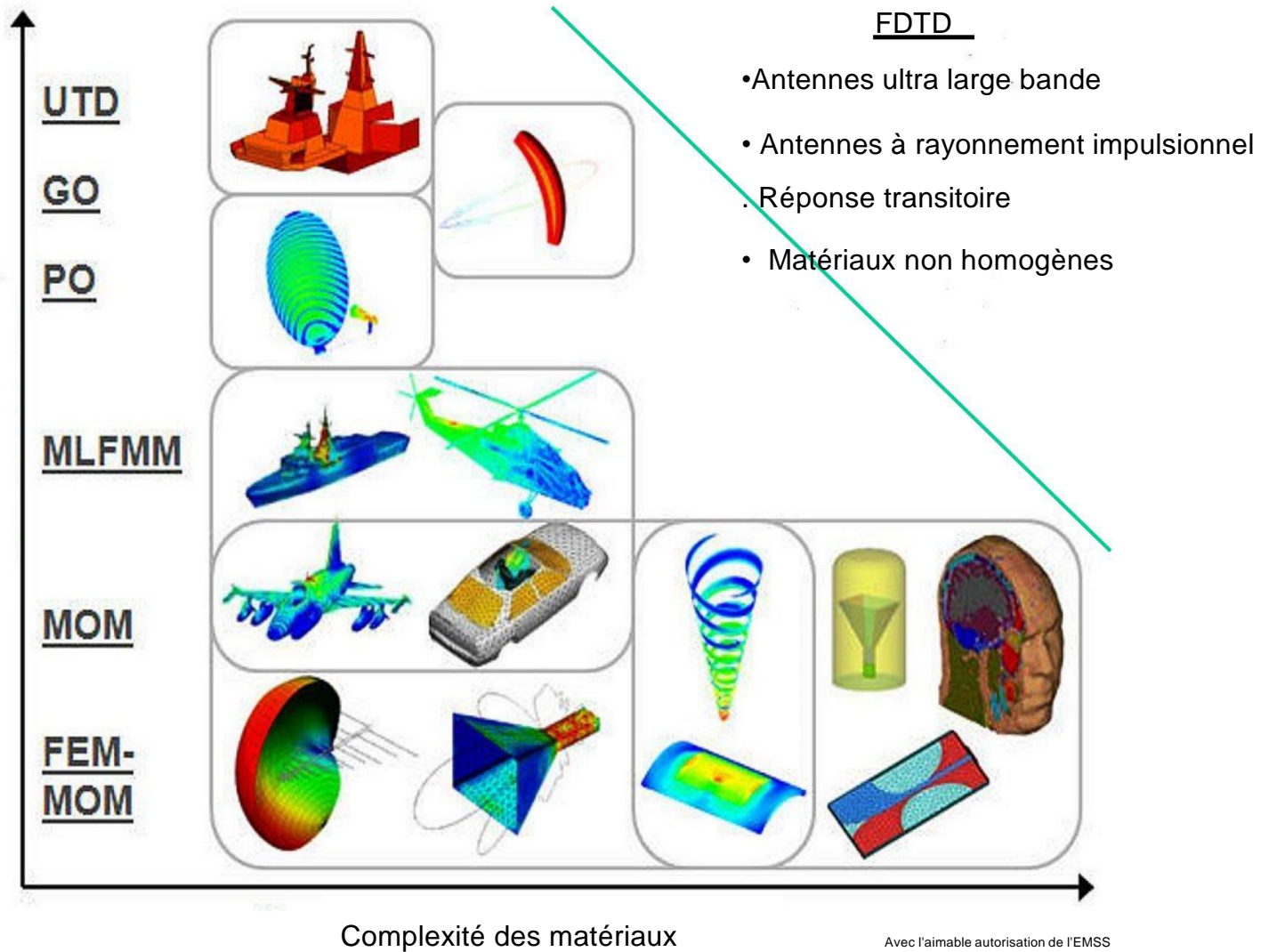
Résultats validés par accord entre différents algorithmes

Permet l'évaluation de géométries complexes, de matériaux et de propriétés

d'antenne supplémentaires

- Diagramme de rayonnement pour chaque champ ou polarisation
- Polarisation
- Efficacité
- Champs proches
- Débit d'absorption spécifique (DAS)
- Couplage mutuel entre les antennes d'un réseau
- Section efficace de diffusion et radar

L'univers des méthodes de modélisation d'antennes



Avec l'aimable autorisation de l'EMSS

Électromagnétisme par ordinateur

Méthode des moments (MoM)

Une méthode de résolution d'équations intégrées-différentielles telles que Hallen ou L'équation de Pocklington à une fréquence

Le plus ancien et le plus ancien héritage de codes logiciels pour la modélisation d'antennes BRACT, WIRA, AMP, NEC, NEC2, NEC3, NEC4, MININEC, ELNEC, EZNEC, winNECPlus, 4nec2, Mentor Graphics (Zélande) IE3D, Altair (EMSS) FEKO, WiPL-D, HOBBIES

Méthode des éléments finis (FEM)

Idéal pour la conception de petites antennes de structure complexe ANSYS (Ansoft) HFSS

Méthode temporelle des différences finies (FDTD)

Pionnier par KS Yee 1966 et A. Taflove 1980

Meilleur pour la conception de petites antennes pour les applications à large bande
Dassault Systèmes (CST) Microwave Studio, Remcom XFDTD, Faustus
MEFiSTo, openEMS

Théories géométriques, physiques et uniformes de la diffraction

Meilleur pour les antennes électriquement grandes et les structures rayonnantes

La Méthode des Moments

Auteurs



IG Boubnov
1872-1919



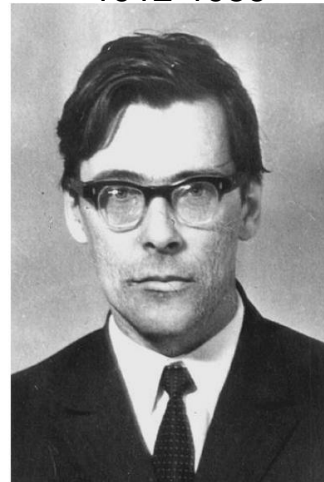
Léonid Vitalievitch Kantorovitch
1912-1986



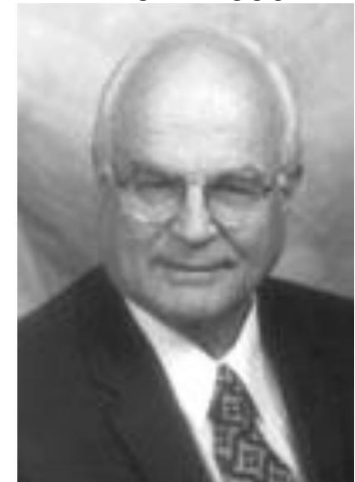
Jack H. Richmond
1922-1990



Boris Grigorievitch Galerkin
1871-1945



Gleb Pavlovitch Akilov
1924-1964



Roger F. Harrington
1925-

Méthode des Moments

Publié par Kantorovich et Akilov en 1959 comme méthode générale de résolution d'équations intégral-différentielles linéaires

Introduit en électromagnétisme par Roger Harrington en 1967

Les courants sont la somme pondérée des fonctions de base

Résoudre les coefficients des fonctions de base pour tous les segments

Calculer le diagramme de rayonnement et l'impédance du point d'alimentation à partir des courants

Maillage

Segments 1D



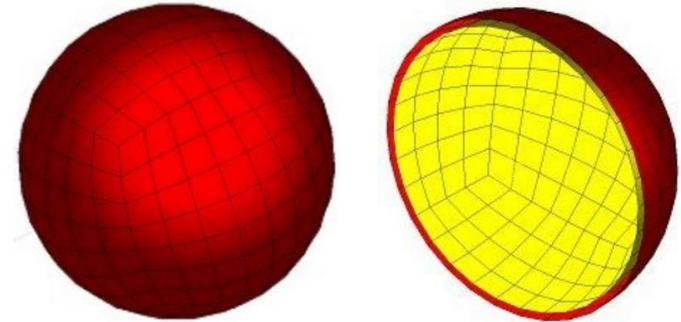
Patches 2D

Rectangles plats

Quadrilatères plats

Triangles plats

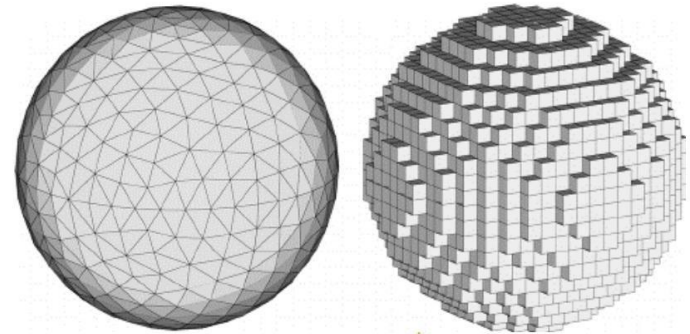
Quadrilatères courbes
(bilinéaires)



Voxels 3D

Cubique ou hexaédrique

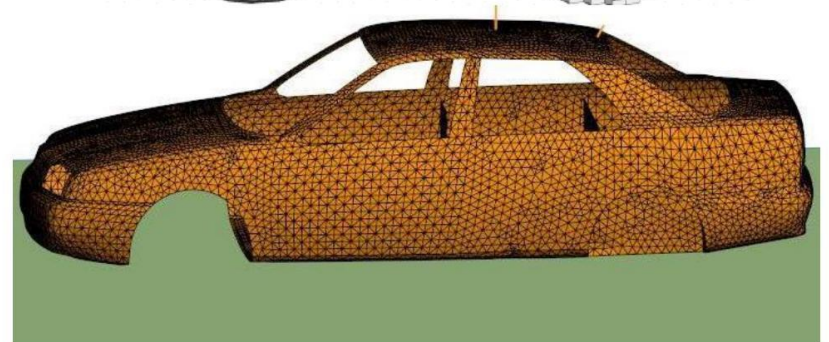
Tétraédrique



Maillage spécifié manuellement

Maillage automatique

Maillage adaptatif (intelligent)



Principaux codes informatiques MoM

WIRA - Développé à la fin des années 1960 par M. Andreasen, F. Harris et R. Tanner chez Technology for Communications International (TCI)

BRACT & ANTBRACT – Développé à la fin des années 1960 chez MBAssociates, San Ramon, CA

AMP/AMP2 – Développé au milieu des années 1970 par GJ Burke chez MBAssociates, San Ramon
NEC (1979) – Ajout d'extensions de courant plus précises ; jonctions de fils multiples ; fils épais

NEC-BSC (1980) – Code de diffusion de base ajouté de J. Richmond à Ohio State MiniNEC

(1980) – Développé par J. Rockway et J. Logan. Différents algorithmes de NEC. Base de MMANA-GAL.

NEC2 (1981) – Interaction au sol Sommerfield-Norton pour les structures filaires au-dessus du sol avec pertes ; la [fonction](#) numérique de Green permet de modifier sans répéter tout le [calcul](#)

