

Propagation de l'onde de surface de Zenneck (plasmon) au-dessus d'une surface rugueuse très conductrice

Christophe Bourlier, Gildas Kubické, Yohann Brelet
 IREENA, Fédération CNRS Atlanstic, Université de Nantes
 Polytech'Nantes, Site de la Chantrerie, rue C. Pauc, 44306 Nantes Cedex 3, France
christophe.bourlier@univ-nantes.fr

HISTORIQUE [1] ET OBJECTIF

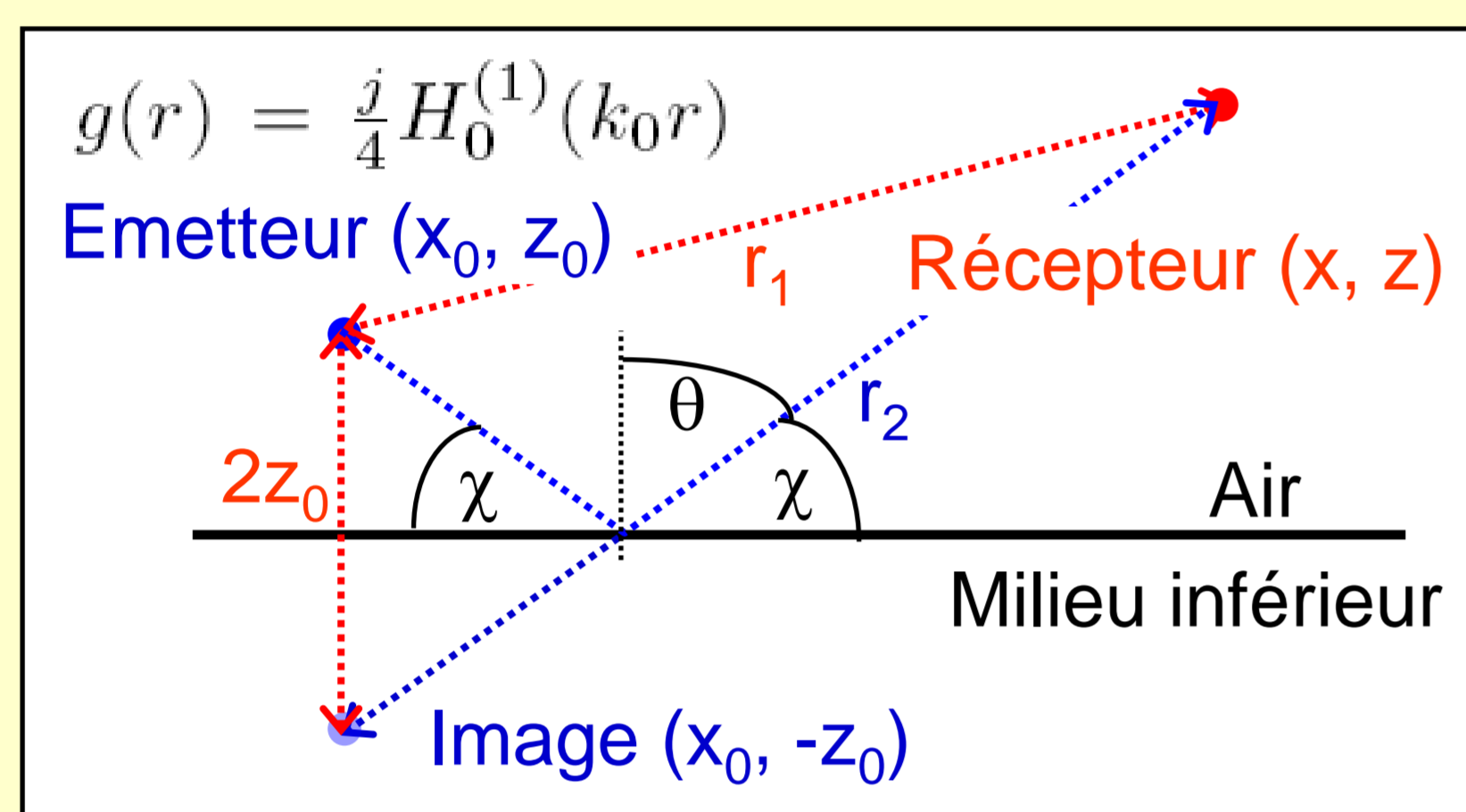
Vers 1900, dans la bande VHF ($f \in [10;100]$ MHz $\Rightarrow \lambda_0 \in [3;30]$ m) en polarisation TM (V), Marconi observe la possibilité de transmettre un signal Radar sur une très longue distance le long de la surface de la terre

