



Propagation par onde de sol en HF et VHF

Y. Béniguel (1), J-P Adam (1), M. Darces (2), F. Jangal (3)

(1) IEEA, Courbevoie

(2) UPMC L2E

(3) ONERA, Palaiseau





- Un outil de simulation adapté
 - Technique de calcul des antennes HF
 - Onde de ciel vs onde de sol
 - Propagation de l'onde de sol

- Des besoins concrets
 - Systèmes radar
 - Recherche sur l'onde de surface

- Conclusion

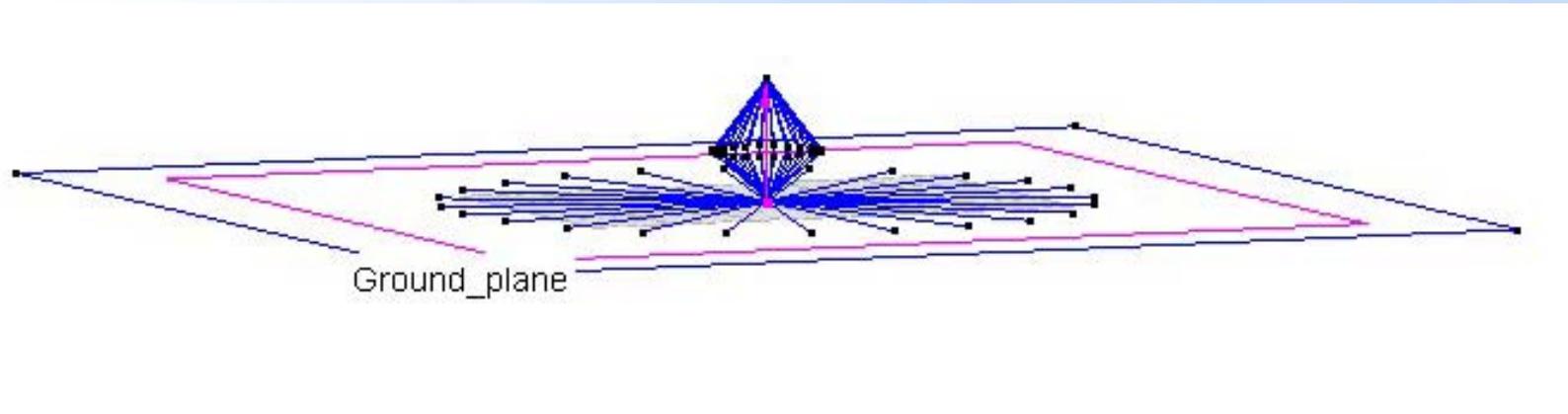




Un outil de simulation adapté



Antenne bi conique de dimension type



L'antenne bi conique peut être adaptée pour fonctionner dans toute la bande HF

Prise en compte du sol réel

Méthode des équations intégrales



2 modifications

L'EFIE est modifiée en ajoutant des termes complémentaires afin de satisfaire aux conditions aux limites à l'interface air – sol (formulation des potentiels mixtes)

Les potentiels (vecteur et scalaire) font apparaître le calcul des intégrales de Sommerfeld



Equation EFIE modifiée

$$E^i = j \omega \langle G^A, J \rangle - \frac{1}{j \omega \varepsilon} \nabla \left(\langle K_\Phi, \nabla' \cdot J \rangle + \langle C_\Phi \hat{z}, J \rangle \right)$$

$$G^A = \begin{bmatrix} G_{vv}^A & 0 & 0 \\ 0 & G_{vv}^A & 0 \\ G_{zu}^A & G_{zu}^A & G_{zz}^A \end{bmatrix}$$

Formulation directement utilisable dans un code MoM (ICARE)

Les termes G_{xx} ; K_ϕ et C_ϕ font apparaître les intégrales de Sommerfeld (Transformée de Hankel)





Technique des images complexes

Les singularités sont sorties de l'intégrale et traitées à part

Choix d'un contour d'intégration spécifique





Identité de Sommerfeld

$$\frac{\exp(-jkR)}{R} = \int \frac{1}{2jk_z} H_0^2(k_\rho \rho) \exp(-jk_z |z|) k_\rho dk_\rho$$

Ex : G_{zz}

$$G_{zz} = \int \frac{1}{2jk_z} \frac{n^2 k_z - k_{z1}}{n^2 k_z + k_{z1}} H_0^2(k_\rho \rho) \exp(-jk_z(z+z')) k_\rho dk_\rho$$

$$R_{TM} = \frac{n^2 k_z - k_{z1}}{n^2 k_z + k_{z1}} = R_{TM}(\text{régulière}) + R_{TM}(\text{pôles}) + R_{TM}(k_\rho \longrightarrow \infty)$$

Chacun des trois termes est géré séparément





Approximation des fonctions $f(k_\rho)$ par une somme d'exponentielles (typiquement 4 ou 5)

$$f(k_\rho) = \frac{n^2 k_z - k_{z1}}{n^2 k_z + k_{z1}} = \sum_1^{N_i} a_i \exp(-b_i k_z)$$

Les distances correspondantes (images) dans l'identité de Sommerfeld sont complexes

$$R_i = \sqrt{\rho^2 + (z + z' - j b_i)^2}$$



Les pôles sont traités par paires. Les résidus sont calculés analytiquement

$$G_{zz} = \int \frac{1}{2 j k_z} \frac{2 k_{\rho p} \text{Residue}}{k_{\rho}^2 - k_{\rho p}^2} H_0^2(k_{\rho} \rho) \exp(-j k_z (z + z')) k_{\rho} dk_{\rho}$$