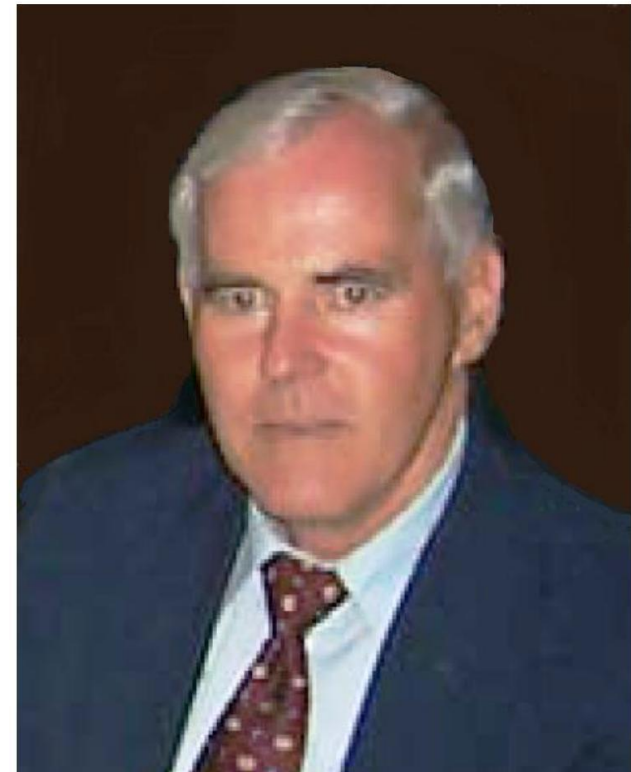
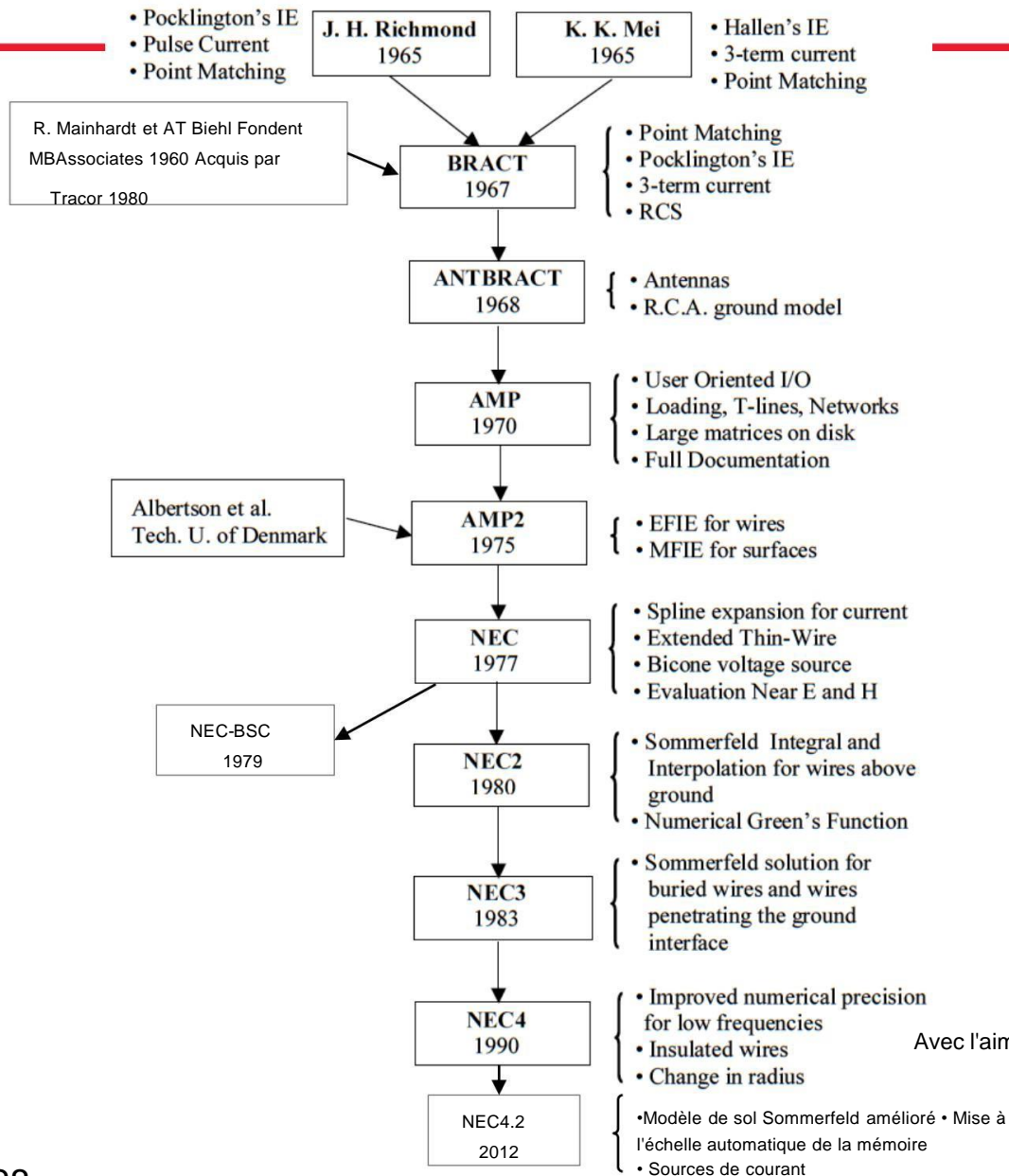
Zeland IE3D (1992) – Maillage adaptatif, développé par JX. Zheng, Zeland Software, Fremont, Californie. Acquis par Mentor Graphics en 2010. FEKO (ca 2000)

– Méthode hybride développée par U. Jakobus à EMSS, Stellenbosch, South Afrique. Racheté par Altair en 2014.

WiPL-D (environ 2000) - MoM avancé pour les fils, les plaques et les diélectriques basé sur le travail de l'AR Djordjevic, BM Kolundzija, Université de Belgrade, Serbie

HOBBIES (2010) - Semblable à WiPL-D sauf qu'il a un solveur hors cœur. Développé par TK Sarkar, Université de Syracuse, New York, parrainée par le DoD américain

L'histoire de NEC



Gerald J. Burke

Avec l'aimable autorisation de la société Applied Computational Electromagnetics

Un code "Thin-Wire" plus précis

Courant de pont multirayon
(méthode CMB)

Développé par MA Tilston 1983-89
à l'Univ. de Toronto

Meilleure précision que NEC4
lorsque les fils sont très proches
d'autres fils ou de la terre ou se
rejoignent à des angles aigus,
par exemple des modèles
de grille de fils de surfaces

Utilisé commercialement par
Systèmes d'antennes Phoenix à
Perth, Ontario, Canada

Code source Fortran

A Multiradius, Reciprocal Implementation of the Thin-Wire Moment Method

MARK A. TILSTON, MEMBER, IEEE, AND KEITH G. BALMAIN, FELLOW, IEEE

Abstract—An implementation of the moment method for electromagnetic analysis of multiradius thin-wire structures, including multiwire, multiradius junctions is presented. It is entitled the multiradius bridge-current (MBC) moment method. It is an extension of the authors' uniradius bridge-current reformulation of Richmond's uniradius thin-wire theory. The method features an exactly symmetric mutual impedance matrix ensuring reciprocity between sources, it is unconstrained with respect to both the length ratio and the radius ratio of adjoining segments provided that the wires are electrically thin, and it permits the self-consistent inclusion of coaxial-cable sections in the configuration under analysis. The method is validated through comparison with transmission-line theory for a two-wire line and a coaxial cable, and through comparison with measurements on a sleeve monopole antenna and a log-periodic dipole antenna. Finally, the MBC moment method program is shown to surpass the Numerical Electromagnetics Code (NEC) in terms of reciprocity and convergence for both an AM broadcast tower detuning stub problem and a bent two-wire transmission-line problem.

I. INTRODUCTION

A WELL-KNOWN moment method computer program for the electromagnetic analysis of uniradius thin-wire structures is that of Richmond [1]. It has been shown by Butler and Wilton [2] that the particular method of expansion and testing, which they term "Pocklington piecewise-sinusoid Galerkin," is one of the best methods for obtaining rapid convergence in the solution. Although very useful, Richmond's program can display asymmetric artifacts when used to analyze certain symmetric structures, a problem that was observed by Vainberg and Balmain [3], explained and corrected approximately by Hilbert, Tilston, and Balmain [4], and finally corrected more completely by the authors in their "bridge-current" formulation [5]. In the present work, the bridge-current formulation is extended to allow solution of the multiradius problem.

II. DESCRIPTION OF BRIDGE-CURRENT MOMENT METHOD VERSIONS

A. Uniradius Bridge-Current Version

The uniradius bridge-current version forms the starting point for the multiradius bridge-current version. The unira-

dius version is described in detail in [5], and is described here briefly because it is necessary in order to explain the multiradius version.

The wire structure to be modeled consists of straight wire segments all of the same radius, and usually shorter than a quarter-wavelength. Conceptually, a current expansion function is a tubular dipolar current spanning the surface of two adjoining wire segments that are not necessarily collinear. Each expansion function has a corresponding identical tubular testing function, in a coincident location. The current on each segment is axially directed, sinusoidally distributed, continuous at the segment junction, and zero at the other end of each segment. The total current at the junction is unity. The mutual impedance between a tubular expansion dipole and a tubular testing dipole is composed of four tubular-monopole-to-tubular-monopole mutual impedances.

The mutual impedance between a tubular expansion monopole and a tubular testing monopole is approximated by the mutual impedance between two filamentary monopoles that are placed on their respective segment axes unless the axes intersect or coincide. If the axes coincide, the expansion monopole is offset by a wire radius in a direction orthogonal to the coincident axes. If the two axes intersect, the expansion monopole is offset by a wire radius in a direction orthogonal to the plane containing both axes.

Now consider one testing monopole and two expansion monopoles that form an expansion dipole. With certain geometries, the filamentary expansion monopoles may be offset from their segment axes in different directions, thus forming a dipole that is broken at its vertex. This would occur, for example, if the segment axis of one, and only one, of the two expansion monopoles was coplanar with (but not parallel to) that of the testing monopole. In such a case, the break is bridged by a straight, uniformly distributed "bridge current." With this geometry, the bridge current is orthogonal to the testing monopole. Because of this orthogonality, and because of its uniform current distribution, the bridge current does not contribute to the following symmetric integral form for the mutual impedance Z_{ab} between a filamentary testing monopole a and a bridged filamentary expansion dipole b [5]:

$$Z_{ab} = j\omega \iint \left[\frac{\mu}{4\pi} \mathbf{J}_a(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{J}_b(\mathbf{r}') \right. \\ \left. + \frac{1}{4\pi\epsilon} \rho_a(\mathbf{r}) \rho_b(\mathbf{r}') \right] \frac{e^{-\gamma R}}{R} dV' dV \quad (1a)$$

where

$$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, \quad (1b)$$

Manuscript received May 26, 1989; revised February 9, 1990. This work was supported by Bell Canada, by the Natural Sciences and Engineering Research Council, and by The Ontario Information Technology Research Centre.

M. A. Tilston was with the Department of Electrical Engineering, University of Toronto, Toronto, ON, Canada. He is now with M. A. Tilston Engineering, 90 Lawrence Avenue East, Toronto, ON, Canada M4N 1S6.

K. G. Balmain is with the Department of Electrical Engineering, University of Toronto, Toronto, ON, Canada M5S 1A4.

IEEE Log Number 9037639.

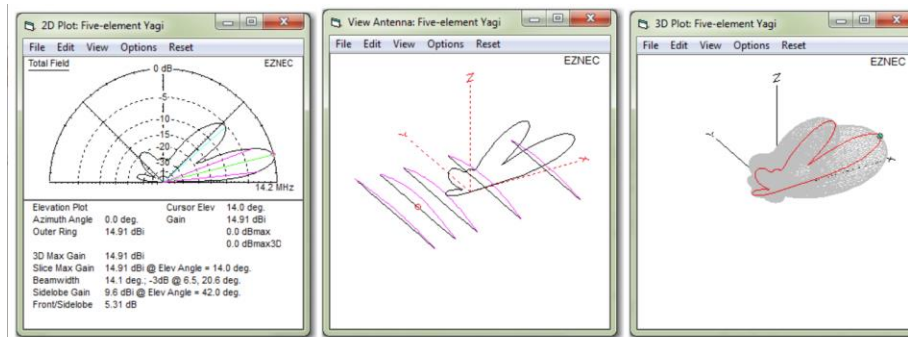
Lee Roy Bruce (LB) Cebik, W4RNL, 1939-2008



Modélisation d'antenne par ordinateur popularisée
dans la radio amateur au cours de la décennie 1998-2008

EZNEC par W7EL

Développé par Roy Lewallen, W7EL , maintenant en version 7.0 et gratuit !



Above: Screen shots from several **EZNEC** displays. **Right:** 3D far field pattern, with 2D elevation "slice" highlighted. Any azimuth or elevation slice can be highlighted. **Center:** View Antenna display, showing the "wires" making up the model of the five-element beam, with currents and 2D slice superimposed to show orientation. Several other items, such as currents and wire numbers, can be added to this display. **Left:** 2D display showing detailed information about the selected slice.

What's New in v. 7.0

All features which were available in **EZNEC Pro/2** v. 6.0 are incorporated into **EZNEC Pro/2+** v. 7.0 with a few exceptions described below. **EZNEC Pro/4** v. 6.0 was identical to **EZNEC Pro/2** except for the inclusion of an internal NEC-4.2 calculating engine. That also holds true for **EZNEC Pro/4+ and /2+**.

- **External calculating engines** - Both **EZNEC Pro/2+** and **EZNEC Pro/4+** can use external NEC-4.2 and NEC-5 programs for calculations. After installing **EZNEC Pro/2+** or **EZNEC Pro/4+**, open the manual (Help/Contents) then open the Reference/Additional Information/Calculating Engines topic for detailed information about these and how to get them.
- **Individual wire loss** - Each wire can have different loss if desired.
- **Improved NEC format file reading** - A number of deficiencies were addressed and corrected.
- **Plot display enhancements** - Line widths and object sizes can be changed in the 2D, 3D, SWR, and View Antenna displays.
- **Charge density table** - New Options menu selection to optionally add charge density data to the Currents table.
- **Example files and Test Drive updates** - Example files have been updated to replace MININEC type ground with Real, High Accuracy ground where MININEC ground isn't needed. The Test Drive tutorial has been updated to use the new files and to show values consistent with them and the use of the internal NEC-2D calculating engine. Original versions of example files which were changed are in a Legacy subdirectory.
- **Undo Calculating Engine Change** - Certain features are automatically enabled or disabled, and items such as a second ground medium can be deleted when changing calculating engines. So calculation engine changes can now be undone or redone.
- **Wire Segment Intersection Conversion** - Descriptions containing wires intersecting at segment junctions can automatically be converted to the now-required wire end connections.

Click [here](#) to see deleted features and other changes.

[Download EZNEC Pro/2+ v. 7.0](#)

Highly recommended! [NEC-5](#)
-- New v. x13 available(*)

Highly recommended! [AutoEZ](#)

Introduction à la modélisation d'antenne EZNEC

- Depuis qu'il est devenu gratuit, c'est l'outil à utiliser !
- Dans cette session, vous apprendrez à :
 - Construisez un modèle d'antenne (un dipôle simple)
 - Comment le modèle peut prédire le ROS
 - Comment le modèle peut prédire les modèles d'azimut (directions NSEW) •
 - Comment le modèle peut prédire les modèles d'élévation.