- Zenneck (1907) et Sommerfeld (1909) étudient alors le problème théorique du rayonnement d'une source ponctuelle au-dessus d'une surface lisse et très conductrice (TC)
- Mathématiquement cette onde correspond à un pôle obéissant à une relation de dispersion ($k_z = k_0 \cos \theta = -k_0 \Delta$)
- Collin [1] résume les travaux effectués au siècle dernier (Sommerfeld, Zenneck, Norton, Wait [2], ...)
- Dans les années 60-70, l'effet de la rugosité de la surface est introduit (par exemple Barrick [3], Ishimaru [4], ...)
- La formulation asymptotique n'a jamais été validée par une approche rigoureuse sur une surface lisse ou rugueuse

- [1] R. E. Collin, IEEE TAP Mag., 2004
- [2] J. R. Wait, IEEE TAP Mag., 1998
- [3] D. E. Barrick, RD, 1971
- [4] A. Ishimaru, IEEE TAP, 2000
- [5] L. Tsang et al., JEW, 1993
- [6] T. Elfouhaily et al., JGR, 1997

But : Validation à l'aide de la méthode rigoureuse BMIA/CAG (Banded-Matrix-Iterative-Approach/Canonical Grid) [5]

FORMULATION DU PROBLEME SUR UNE SURFACE LISSE



Surface PC (métallique) $\Rightarrow \Delta = 0$

Surface TC $\Rightarrow 0 < |\Delta| \ll 1$

Fonction de Green total : $g_t(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = g_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) + g_s(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$

\Rightarrow Représentation de Weyl : $g_t(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = g(r_1) \pm [g(r_2) - 2P]$

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{j}{2k_z} \frac{\hat{Q}(k_x)}{1 + \hat{Q}(k_x)} e^{jk_z(z+z_0) + jk_x(x-x_0)} dk_x$$

$$\begin{cases} \hat{Q}(k_x) = \frac{k_0 \hat{\Delta}(k_x)}{k_z} \text{ (TM)} & \hat{Q}(k_x) = \frac{k_z \hat{\Delta}(k_x)}{k_0} \text{ (TE)} \\ \hat{\Delta}(k_x) = \frac{1}{n} \sqrt{1 - \frac{k_x^2}{n^2 k_0^2}} \approx \frac{1}{n} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} = \Delta \end{cases}$$

● Approche qualitative : pôle défini par $\hat{Q}(k_x) = -1$

TE : $k_z = k_{zp} = -k_0/\Delta \Rightarrow |k_{zp}| = k_0/|\Delta| \gg 1 \Rightarrow$ Non excité ($1/|\Delta| \gg 1$)

TM : $k_z = k_{zp} = -k_0 \Delta \Rightarrow |k_{zp}| = k_0 |\Delta| \ll 1 \Rightarrow$ Excité si $\theta_p \rightarrow \pi/2$

\Rightarrow En TM, incidence très rasante (soit $\chi \rightarrow 0$) et k_0 modéré

● Approche quantitative : Développement en série de l'intégrale

$$\text{TE : } P = -\frac{j}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{j\Delta}{k_0}\right)^n \frac{\partial^n}{\partial z_2^n} H_0^{(1)}\left(k_0 \sqrt{x_2^2 + z_2^2}\right) \approx g^\infty(r_2) \Delta \cos \theta$$

$\rightarrow 0$ pour $|\Delta| \ll 1$ et $\theta \rightarrow \pi/2$

$$\text{TM : } P = \frac{j}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{j}{k_0 \Delta}\right)^n \frac{\partial^n}{\partial z_2^n} H_0^{(1)}\left(k_0 \sqrt{x_2^2 + z_2^2}\right) \Rightarrow$$

Converge très lentement pour $|\Delta| \ll 1$
 \Rightarrow Non applicable numériquement