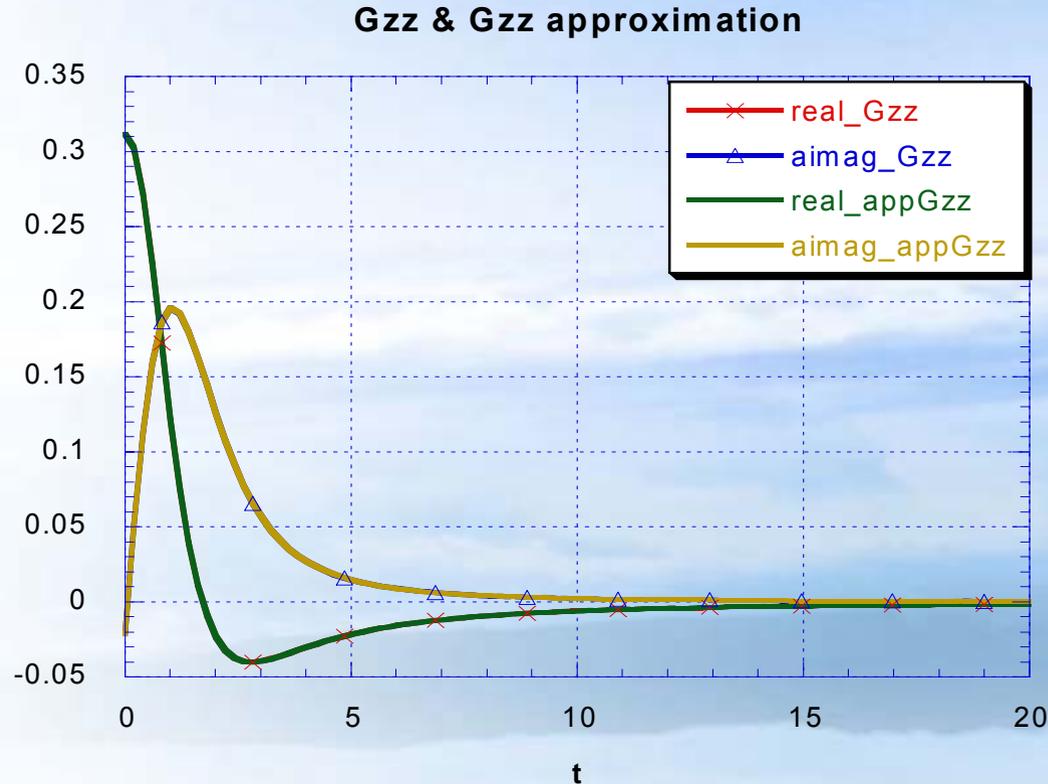
Les fonctions correspondantes sont approximées par la même technique

$$\frac{2 k_{\rho p} \text{Residue}}{k_{\rho}^2 - k_{\rho p}^2} = 2 k_{\rho p} \text{Residue} \sum_1^{N_i} a_i \exp(-b_i k_z)$$



Intégrale restante sur le nouveau contour d'intégration

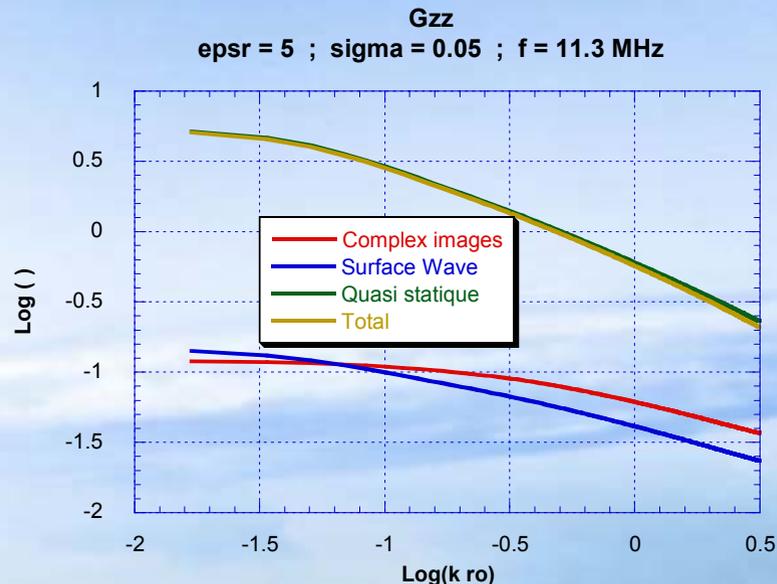
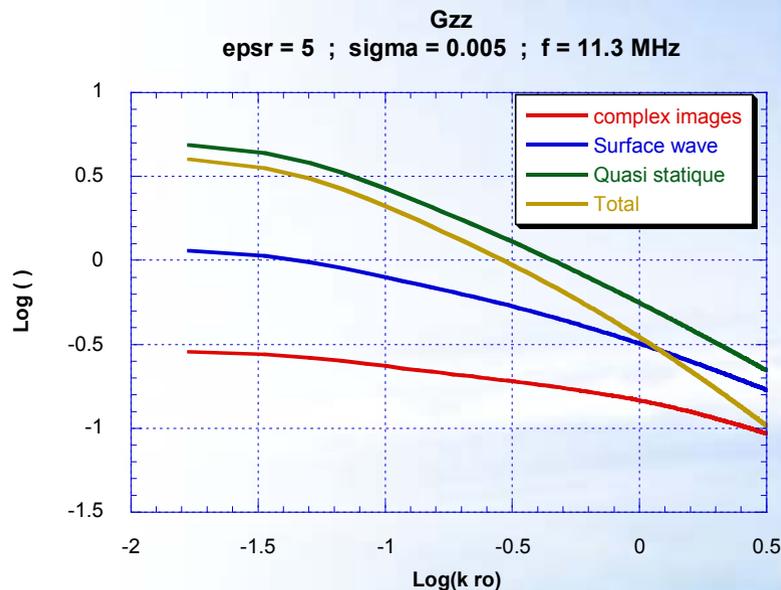
Traitement de la partie régulière