EZNEC : Menu principal

Fils:

Saisir et afficher les coordonnées du fil d'antenne

Sources:

Placer les sources dans les fils

Charges :

placez des charges (bobines de chargement), des pièges, etc.

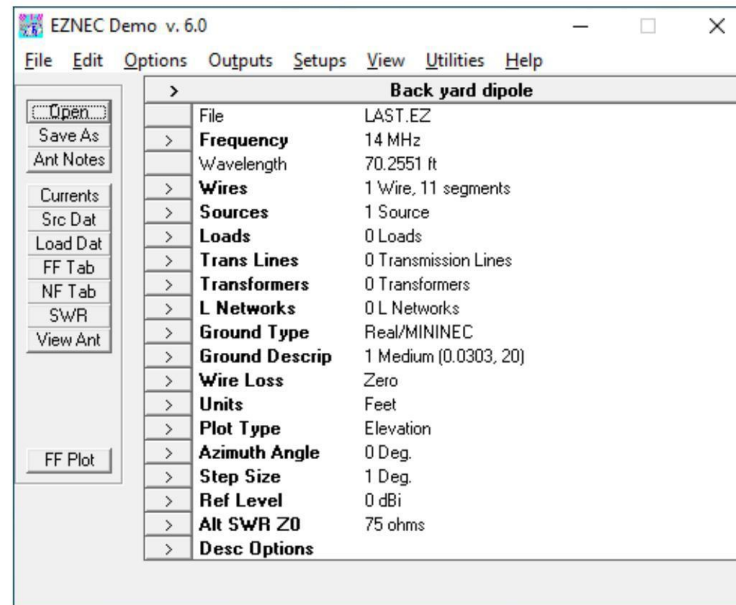
Transformateurs :

Transformateurs d'adaptation Z, baluns, etc.

Lignes de transmission:

Connectez des sources à la fin de vos lignes coaxiales

Charges : Terminaisons, etc.



Écrans de démarrage

Commencez par les écrans SOURCES et FILS en cliquant sur le bouton ">" à côté d'eux

Aménagez selon vos préférences

Sources

Source Edit

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

EZNEC Demo v. 6.0

File Edit Options Outputs Setups View Utilities Help

Open
Save As
Ant Notes
Currents
Src Dat
Load Dat
FF Tab
NF Tab
SWR
View Ant
FF Plot

> Back yard dipole	
File	LAST.EZ
> Frequency	14 MHz
Wavelength	70.2551 ft
> Wires	1 Wire, 11 segments
> Sources	1 Source
> Loads	0 Loads
> Trans Lines	0 Transmission Lines
> Transformers	0 Transformers
> L Networks	0 L Networks
> Ground Type	Real/MININEC
> Ground Descrip	1 Medium (0.0303, 20)
> Wire Loss	Zero
> Units	Feet
> Plot Type	Elevation
> Azimuth Angle	0 Deg.
> Step Size	1 Deg.
> Ref Level	0 dBi
> Alt SWR Z0	75 ohms
> Desc Options	

Wires

Wire Create Edit Other

Coord Entry Mode Preserve Connections Show Wire Insulation

Wires												
No.	End 1				End 2				Diameter	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	(in)	Diel C	Thk (in)	
▶ 1	0	0	20		0	33.43	20		#12	11	1	0
*												

Changer les unités en Mètres

Units

Select Units

Meters

Millimeters

Feet

Inches

Wavelengths

Wire Diameter Units

Millimeters

Inches

Wavelengths

Wires

Wire Create Edit Other

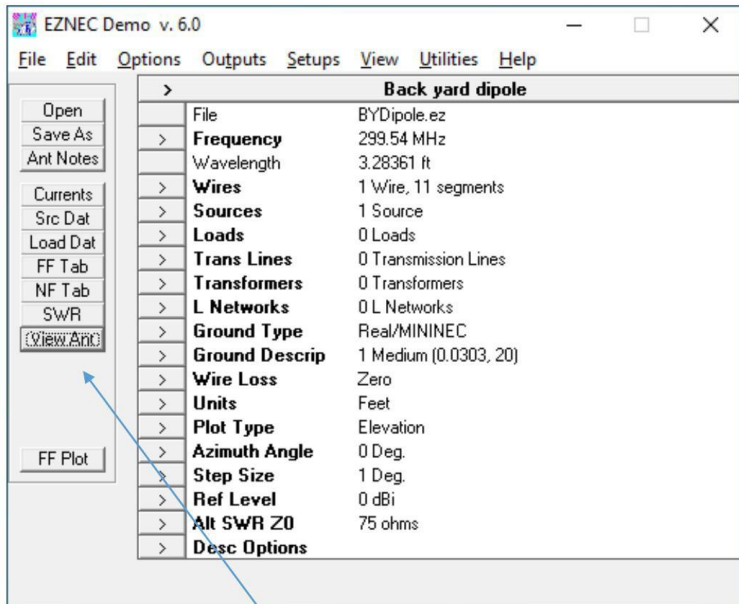
Coord Entry Mode Preserve Connections Show Wire Insulation

No.	End 1				End 2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn			Diel C	Thk (in)
▶ 1	0	0	1.40215		0	1.56246	1.40215		#12	11	1	0
*												

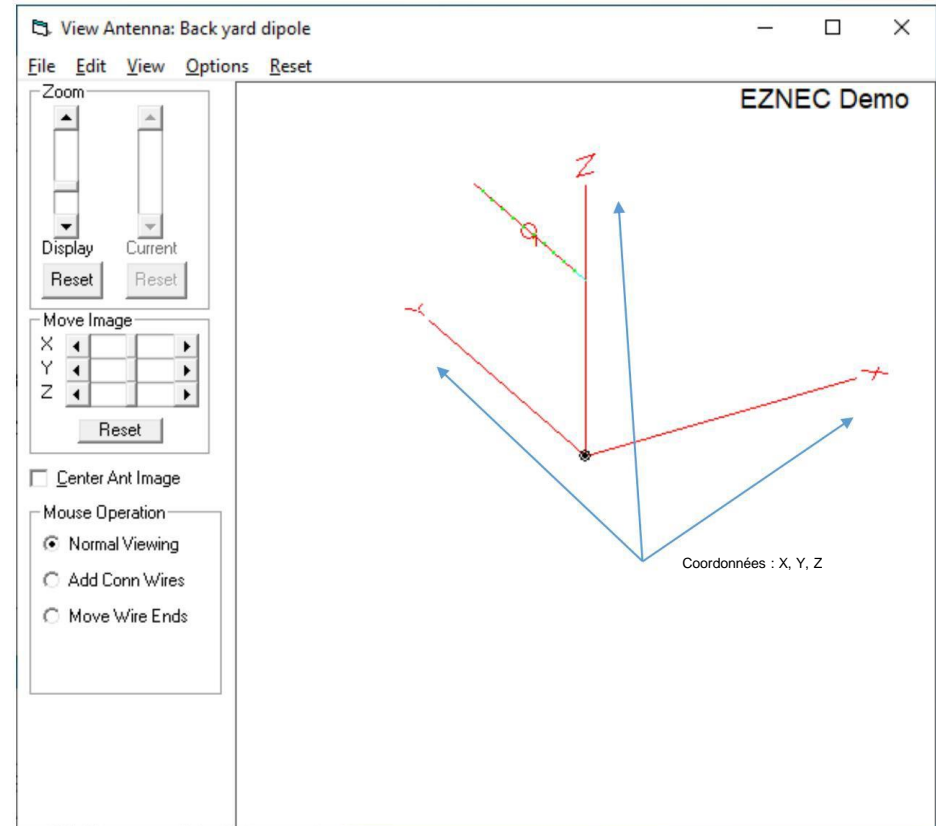
Cliquez sur AUTRE

Sélectionnez PIEDS puis OK

Afficher l'antenne

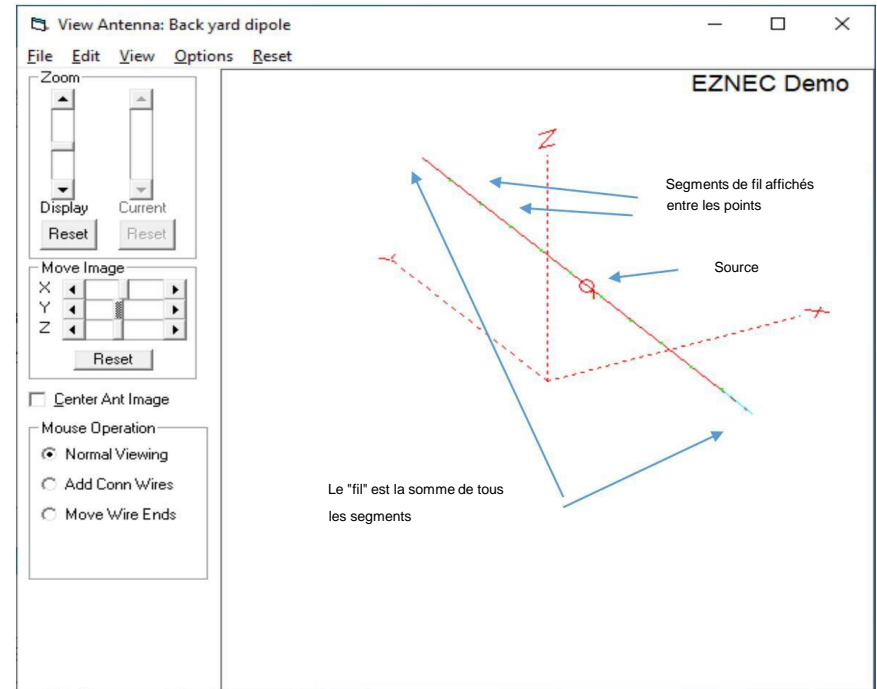
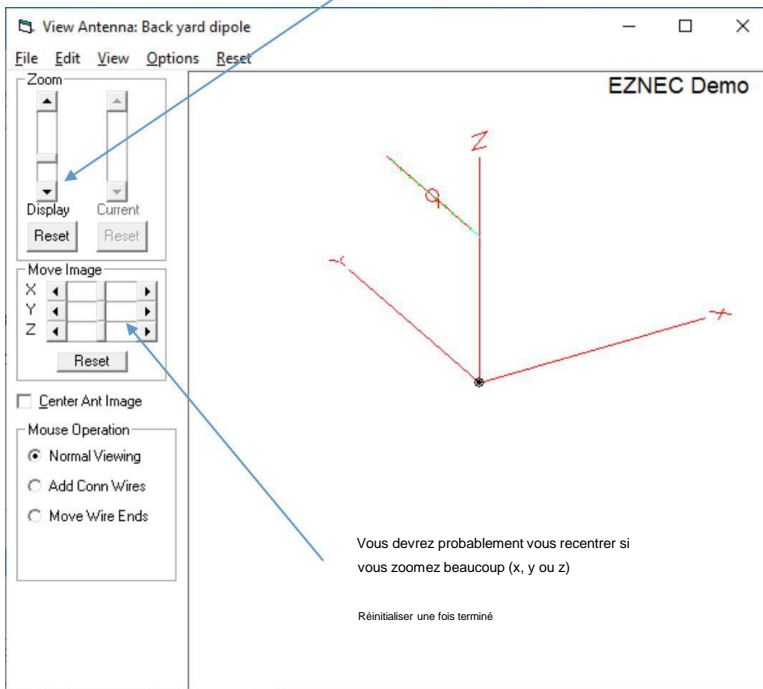


Cliquez ici



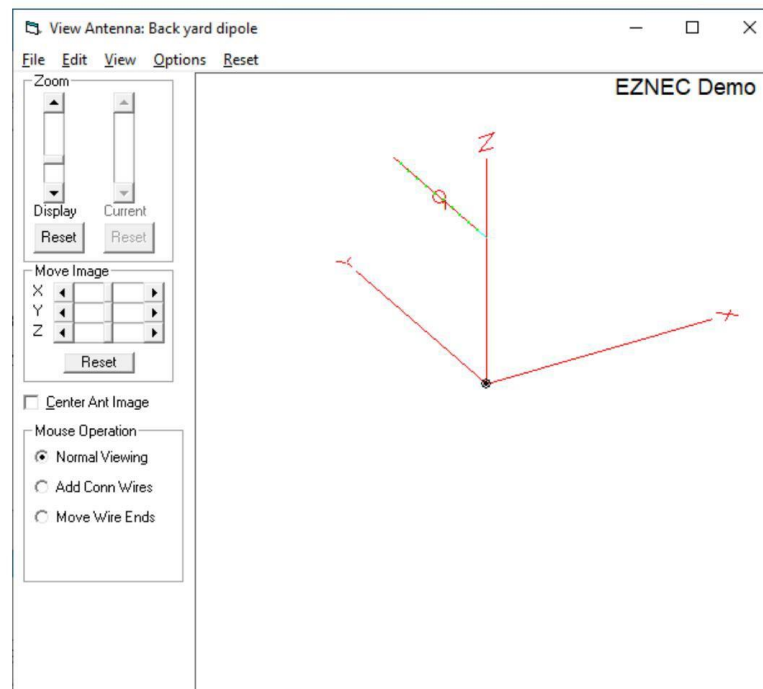
Vues d'antenne

Curseur de zoom pour regarder de plus près
Réinitialiser une fois terminé

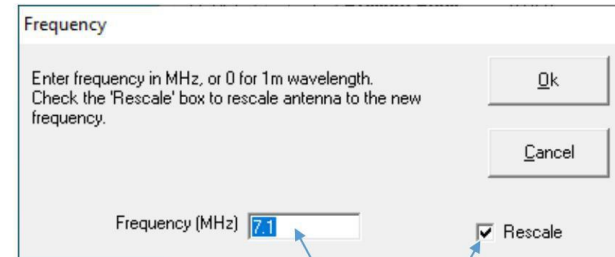
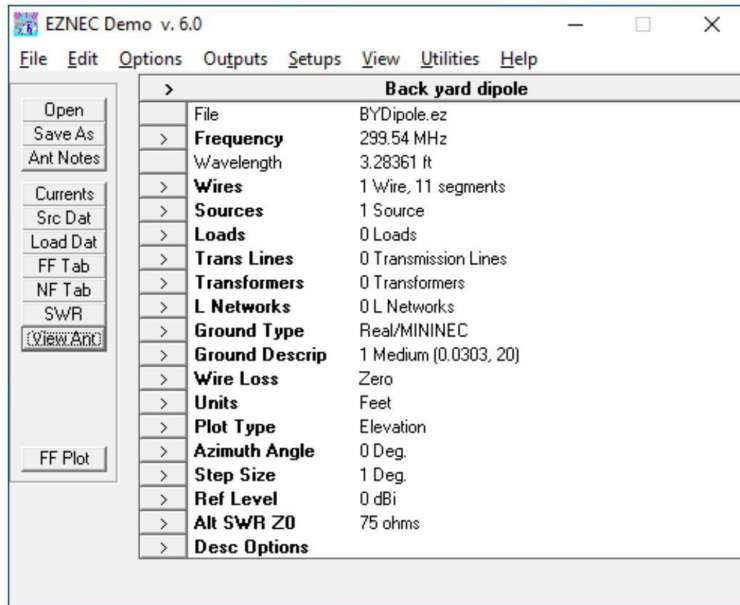