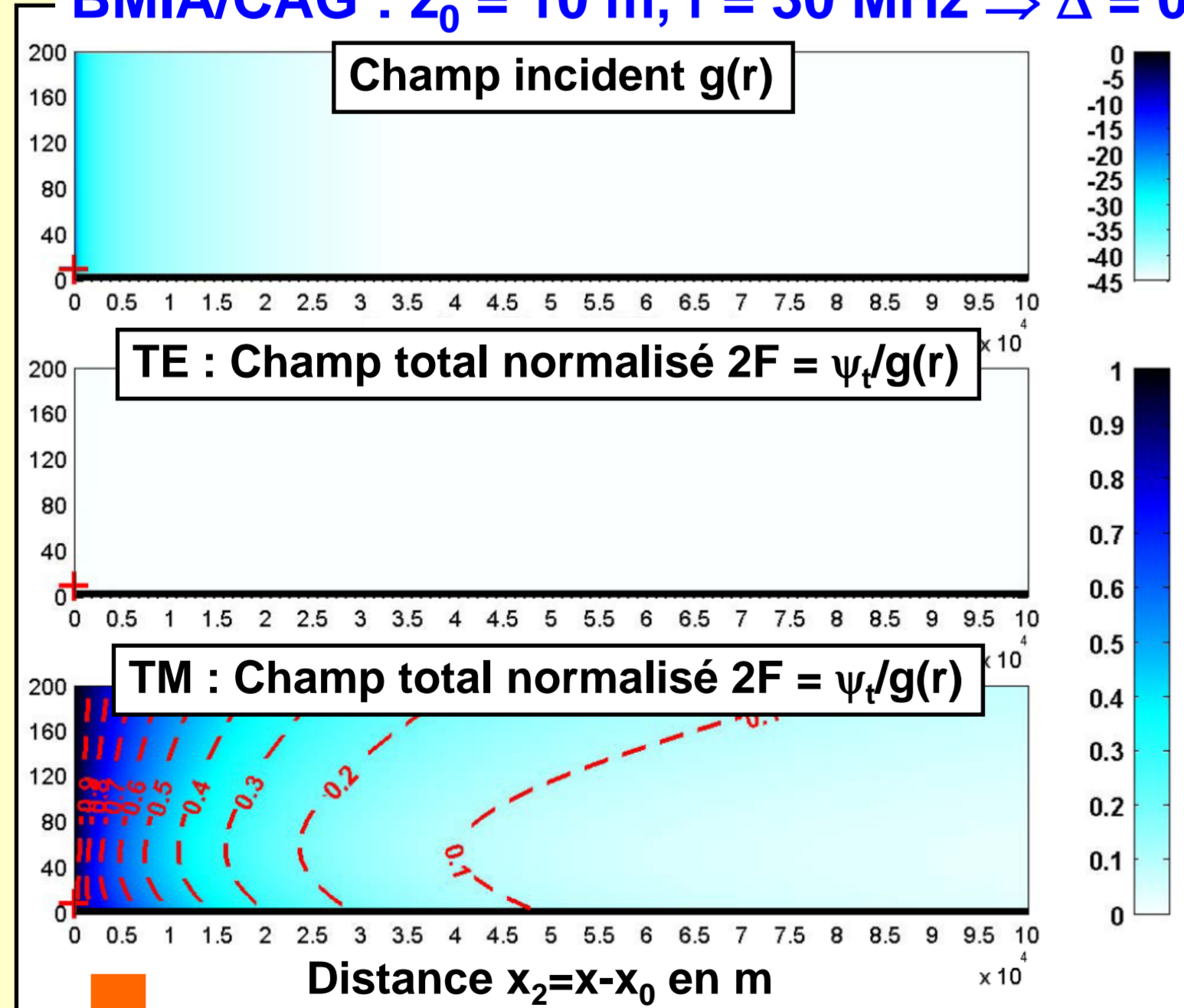
\Rightarrow Méthode du point selle ($k_0 r_2 \gg 1$, Collin [1])

$$\frac{P^\infty}{g^\infty(r_2)} = -\alpha_2 \left[v \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(v) e^{v^2} \right] + \alpha_1 + \alpha_2$$