4 images



Poids relatif des différentes contributions



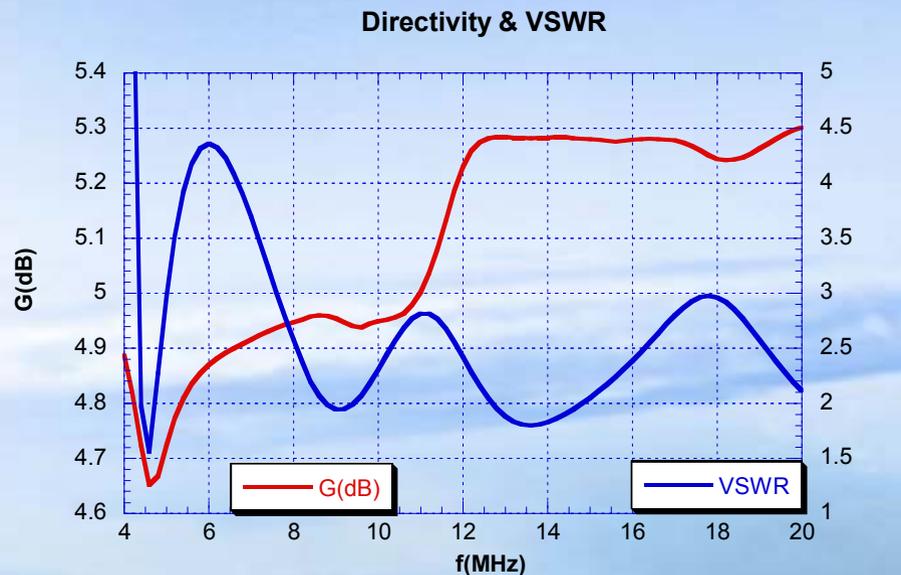
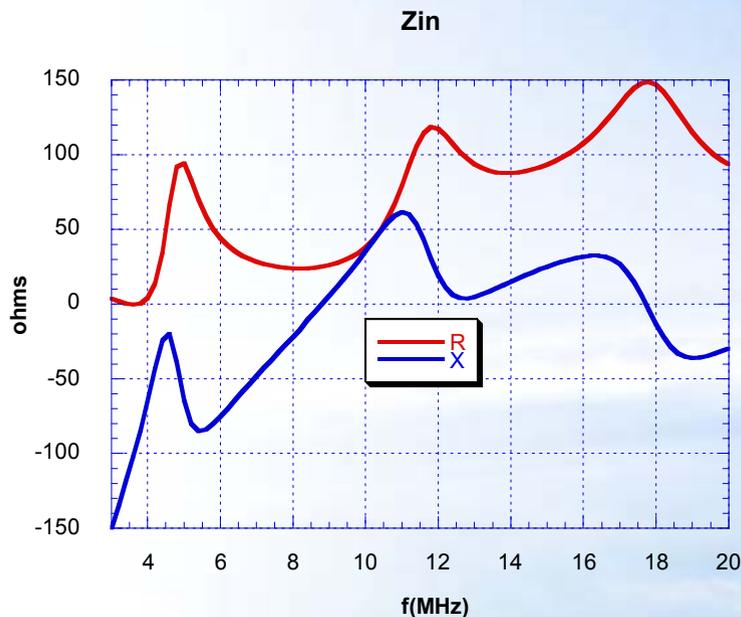
Complex images → la partie régulière

Surface wave → la contribution du pôle

Quasi statique → $k_p \rightarrow \text{infini}$



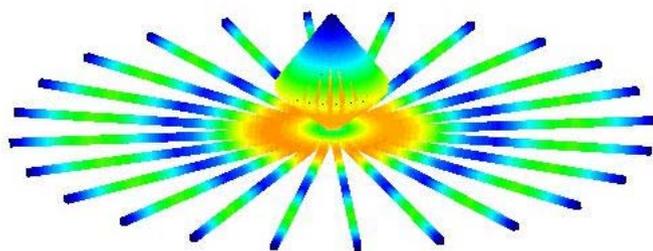
Résultats types sur une antenne bi conique



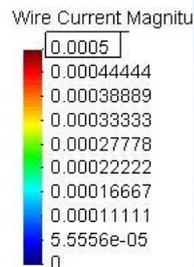
On peut améliorer l'adaptation en augmentant la surface du plan de masse, en ajoutant un toit capacitif, ...

+ cellule d'accord





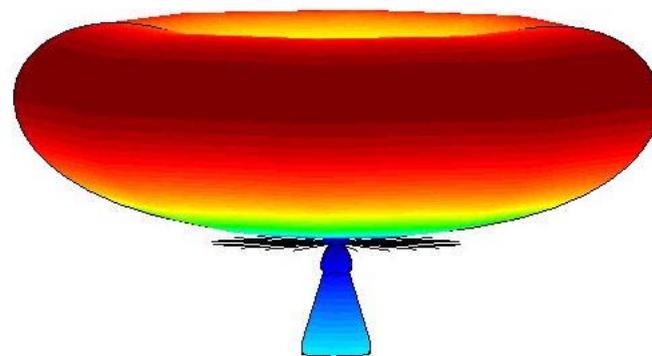
Currents
Contour Fill of Wire Current Magnitude (A).