Réinitialiser

(appuyez sur les deux boutons de réinitialisation)



Définir la fréquence de l'antenne et redimensionner

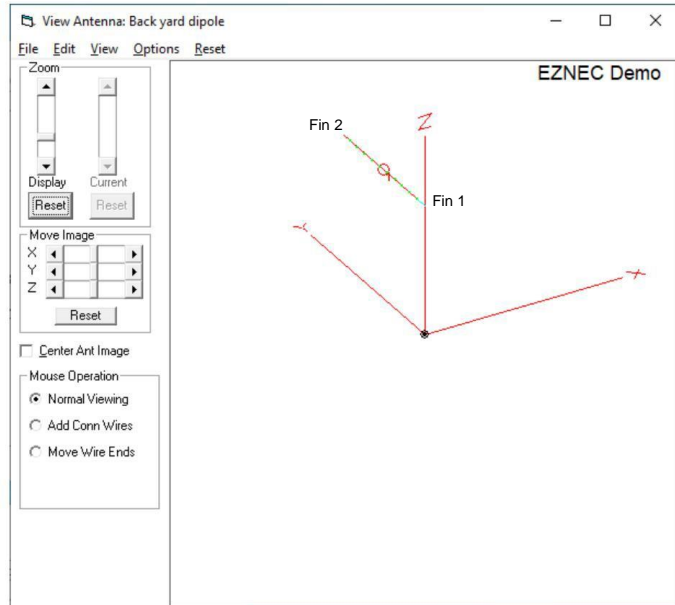


Définir la fréquence (bande de 40 mètres)

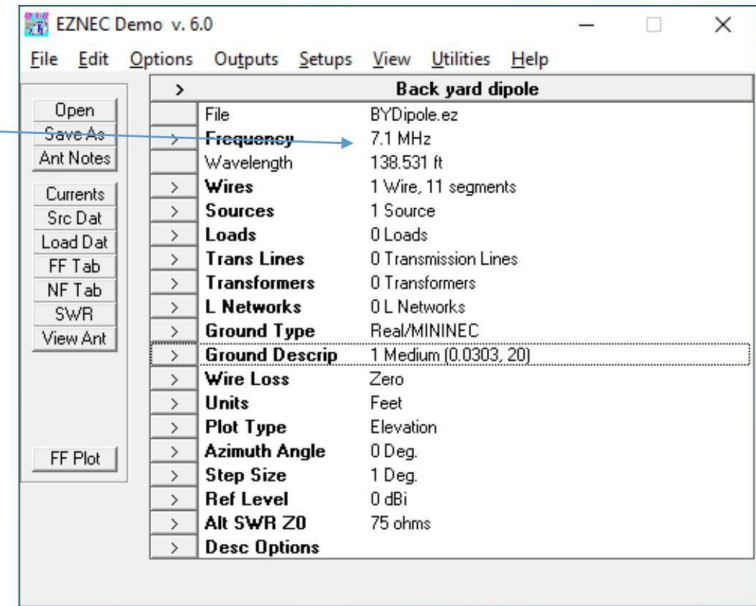
Cochez la case RESCALE !

Cliquez sur OK

Le dipôle de 40m



Nouvelle fréquence affichée



Nouvelles coordonnées affichées

No.	End 1			Conn	End 2			Conn	Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)		X (ft)	Y (ft)	Z (ft)				Diel C	Thk (in)
1	0	0	59.1549		0	65.9183	59.1549		#12	11	1	0

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

Réglage fin de l'antenne

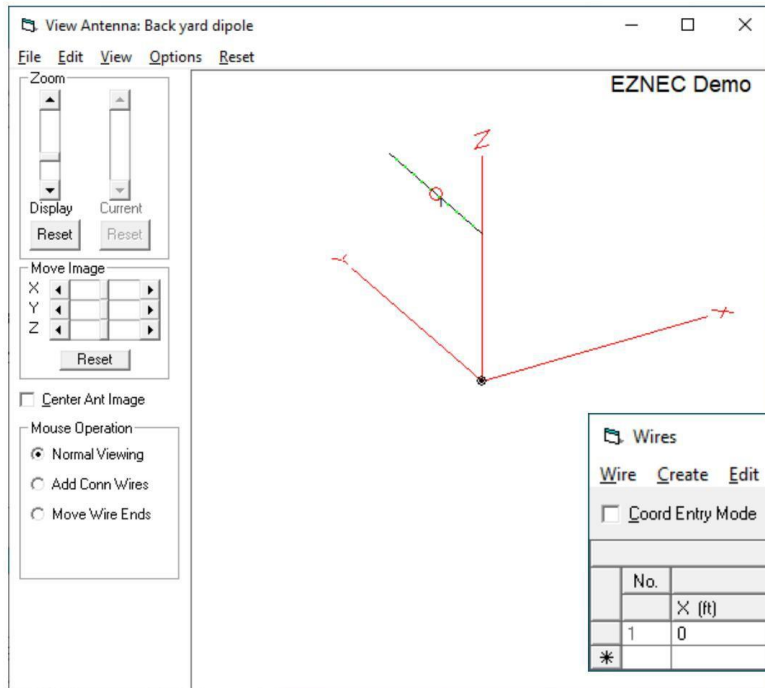
- La remise à l'échelle entraîne généralement un grand nombre de décimales : simplifions :

Wires												
No.	End 1				End 2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn			Diel C	Thk (in)
▶ 1	0	0	59.1549		0	65.9183	59.1549		#12	11	1	0
*												

Modifions la hauteur (Z) des deux extrémités à 20 mètres pairs et la longueur (différence entre l'extrémité 1 et l'extrémité 2 dans la direction Y) à 22 mètres. Cliquez sur les cases et modifiez les chiffres. Cliquez ensuite n'importe où sur l'écran. Vous devriez maintenant voir ceci :

Wires												
No.	End 1				End 2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn			Diel C	Thk (in)
▶ 1	0	0	60		0	66	60		#12	11	1	0
*												

Notre dipôle de 40 m jusqu'à 20 mètres



Cliquez à nouveau sur VIEW ANT.

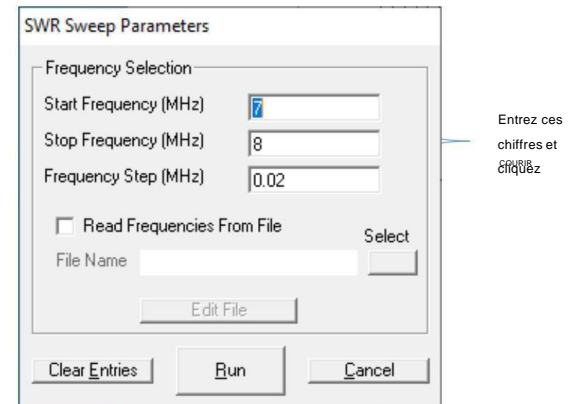
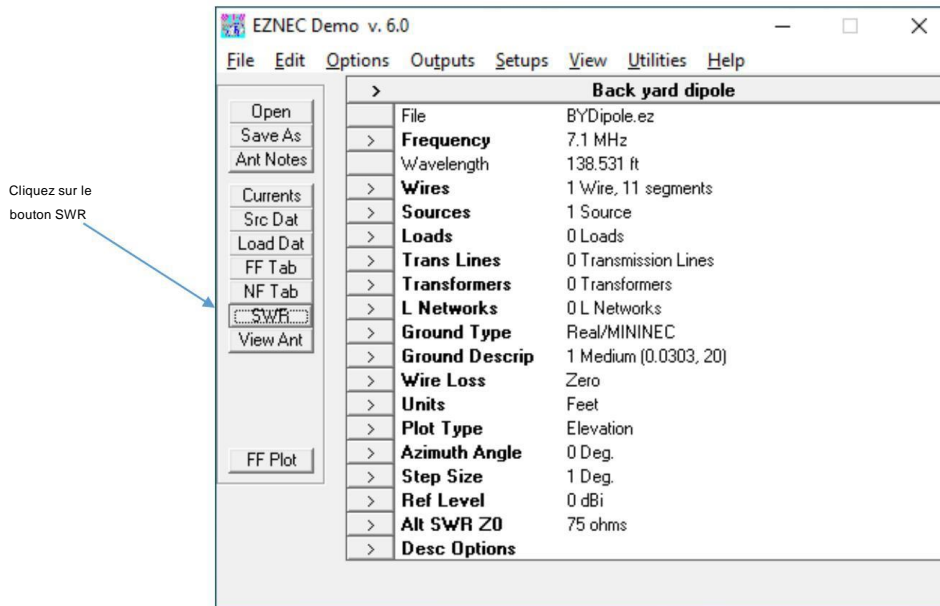
Étant donné que les dimensions ne sont pas affichées dans cette vue, elle ressemble exactement à ce que nous avons auparavant.

Mais votre fenêtre WIRES dit le contraire :

No.	End 1				End 2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn			Diel C	Thk (in)
1	0	0	60		0	66	60		#12	11	1	0
*												

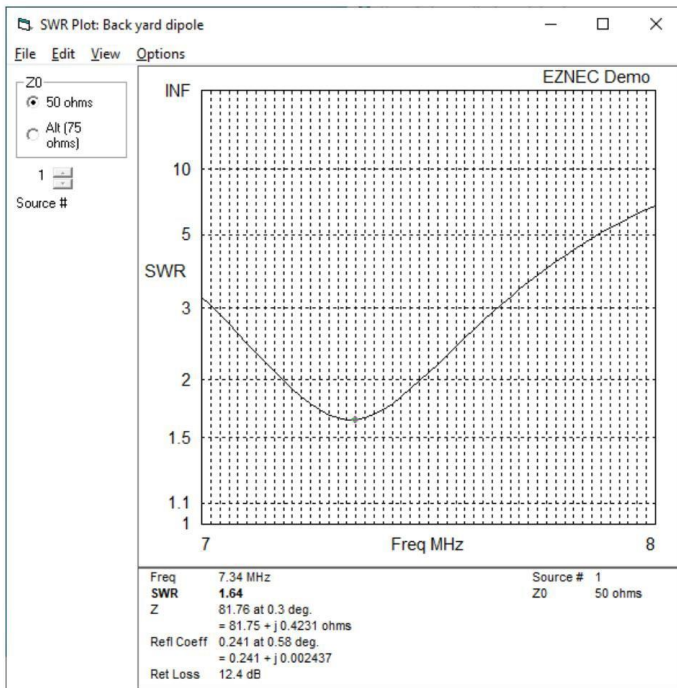
La partie amusante commence

Nous balayerons le SWR entre deux fréquences par incréments que nous définirons



Attendez-le.... Beaucoup de calculs en cours

Afficher le ROS



Nous tournions pour 7,1 MHz, mais cela résonne à environ 7,34 MHz....