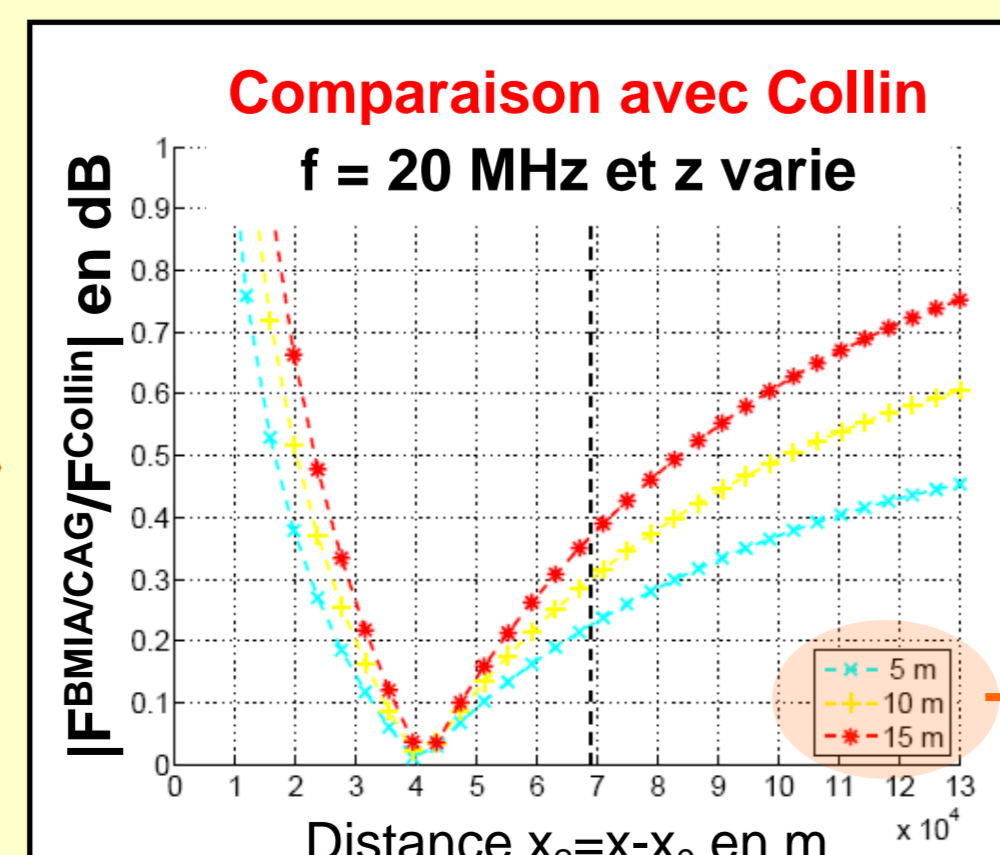
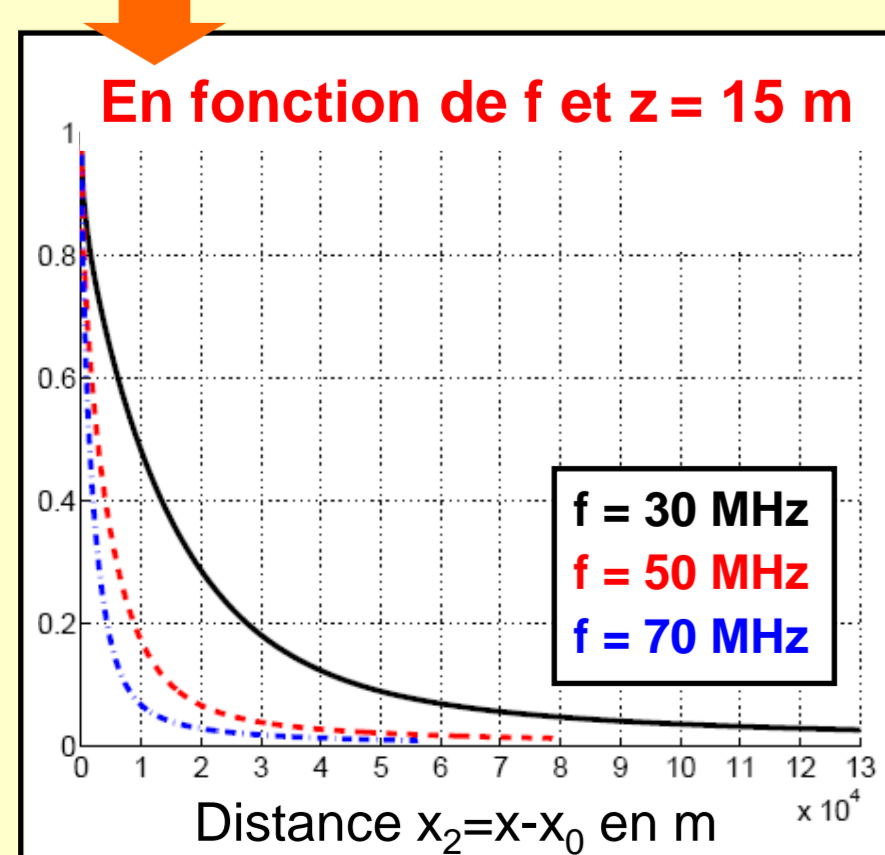
$$\begin{cases} v = e^{-\frac{j\pi}{4}} \sqrt{\frac{2k_0|x_2|}{\sin \theta}} \sin \left[\frac{\arccos(-\Delta) - \theta}{2} \right] \\ \alpha_1 = \frac{\Delta}{\Delta + \cos \theta} \\ \alpha_2 = \frac{-\Delta}{2\sqrt{1 - \Delta^2} \cos \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\arccos \Delta}{2} \right)} \end{cases}$$