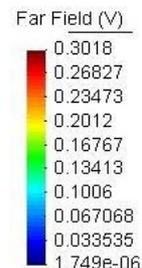
Dimension du plan de masse

- Adaptation
- Angle de tir

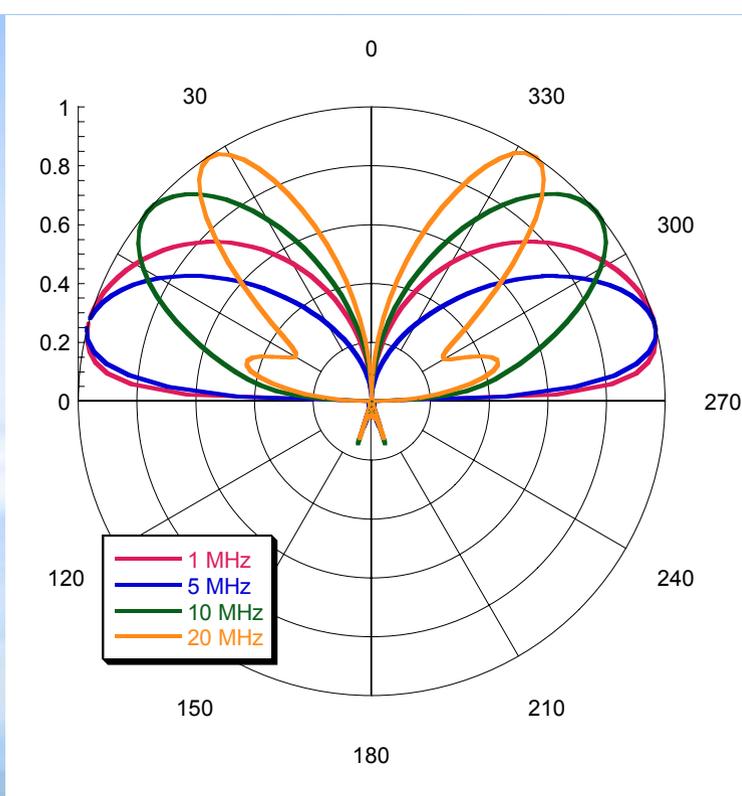
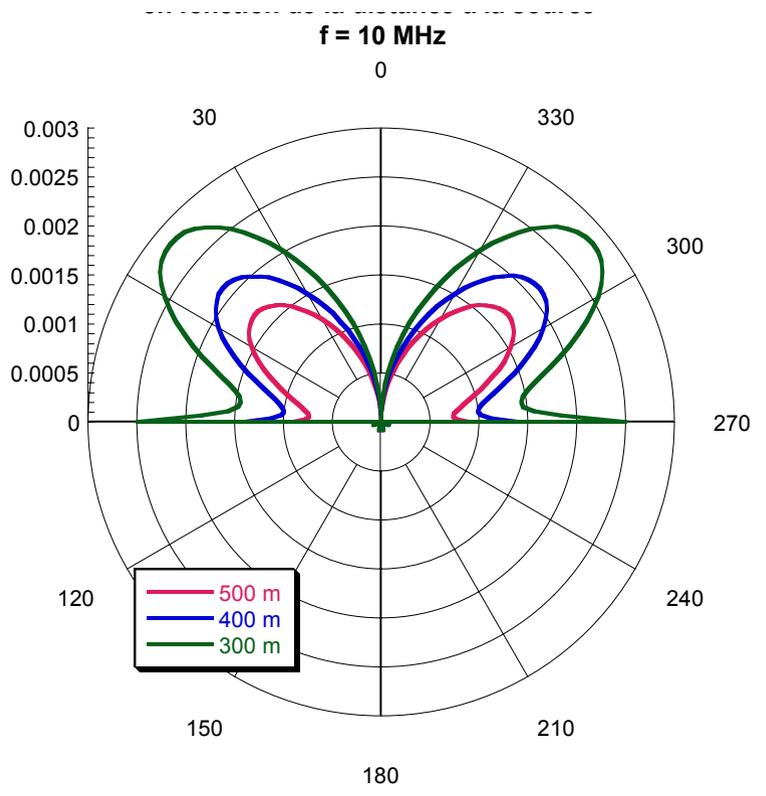
Faible incidence de la taille du plan de masse sur la diminution de l'angle d'élévation correspondant à la direction de pointage



Far Field
Contour Fill of Far Field (V).
Deformation (x1): Far Field 3D of Far Field, step 1.



Champ proche / Champ lointain



Onde de ciel + onde de sol
en fonction de la distance à
la source

Direction de pointage en
fonction de la fréquence





Le calcul de l'onde de sol est effectué en 2D en résolvant l'équation parabolique

- Condition initiale : le champ proche rayonné sur une droite verticale à l'interface
- Condition d'impédance de Léontovitch à l'interface
- Fonction d'apodisation à la frontière supérieure