Nous devons allonger le dipôle pour réduire la fréquence de résonance. Nous faisons cela dans la fenêtre WIRES

Wires

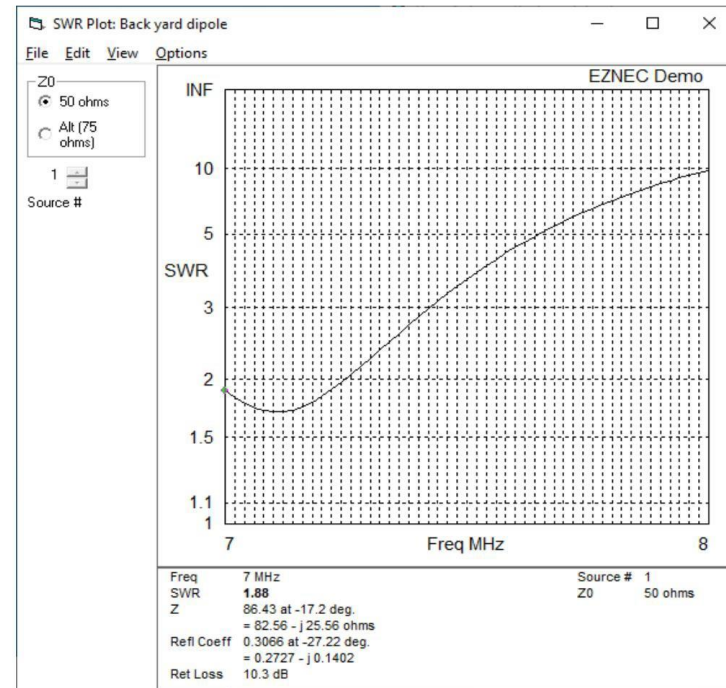
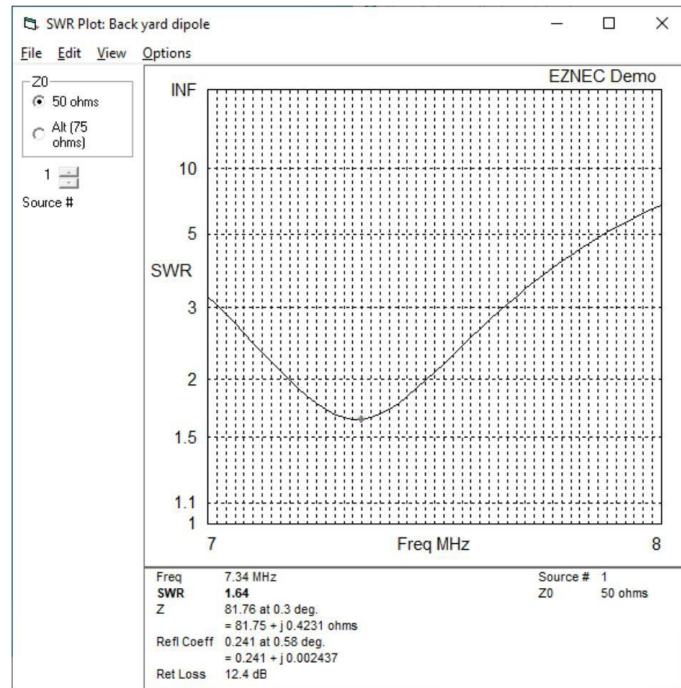
Wire Create Edit Other

Coord Entry Mode Preserve Connections Show Wire Insulation

No.	End 1				End 2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn			Diel C	Thk (in)
1	0	0	60		0	68	60		#12	11	1	0
*												

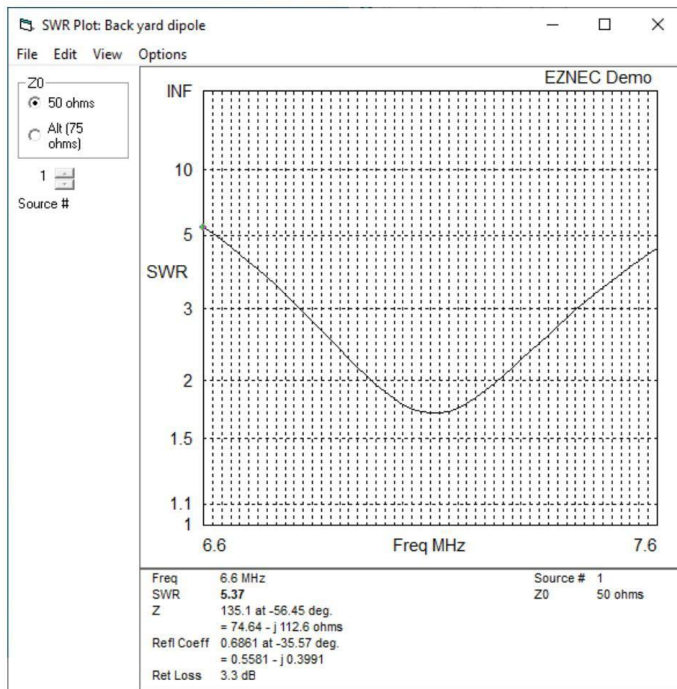
Changer la longueur à 68 pieds

Maintenant, nous sommes à 7,1 MHz



Recentrer le tracé

en modifiant les limites de balayage dans le menu SWR



SWR Sweep Parameters

Frequency Selection

Start Frequency (MHz) 6.6

Stop Frequency (MHz) 7.6

Frequency Step (MHz) 0.02

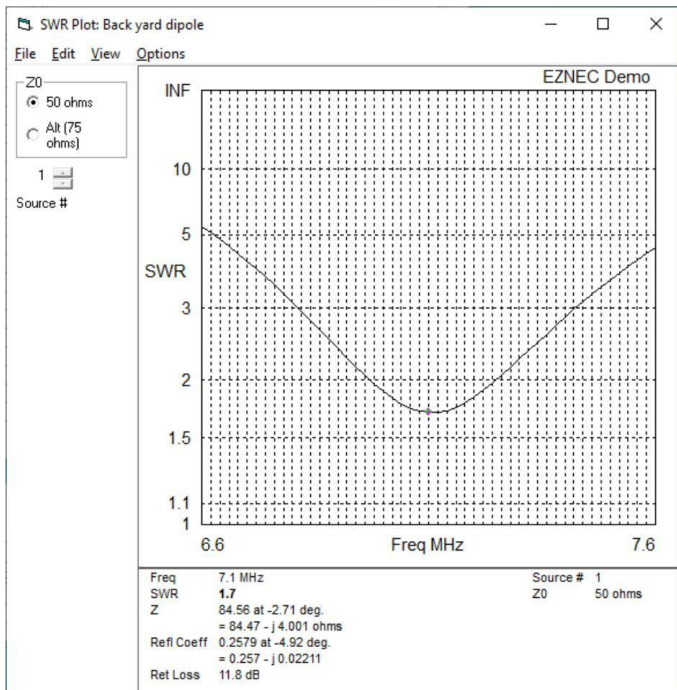
Read Frequencies From File Select

File Name

Edit File

Clear Entries Run Cancel

Cliquez le long de la courbe sur différentes fréquences



À 7,1 MHz, l'impédance est de 85,5 ohms et le ROS est de 1,7:1

C'est vrai : un dipôle de 18 mètres de haut n'est pas une antenne de 50 ohms !

Wires

Wire Create Edit Other

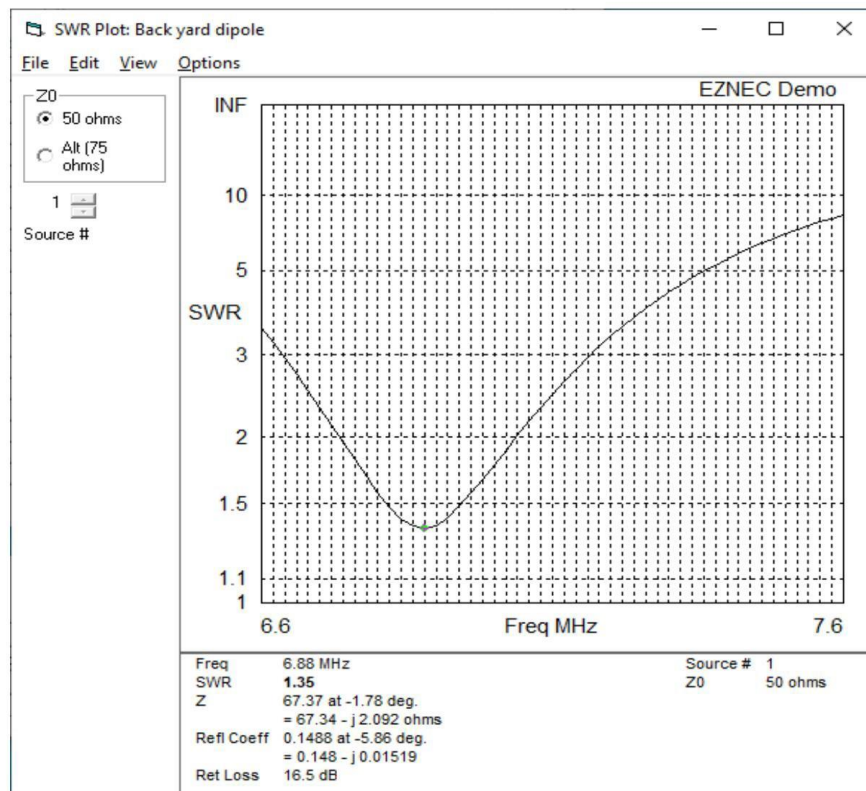
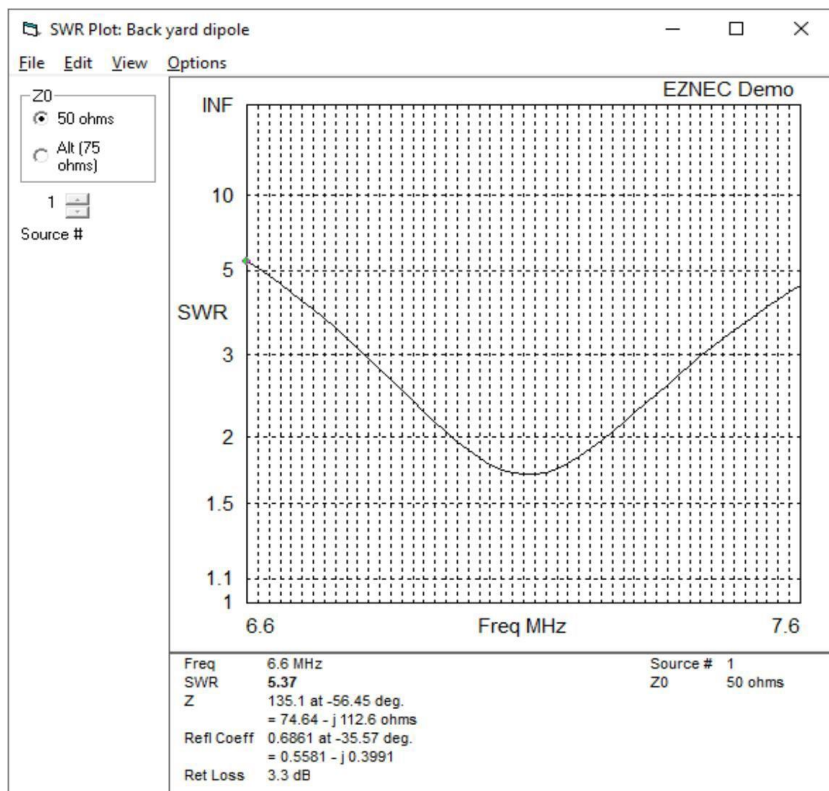
Coord Entry Mode Preserve Connections Show Wire Insulation

No.	End 1				End 2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn			Diel C	Thk (in)
1	0	0	30		0	68	30		#12	11	1	0
*												

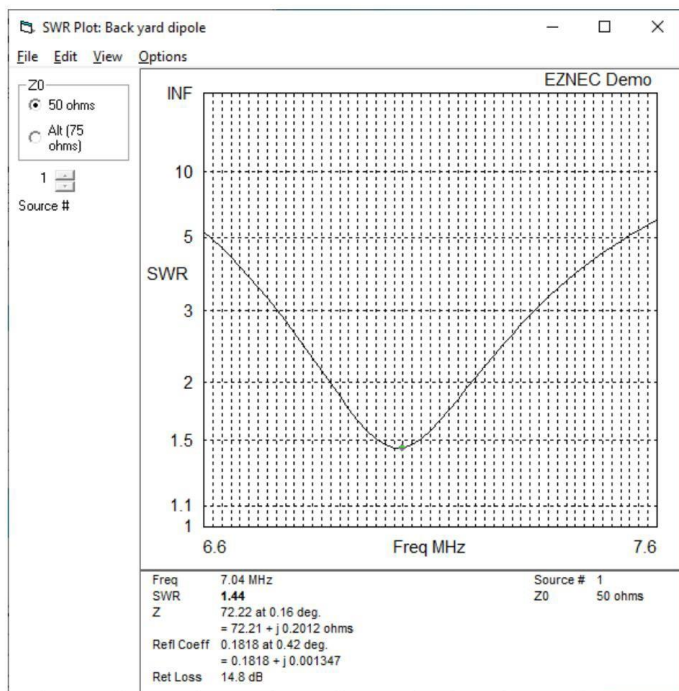
Abaissons cette
antenne à 30 pieds

Abaissez l'antenne à 10 mètres

Le TOS tombe à 1,35 et la fréquence de résonance tombe à 6,88 MHz ! La hauteur au-dessus du sol affecte les deux !



Le dipôle en espace libre a une impédance de 72 ohms



Le calculateur dipôle que vous avez peut-être vu n'est pas exact dans notre "monde réel" en raison de la proximité de terrains réels en dessous.