VALIDATION NUMERIQUE + RUGOSITE : $x_0 = 0, z_0 = 10$ m, $\Delta x = 0.1\lambda_0, N = 262\ 144, \epsilon_r = 80 + 72j/f$ [GHz]

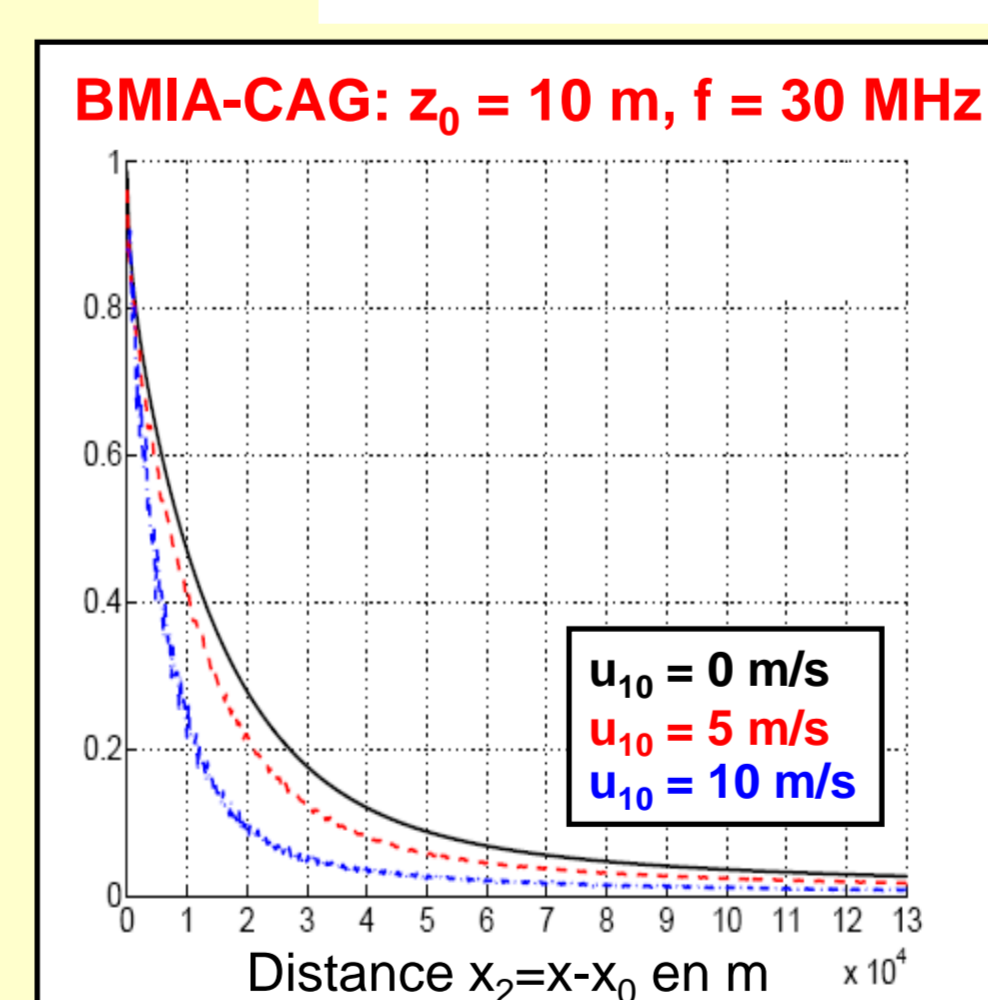
BMIA/CAG : $z_0 = 10$ m, $f = 30$ MHz $\Rightarrow \Delta = 0.015 - 0.014j$