Simplification de l'équation de propagation

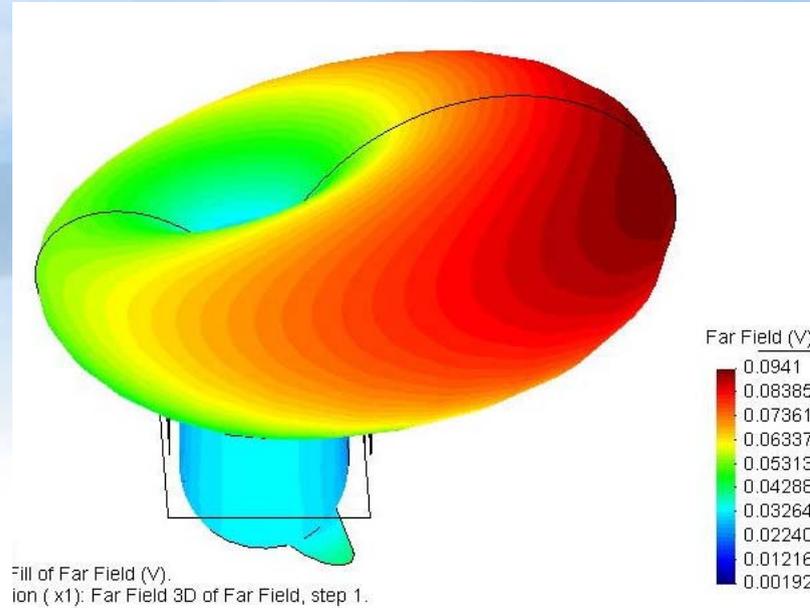
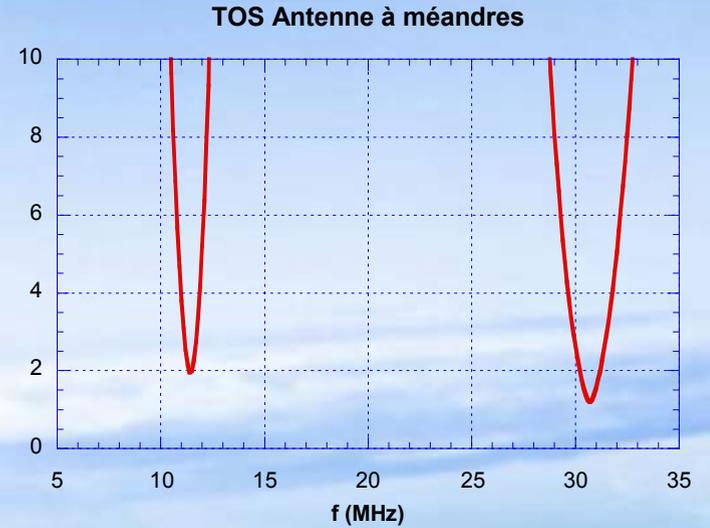
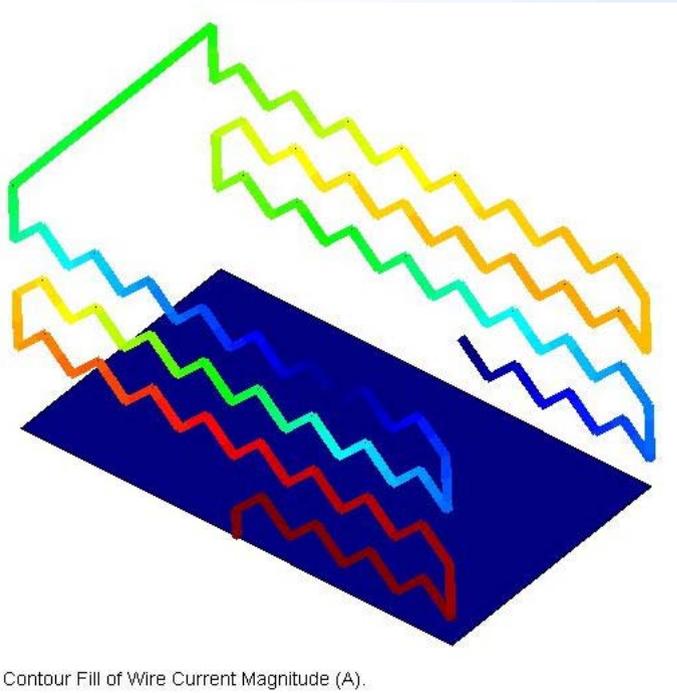
$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2jk \frac{\partial u}{\partial x} + k^2 (n^2 - 1)u = 0$$

Solution en $x + \Delta x$ sachant la solution en x

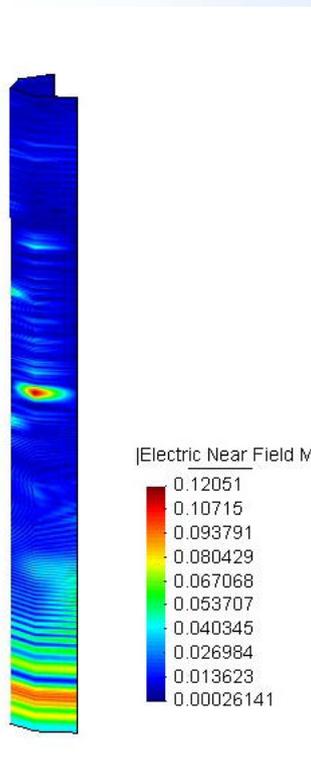
$$u(x, z) = \exp \left(j \frac{k}{2} (n^2 - 1) \Delta x \right) \text{FFT}^{-1} \left\{ \exp \left[-j \frac{k^2 \Delta x}{2k} \right] \text{FFT} \left[u(x_0, z) \right] \right\}$$



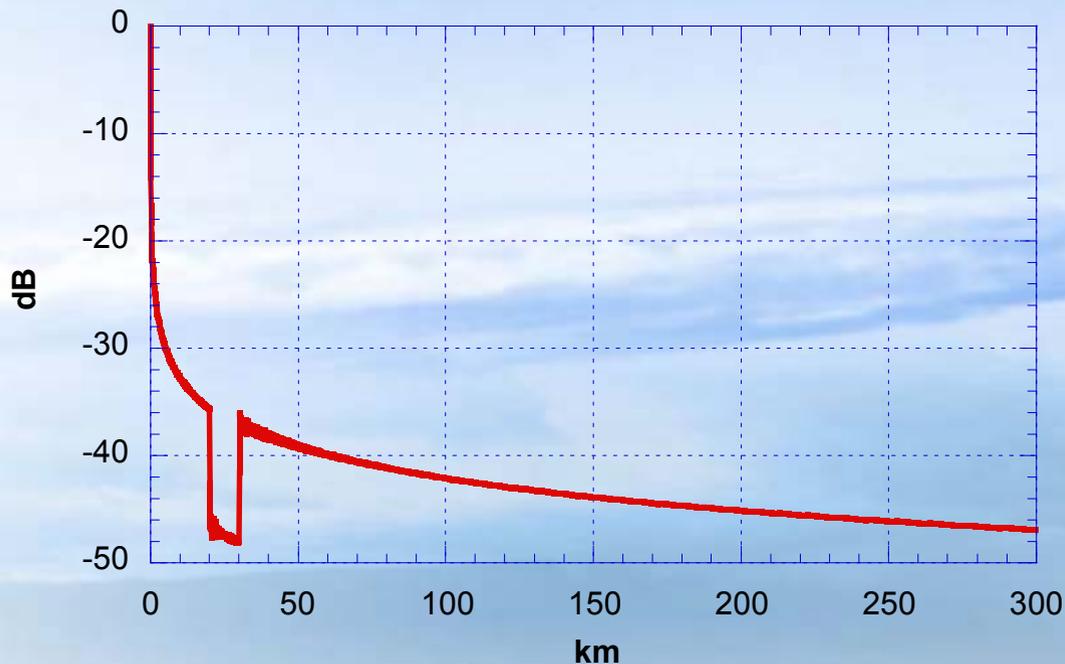
Antenne compacte à méandres



Champ proche et onde de sol



mer : $\epsilon_{psr} = 80$; $\sigma = 5$
sol : $\epsilon_{psr} = 5$; $\sigma = 0.003$