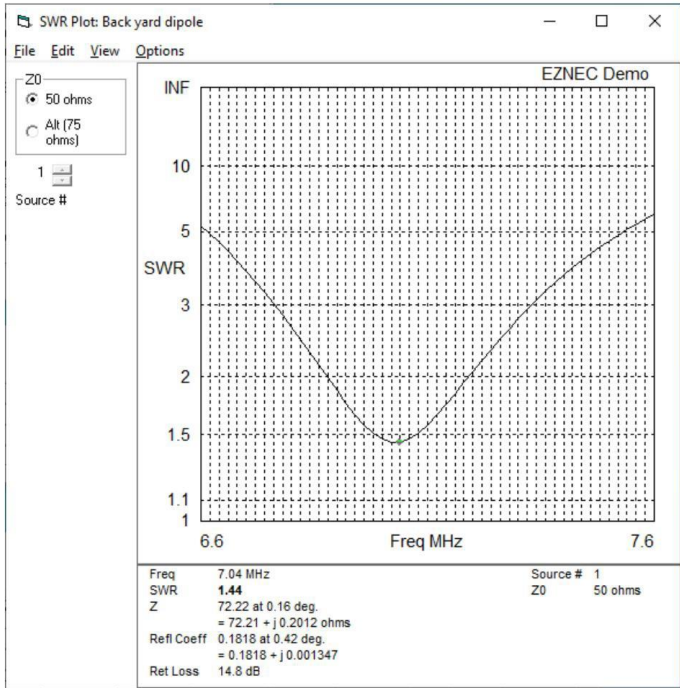
Formula:

$$L = \frac{468}{f}$$

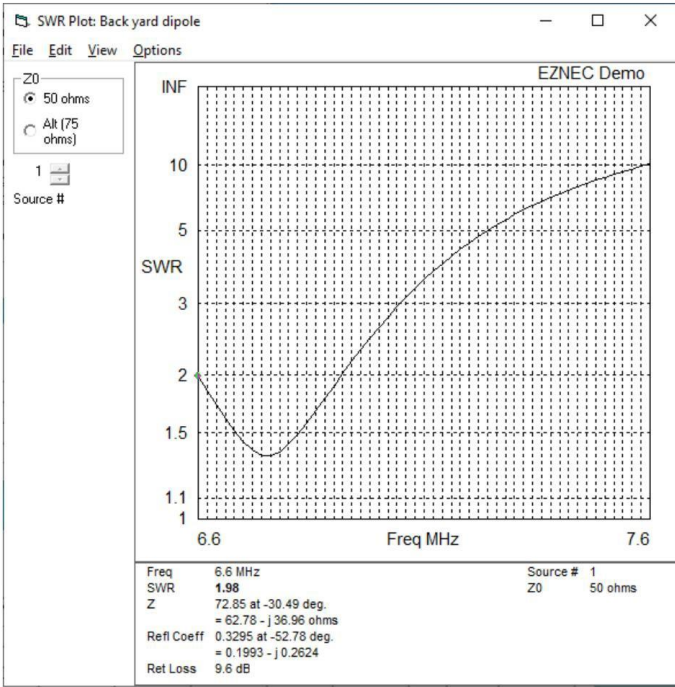
$$E = \frac{L}{2}$$

Effets de fils isolés ? OUI! Le diélectrique de l'isolation abaissera la fréquence de résonance

Dipôle en espace libre avec fil nu



Dipôle en espace libre avec fil isolé en PVC



Wires

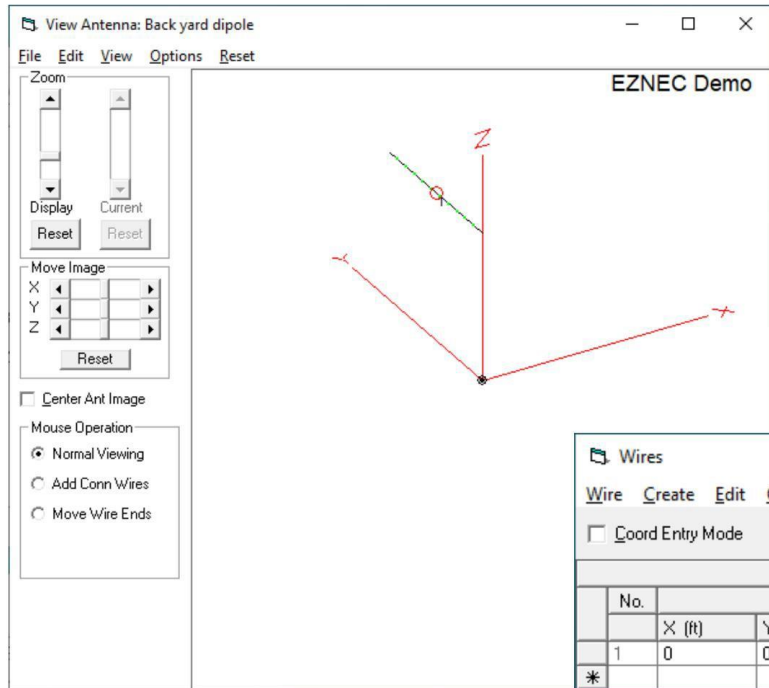
Wire Create Edit Other

Coord Entry Mode Preserve Connections Show Wire Insulation

No.	End1				End2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn			Die C	Thk (in)
1	0	0	100		0	68	100		#12	11	4.7	0.05

Modifiez la constante diélectrique et définissez ici l'épaisseur d'isolation

Retour à notre dipôle de 40 m jusqu'à 20 mètres



Saisissez à nouveau ces valeurs dans la fenêtre WIRES :

Wires

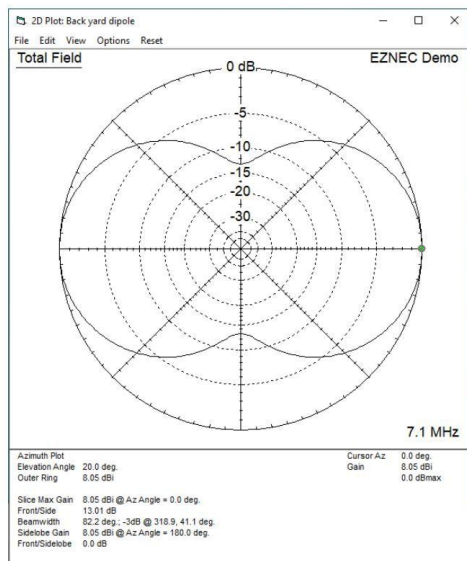
Wire Create Edit Other

Coord Entry Mode Preserve Connections Show Wire Insulation

No.	End 1				Conn	End 2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)			X (ft)	Y (ft)	Z (ft)				Diel C	Thk (in)
1	0	0	60		0	66	60		#12	11	1	0	
*													

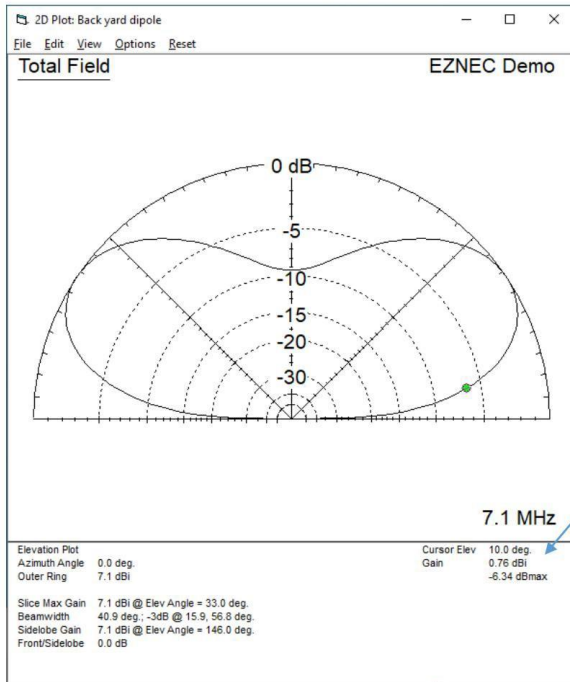
Diagrammes d'antenne : la vue AZIMUT

- Dans le menu principal, sélectionnez AZIMUT sous « Type de tracé »
- Entrez « 20 » dans ANGLE D'ÉLÉVATION
- Cliquez sur le bouton "FF PLOT" en bas à gauche du menu principal



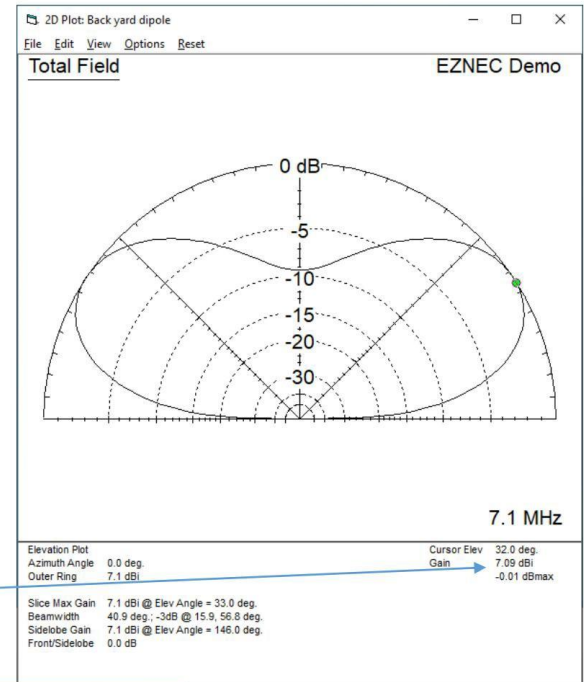
EZNEC Demo v. 6.0
File Edit Options Outputs Setups View Utilities Help
Back yard dipole
File BYDipole.ez
> Frequency 7.1 MHz
Wavelength 138.531 ft
> Wires 1 Wire, 11 segments
> Sources 1 Source
> Loads 0 Loads
> Trans Lines 0 Transmission Lines
> Transformers 0 Transformers
> L Networks 0 L Networks
> Ground Type Real/MININEC
> Ground Descrip 1 Medium (0.0303, 20)
> Wire Loss Zero
> Units Feet
> Plot Type Azimuth
> Elevation Angle 20 Deg.
> Step Size 1 Deg.
> Ref Level
> Alt SWR Z0 75 ohms
> Desc Options
FF Plot

Diagrammes d'antenne : vue en élévation



Pour DX, vous souhaitez peut-être optimiser votre modèle à 10 degrés au-dessus de l'horizon. Ici, l'antenne de 60 pieds de haut et 40 m n'a que 0,76 dBi de gain

Pour le travail domestique, les signaux arrivent généralement à des angles plus élevés. À 32 degrés, la même antenne a 7,09 dBi de gain



Wires

Wire Create Edit Other

Coord Entry Mode Preserve Connections Show Wire Insulation

No.	End 1				End 2				Diameter (in)	Segs	Insulation	
	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Conn	X (ft)	Y (ft)	Z (ft)	Die C			Thk (in)	
1	0	0	60		0	68	60		#12	11	1	0
*												5

Abaissons l'antenne à 10 mètres

Vous pouvez superposer des motifs à des fins de comparaison. Ici, le modèle précédent du dipôle de 20 mètres de haut (trace bleue) est comparé à la même antenne à 10 mètres de hauteur

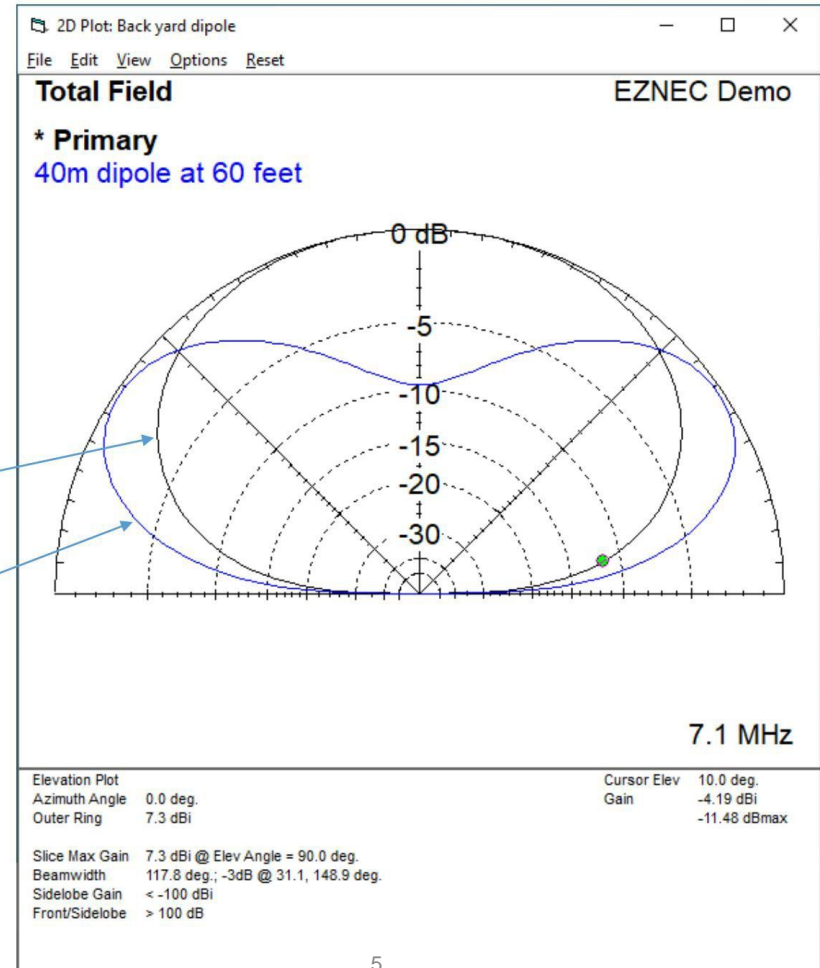
30 pieds de hauteur

60 pieds de hauteur

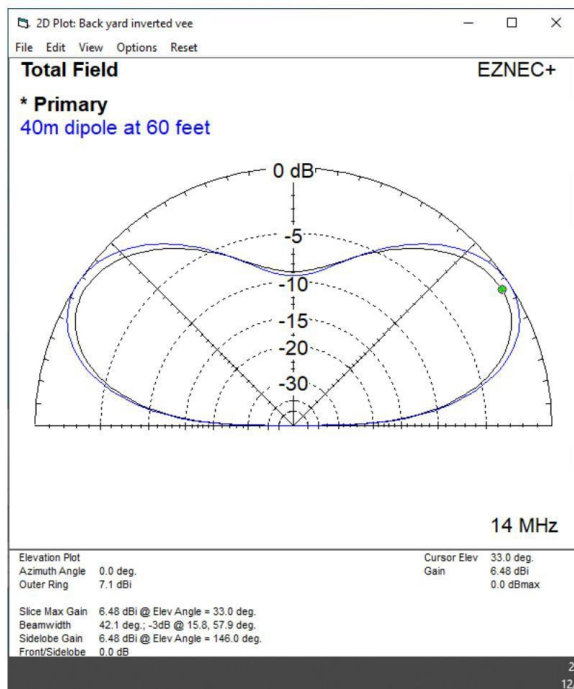
Notez que le gain pour le meilleur DX à 10 degrés d'élévation est passé de 0,76 dBi à -4,19 dBi... presque 5 dB de différence !