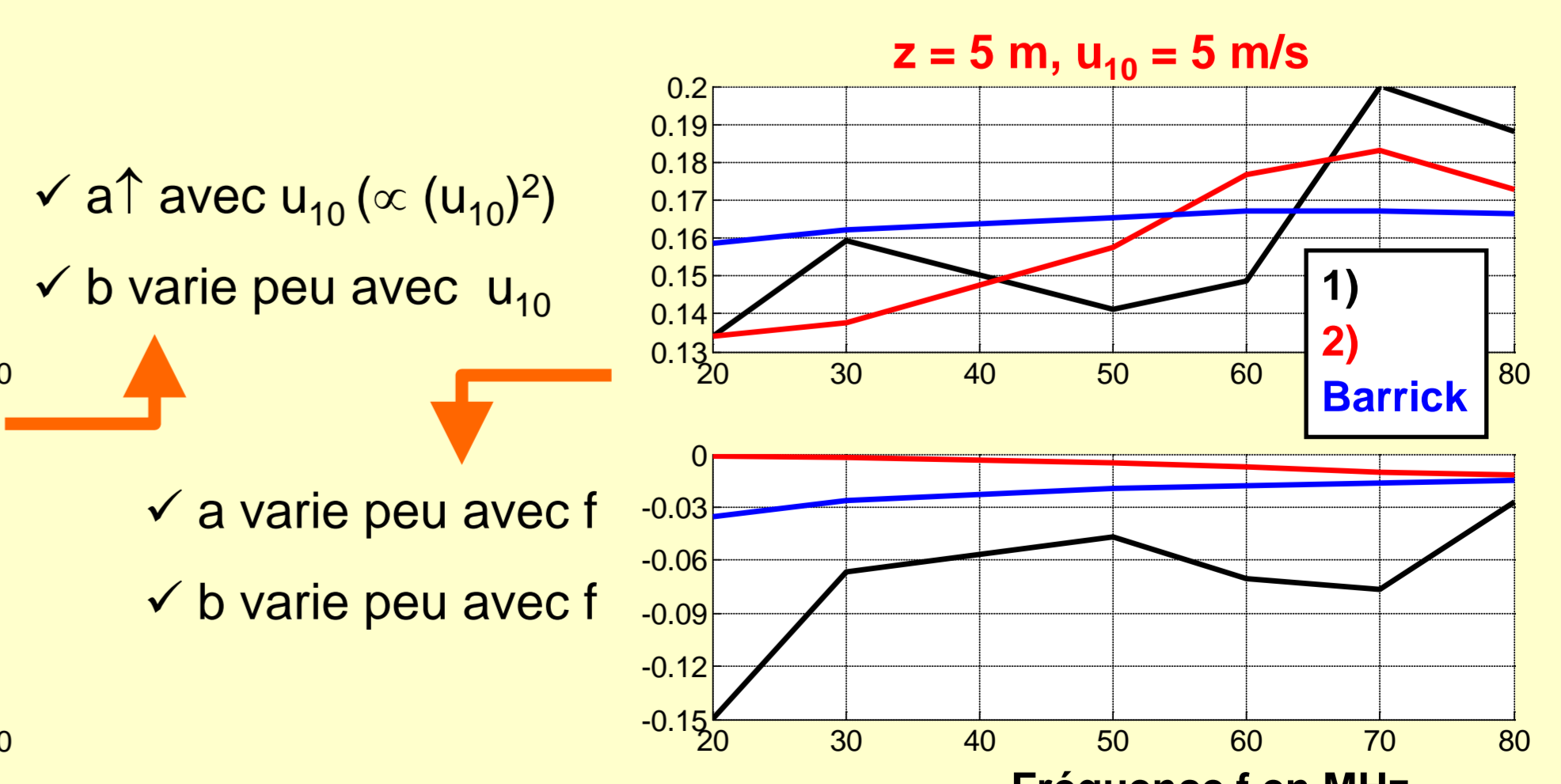
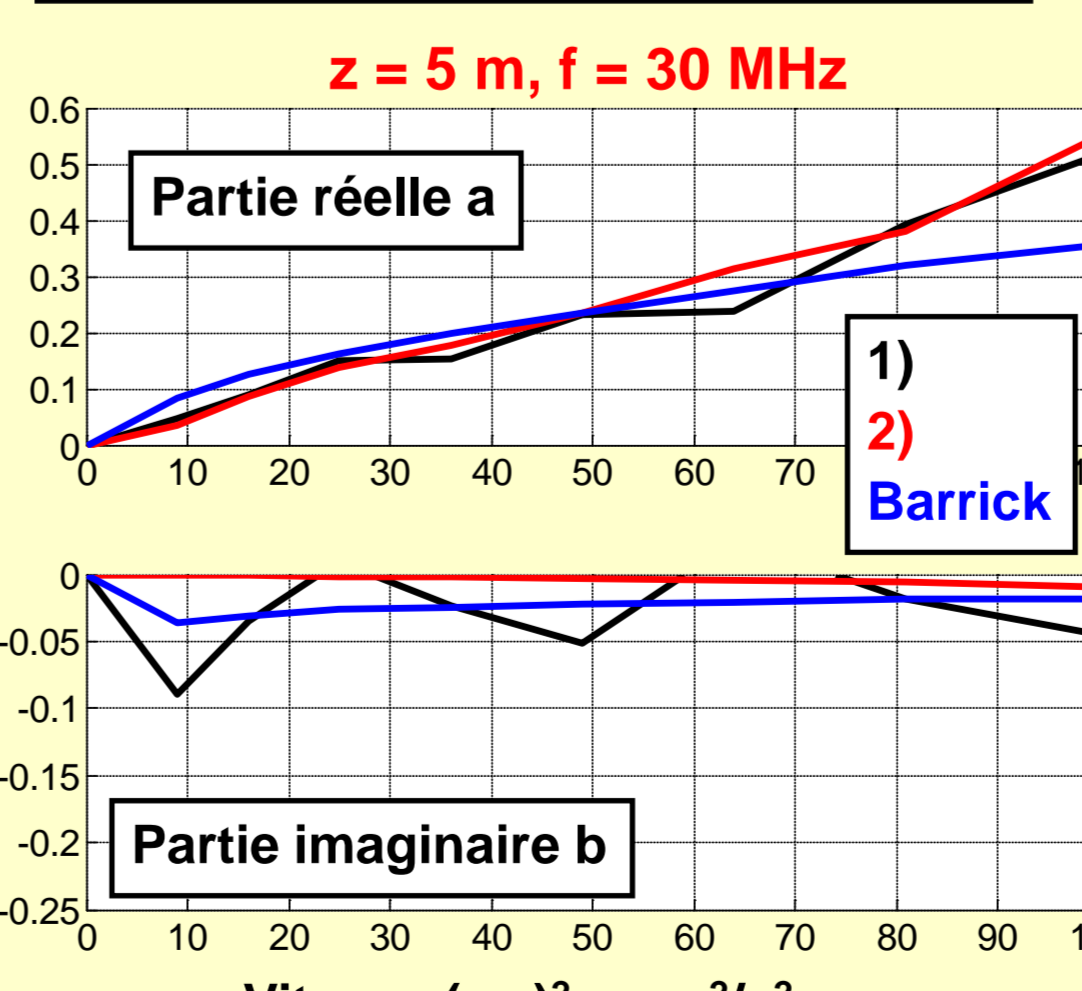
- Près de la surface :
 ✓ TE : Champ total = 0
 ✓ TM : Champ total $\neq 0$
 \Rightarrow Onde de Zenneck
- $f \uparrow$, l'onde de Zenneck Décroit plus rapidement
- Formulation de Collin valide quand l'émetteur près de la surface



EFFET DE LA RUGOSITE DE LA SURFACE DE MER [6] EN TM



- ✓ Rugosité dégrade fortement la propagation \Rightarrow Diminution de la distance de propagation
- ✓ Rugosité modifie le pôle (Barrick [3], Ishimaru [4]) $\Rightarrow k_{z,p,r} = k_{zp}(1+a+jb)$ et $\Delta_r = \Delta(1+a+jb)$
- \Rightarrow Dans la formule de Collin Δ substitué par Δ_r
- ✓ Deux méthodes pour calculer a et b :
 \Rightarrow 1) ψ_t sur la surface : FFT de ψ_t et calcul de Δ_r en $k_x = k_0$
 \Rightarrow 2) F : en comparant F et F_r pour un seuil donné



- ✓ Bon accord avec Barrick (Méthode perturbative $k_0 \sigma_h \ll 1$)
- ✓ Méthode 2) plus efficace