Champ proche
Rayonné par l'antenne

Prise en compte d'une discontinuité
d'impédance de 10 km de longueur située
à 20 km de la source

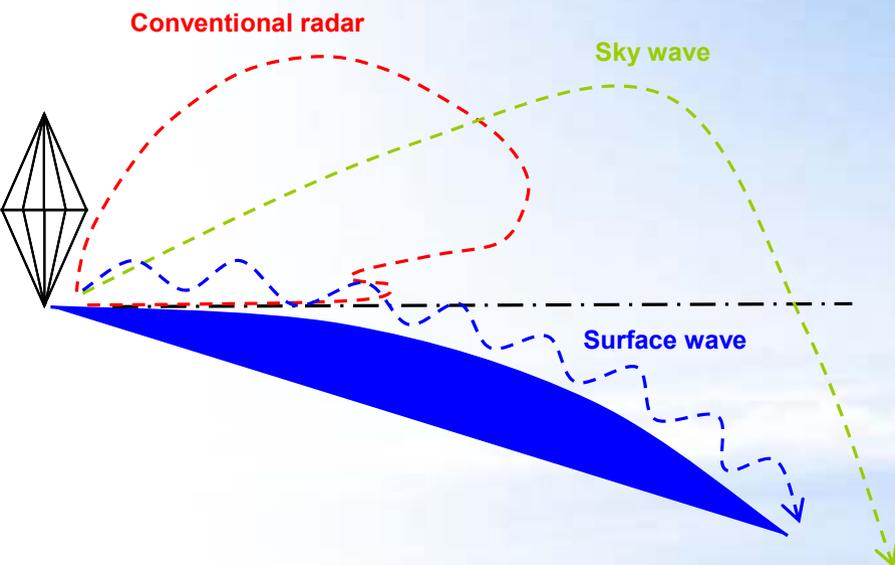




Des besoins concrets



Radars transhorizon

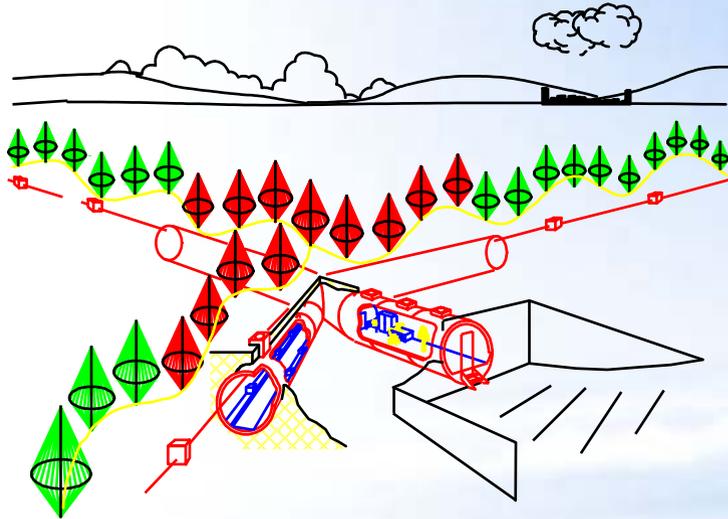


Ondes de ciel : cible lointaine

Ondes de surface : ZEE

Bande HF : 3-30MHz

- Faibles coûts
- Dimension des antennes
- Importance du sol

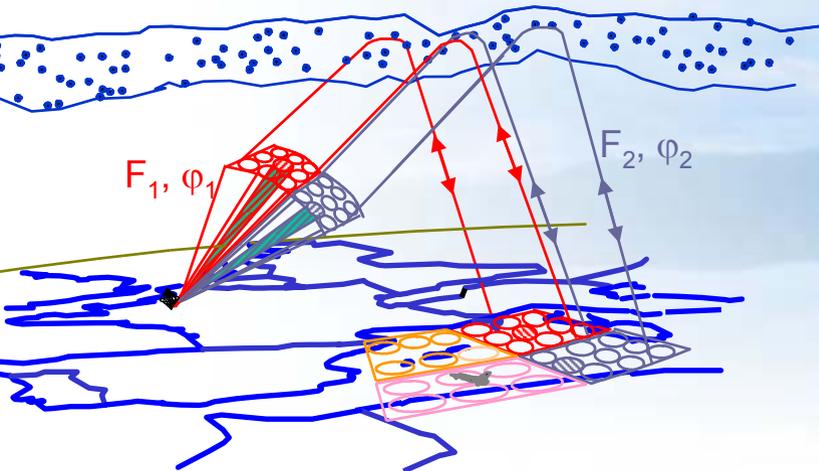


Réseau Monostatique Surfaccique

- Omnidirectionnel en Azimut
- Focalisation en élévation

Limitation des multi-trajets

Auto-calibrage



Longue portée

- Angles faibles / fréquence élevée
- Simulation fine du sol
- Séparation des contributions