De plus, le gain pour le travail domestique a chuté de près de 3dB (la moitié de la puissance)

La hauteur est importante pour la polarisation horizontale.



Vue en élévation du V inversé



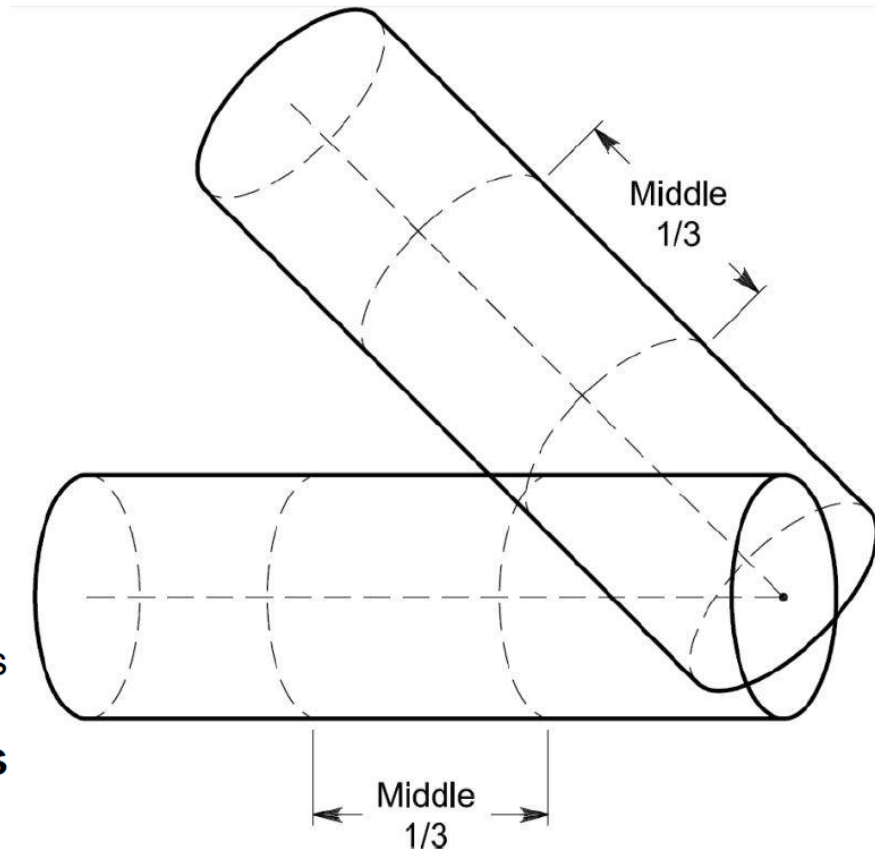
L'anneau extérieur (tracé bleu) est un dipôle droit

Pas beaucoup d'impact sur le motif. Peut-être environ 1 dB de perte à l'angle de crête.

Les différences sont moindres car l'angle diminue

Conseils généraux pour améliorer la simulation NEC

- **Segment length to wavelength rule**
 - Segment length $< \lambda/20$
- **Segment length to diameter rule**
 - Segment length $> 2 \times$ diameter is preferred
 - Segment length $> 1.0 \times$ diameter is required (no tuna cans or hockey pucks)
- **Equal segment length rule**
 - Segments that join should have approximately equal lengths
 - Never connect long segments to short segments
- **Acute angle junction rule**
 - Junction angles or segment lengths large enough that middle 1/3 of joined segments don't interpenetrate
- **Segment alignment rule for parallel wires**
 - Closely spaced parallel wires should have their segments aligned (paired)
- **Wires near ground**
 - All wires should be least two diameters above ground
 - Wires cannot touch ground



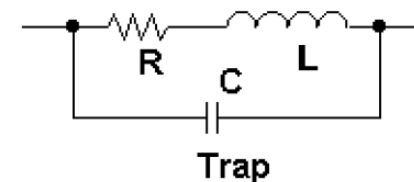
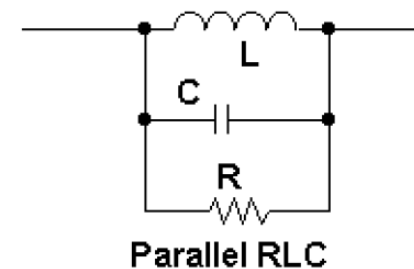
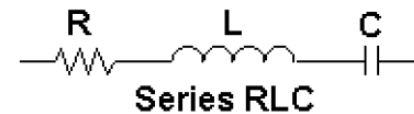
Sources

- **NEC2 and NEC4 provide 6 excitation source types: 3 for transmit and 3 for receive or scattering analysis**
 - Multiple feedpoints are allowed and useful for phased arrays
 - Rules determining whether loads, network connections, and transmission lines are in series or parallel with source vary by source type
- **Type 0 voltage source (applied field source)**
 - Located mid segment; cannot be located in a NEC symmetry plane
 - Adjacent segments should have same length
 - A good general purpose source; not finicky
- **Type 4 current source (magnetic frill)**
 - Located mid segment; cannot be located in a NEC symmetry plane; should not be placed near ground or nearby metal
 - A good general purpose source; not finicky
- **Type 5 voltage source (bicone source)**
 - Is located at a segment end or at a junction between adjacent segments; can be located in a NEC symmetry plane
 - Junction must be of two segment that are parallel, equal lengths and radii; no 3-way junctions; no loads, network connections, or transmission lines
 - Two Type 5 sources can make a “split-feed” by putting two half-voltage sources on adjacent segment ends

Charges insérées

- **Ideal, non-radiating point loads can be inserted in any segment**
 - **If a segment contains both source and load, they are in series**
 - **Loads are used to model coils, traps, wire conductivity and plastic insulation**
 - **Load types available in NEC2 are series loads of the following types**
 - Constant impedance $R + jX$
 - Series RLC network
 - Parallel RLC network
 - **Load types not native to NEC2**
 - Loads in parallel, not series
 - Trap networks
 - Laplace impedances
- positive-real rational function up to 5th degree

$$Z(f) = \frac{P(j\omega)}{Q(j\omega)} = \frac{a_5(j\omega)^5 + a_4(j\omega)^4 + a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + a_0}{b_5(j\omega)^5 + b_4(j\omega)^4 + b_3(j\omega)^3 + b_2(j\omega)^2 + b_1(j\omega) + b_0}$$



Diélectriques et isolants sur les fils

- Dielectrics occur in antennas in bulk form or insulated wires, e.g. polyrod antennas, twin-lead folded dipoles, twin-lead J-poles, Butternut radials, buried radials
- NEC2 has no capability for dielectrics
- NEC3 and NEC4 handle dielectrics by accurate methods
 - NEC3 handles wires in semi-infinite dielectric media, e.g. buried radials
 - NEC4 handles insulated wires by accurate methods
 - Modern CEM codes such as FEKO, WiPL-D, and HOBBIES handle dielectrics accurately by surface or volume equivalence principles
- L.B. Cebik in Note 83 attempted to reverse engineer insulated wire corrections from NEC4 but did not discover the full answer
- EZNEC v.4 and up claim to do insulated wires but use NEC2, which has no capability to model dielectric coated wires
- EZNEC Pro/4 uses NEC4, which has accurate dielectric capability

En pratique pour les fils isolés

$$a' = a \times \left(\frac{b}{a} \right)^{\left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \right)} \quad \text{and} \quad L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{a'}{a} \right) = 2 \times 10^{-7} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \right) \ln \left(\frac{b}{a} \right)$$

AWG wire gauge	Wire diameter $d = 2a$ (mm)	Insulation diameter $D = 2b$ (mm)	Insulation material & dielectric constant ϵ_r	Equivalent diameter $d' = 2a'$ (mm)	Loading inductance L (nH/m)
10 stranded	2.9	3.4	2.1 (PTFE)	3.15	16.7
10 solid	2.6	4.5	3.6 (PVC)	3.86	79.2
12 stranded	2.4	2.9	2.1 (PTFE)	2.65	19.8
12 solid	2.1	3.9	3.6 (PVC)	3.28	89.4
14 stranded	1.9	2.4	2.1 (PTFE)	2.15	24.5
14 solid	1.6	3.4	3.6 (PVC)	2.76	108.9

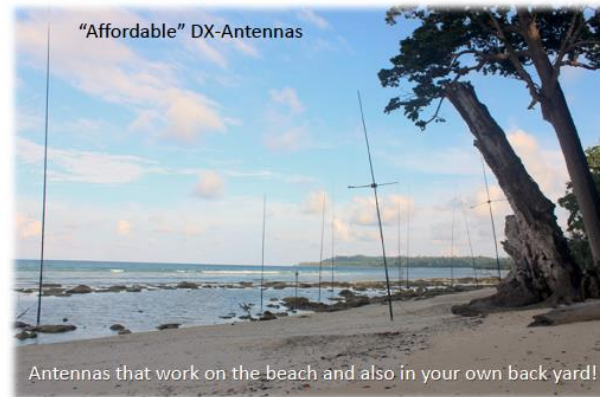
Pour vos week-ends, voyages et pour vous familiariser avec EZNEC

Une collection d'antennes filaires qui fonctionne vraiment, par DJ0IP !

2€

Wire Antennas that WORK!

A collection of details and descriptions of antennas
based on Spiderbeam fiberglass poles,
as described in greater detail on DJ0IP's Web Page:
WWW.DJ0IP.DE