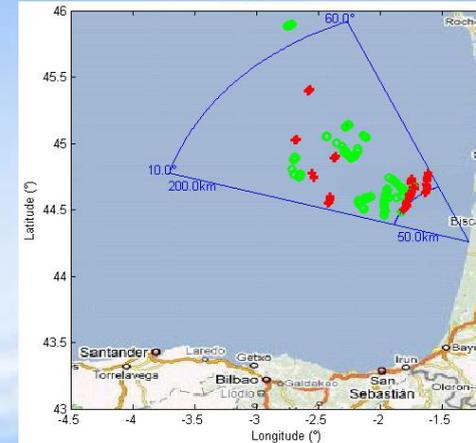
Surface wave



Réseau d'émission



Réseau de réception



Maquette bistatique : détection au-delà de 150 km

Maquette monostatique : détection au-delà de 170 km

Couverture efficace de la ZEE

- Focaliser l'énergie
- Simulation fine du sol
- Changements de milieux

Résultats sur l'antenne bicône

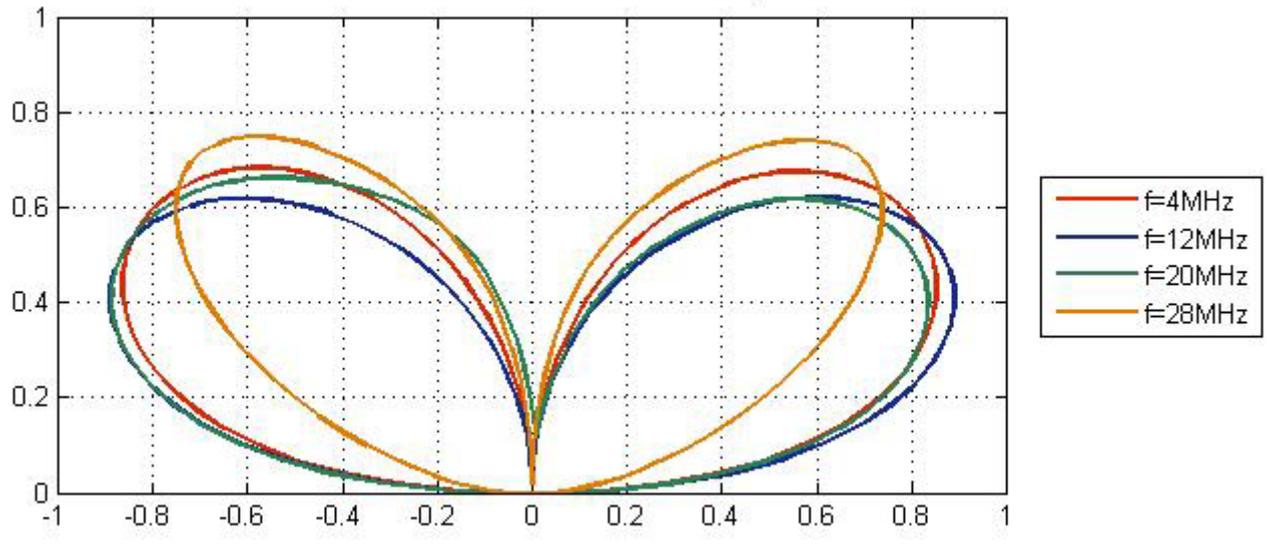
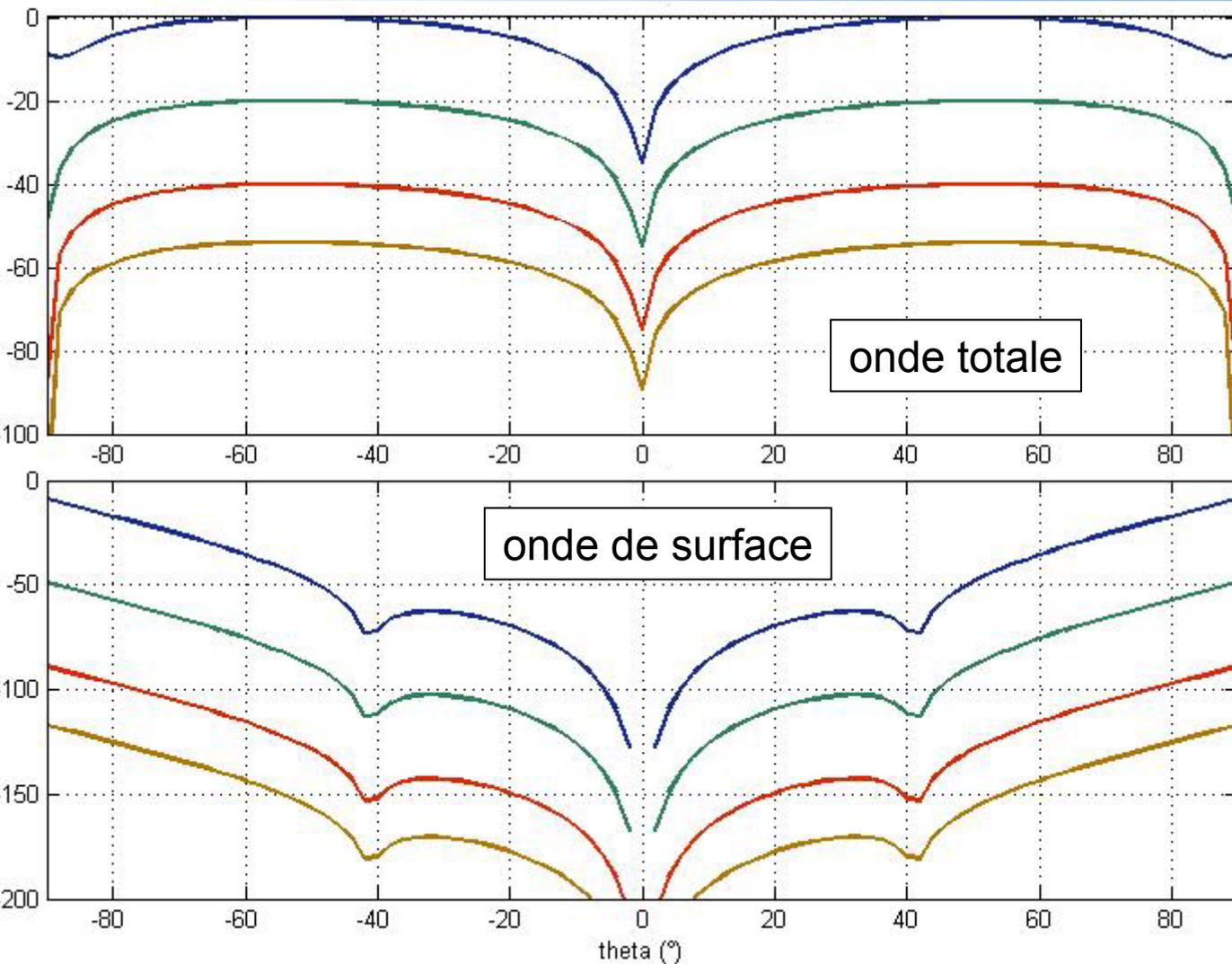


diagramme de rayonnement

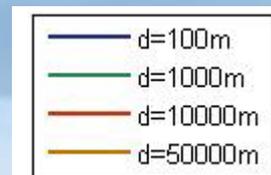
sur la bande HF

séparation des composantes

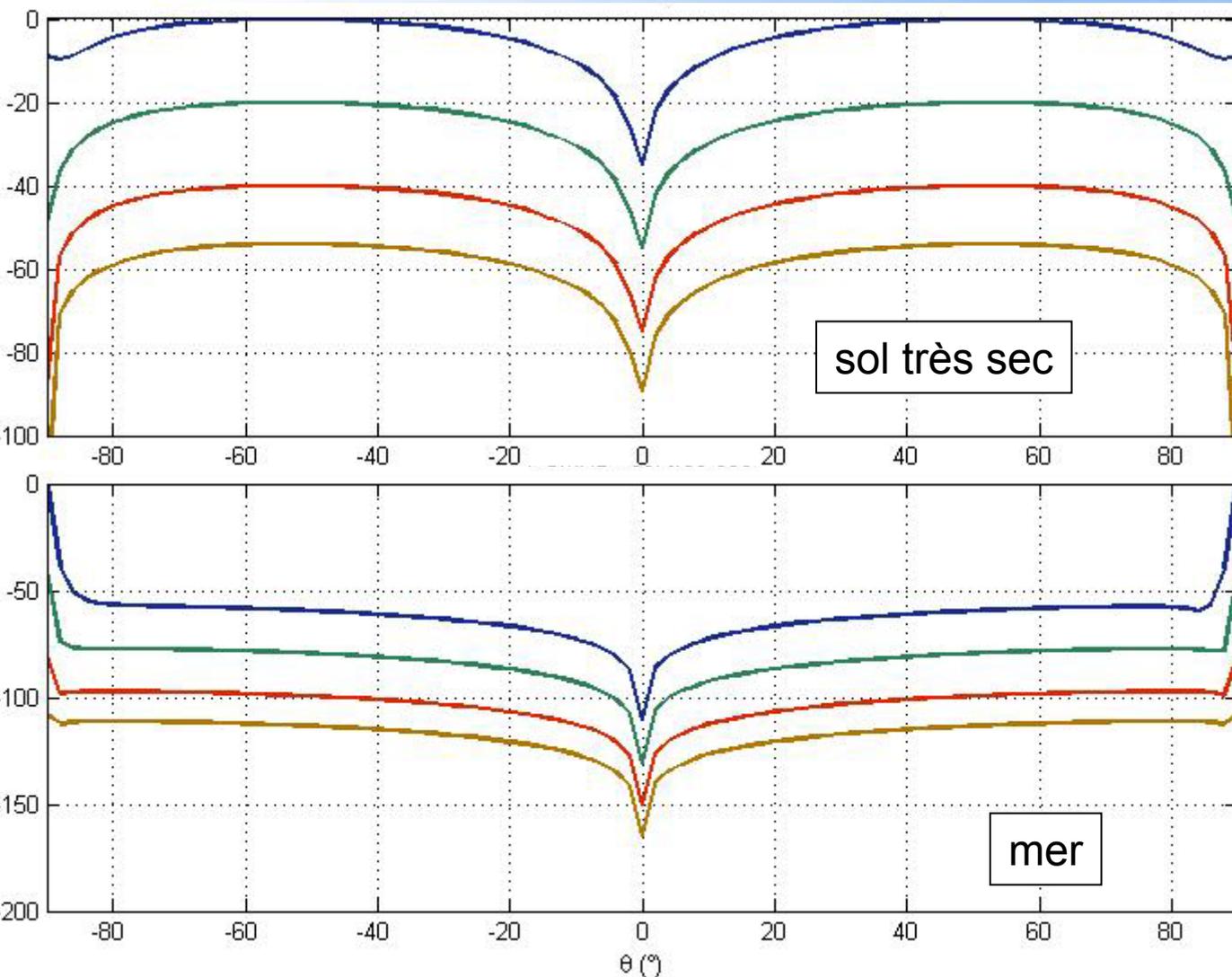


sol très sec

f=8MHz

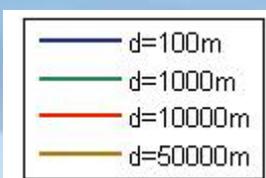


influence de la nature du sol



onde totale

$f=8\text{MHz}$





Modélisation

- Prise en compte des réseaux (le code a été parallélisé)
- Sommerfeld (calculs parallèles par la technique de la phase stationnaire)
- Généralisation aux structures multicouches

Conception d'antenne

- Optimiser la géométrie pour privilégier le mode de propagation par onde de surface
- Prise en compte des ruptures d'impédances