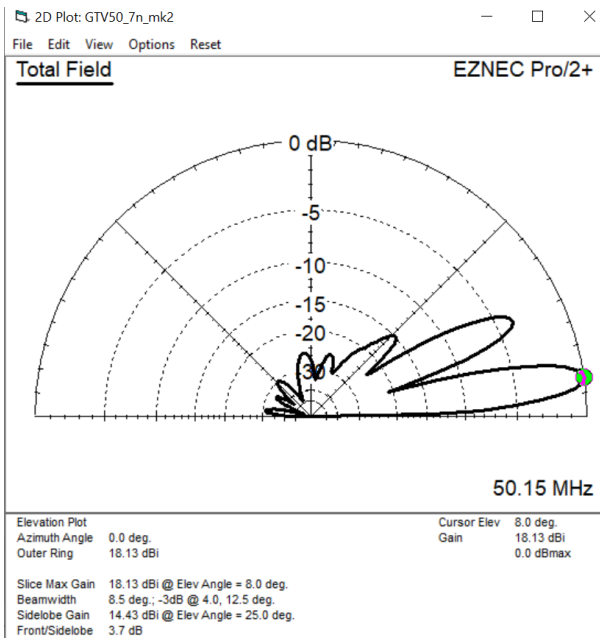
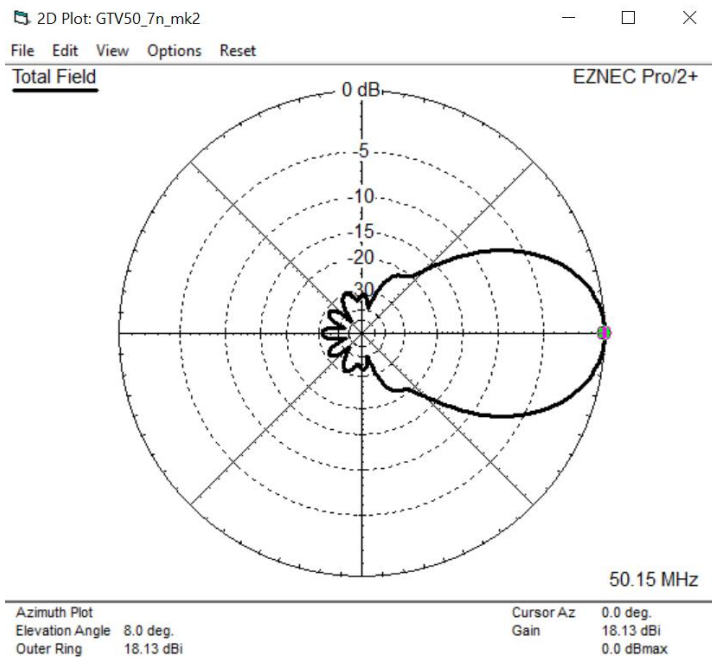
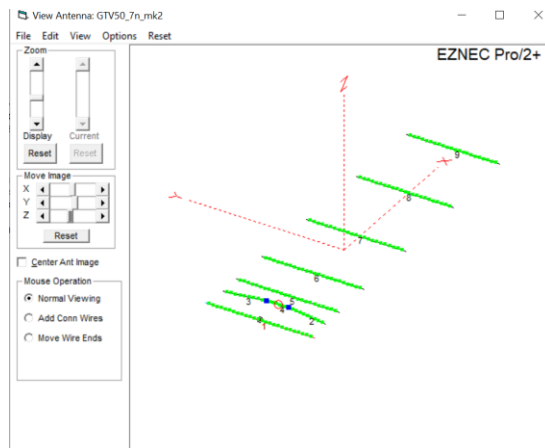
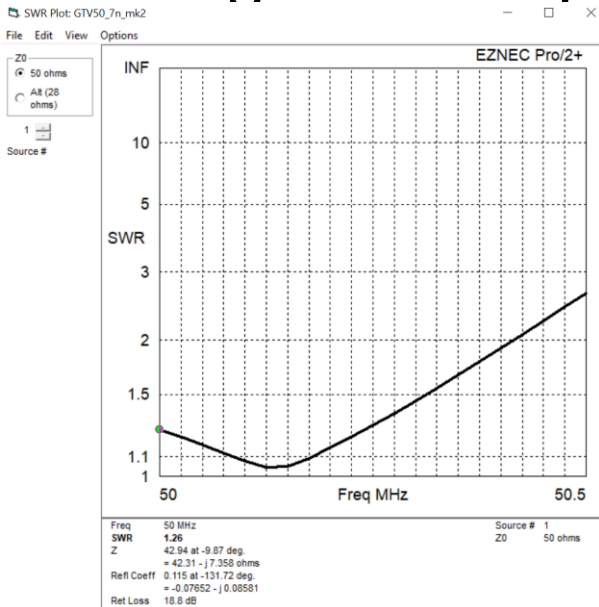


The antennas described in this booklet were designed to be efficient, yet simple enough for the average ham to build, using common hand tools. Several of these antennas are used regularly by DX-peditions to all corners of the world. All of these antennas have been built and tested by at least one of the Spiderbeam Team members: DF4SA / DF9GR / DJ0IP / DL9USA / DO5PNS / W4PA.



First Edition, June 2016 - © Spiderbeam GmbH

Une Yagi 50 Mhz pour le contest de juin



Slice Max Gain	18.13 dBi @ Az Angle = 0.0 deg.
Front/Back	31.25 dB
Beamwidth	42.2 deg.; -3dB @ 338.9, 21.1 deg.
Sidelobe Gain	-11.75 dBi @ Az Angle = 112.0 deg.
Front/Sidelobe	29.88 dB

Logiciel accessoire pour EZNEC

AutoEZ 2.0.18 par Dan Maguire, AC6LA, <http://www.ac6la.com>

Programme Excel/Visual Basic

- Version démo, gratuite (limite de 30 segments)
- Version régulière, 79 \$

Nécessite Excel et EZNEC installés sur l'ordinateur
EZNEC pour effectuer plusieurs exécutions

- C'est une interface graphique pour une interface graphique pour NEC

Possède un optimiseur - algorithme Nelder-Mead

Lit les fichiers NEC, AO et MMANA-GAL Ne

fonctionne pas avec EZNEC-ARRL ou EZNEC Demo

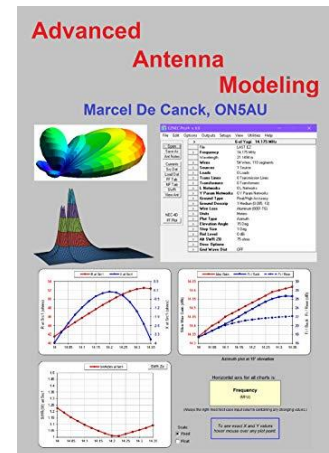
Remplace MultiNEC, qui n'est plus disponible Fortement
recommandé pour les utilisateurs EZNEC

Contrôle

Advanced Antenna Modeling par Marcel De Cank ON5AU,
http://www.on5au.be/advanced_modeling_book.html

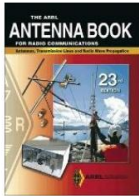
Livre de support très détaillé pour utiliser EZNEC et AutoEZ

- Disponible sur Amazon , en abonnement Kindle ou en achat Kindle 18 €
- Excellent ouvrage de référence

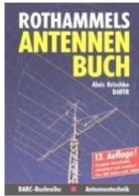


Livres sur les antennes pour les radio-amateurs

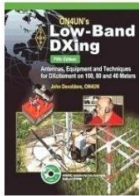
Livres pour radioamateurs



HW Silver, N0AX, éd., ARRL Antenna Book, 23e, American Radio Relay League, 2015



A. Krischke, DJ0TR, éd., Rothammel's Antennenbuch, 13e, DARC Verlag, 2013

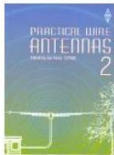


J. Devoldere, ON4UN, ON4UN's Low-Band Dxing, 5e, American Radio Relay League, 2011

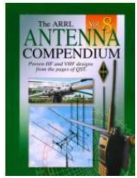
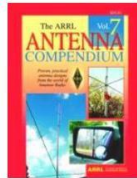
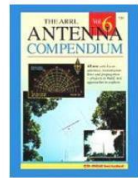
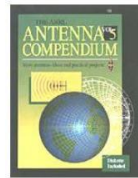
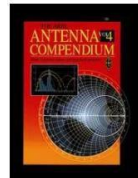
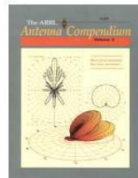
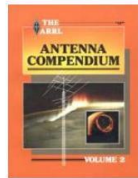
Poole, G3YWX, ed., Practical Wire Antennas 2, Radio Society of Great Grande-Bretagne, 2005

J. Sevick, W2FMI, The Short Vertical Antenna and Ground Radial, CQ Communication, 2003

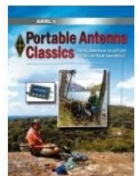
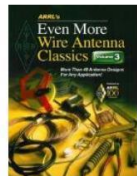
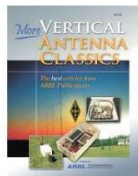
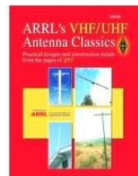
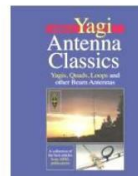
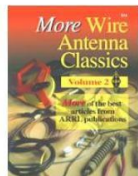
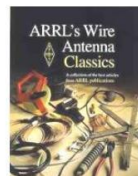
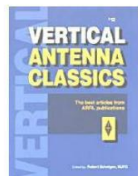
L. Moxon, G6XN, Antennes HF pour tous les emplacements, 2e, RSGB, 1983



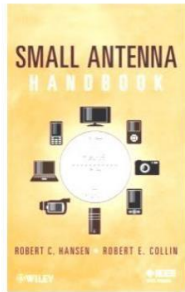
Série ARRL Antenna Compendium - huit volumes



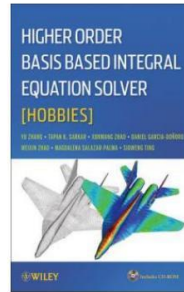
Série ARRL Antenna Classics - huit titres



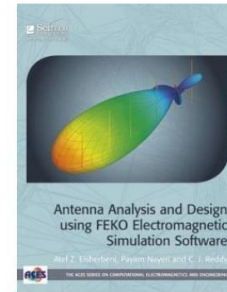
Livres d'intérêt récents sur les antennes



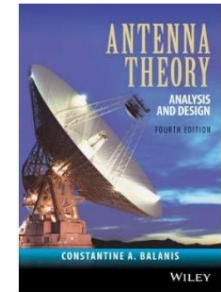
RC Hansen et RE Collin, Manuel des petites antennes, Wiley, 2011



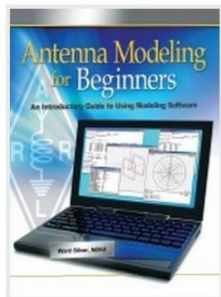
Y. Zhang et al., Solvateur d'équations intégrales basé sur une base d'ordre supérieur (HOBBIES), Wiley, 2012



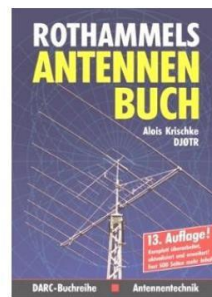
Elsherbeni, et al., Analyse et conception d'antennes à l'aide de FEKO..., SciTech / IET, 2014



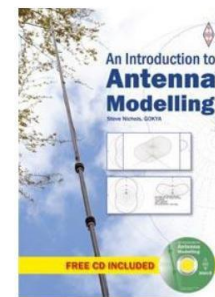
CA Balanis, Théorie des antennes : analyse et conception, 4e, Wiley, 2016



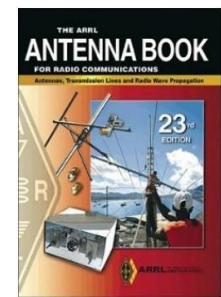
HW Silver, N0AX, Modélisation d'antennes pour débutants, ARRL, 2012



A. Kruschke, DJ0TR, éd., Rothammels Antennen Buch, 13e, DARC, 2013

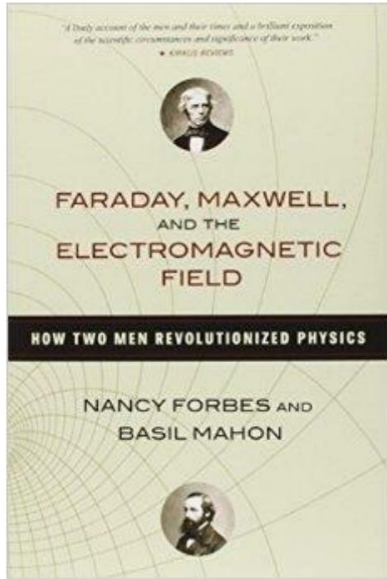


S. Nichols G0KYA, Une introduction à la modélisation d'antenne, RSGB, 2014

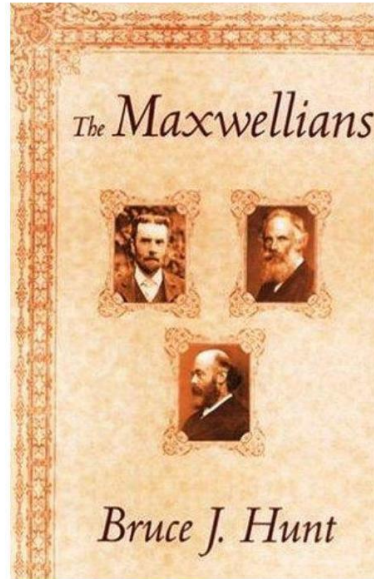


HW Silver, N0AX, éd., ARRL Antenna Book, 23e, ARRL, 2015

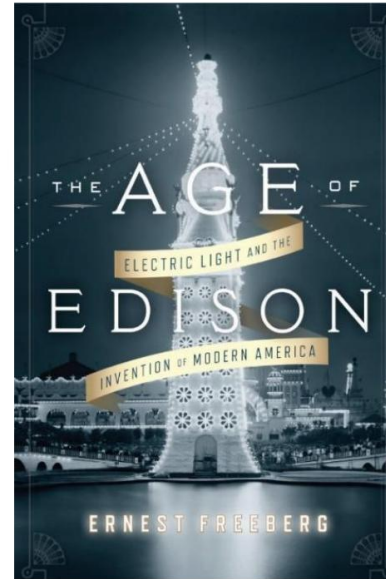
Quatre bonnes lectures sur l'histoire



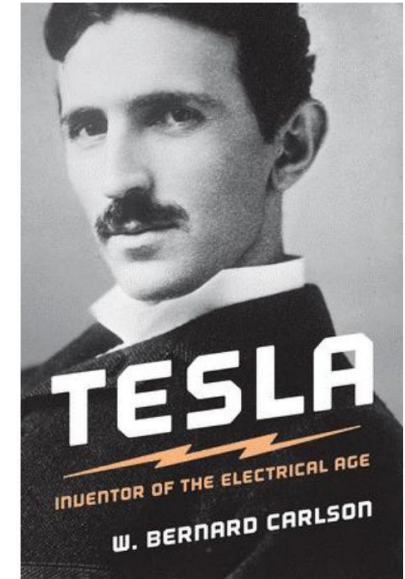
Nancy Forbes et Basilic Mahon, Faraday, Maxwell and the Electromagnetic Field, Prometheus, 2014



Bruce J. Hunt, The Maxwellians, Cornell University Press, 1991



Ernest Freeberg, The Age of Edison, Pinguen Books, 2014



W. Bernard Carlson, Tesla : Inventor of the Electrical Age, Princeton University Press, 2015