

*Journée MSPC / GDR Ondes*

*27 septembre 2010*

## Modélisation numérique 3D du principe du retournement temporel d'ondes électromagnétiques

**-Application à la localisation d'objets enfouis-**



M.BENHAMOUCHE doctorant

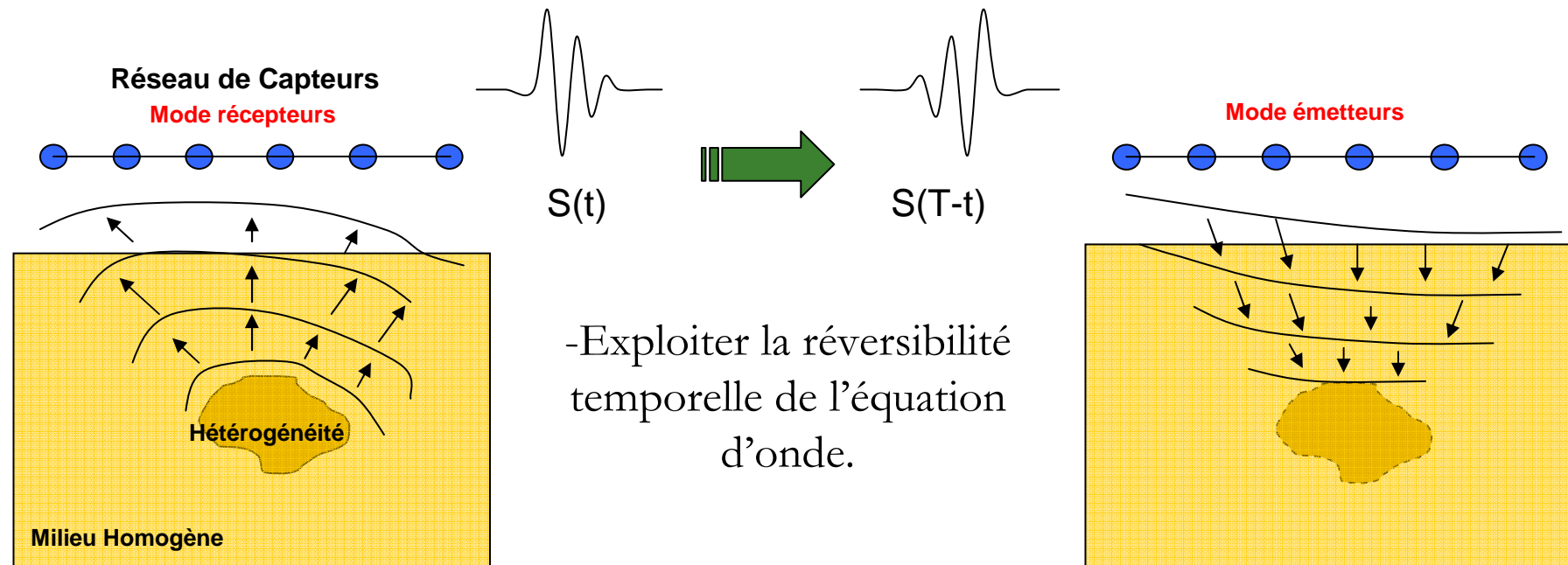


L.PICHON co-directeur de thèse.

L.BERNARD encadrant.

D.LESSELIER co-directeur de thèse.

# Introduction



-Exploiter la réversibilité temporelle de l'équation d'onde.

## Applications

**Contrôle Non Destructif.**

**Outil de modélisation** Code F.I.T/F.E.M développé, au sein du LGEP, par Laurent Bernard.

## Plan de la présentation

1-Méthode F.I.T.

2-Localisation d'objets en espace libre.

3-Localisation d'objets en demi-espace

4-Conclusion et perspectives.

# Méthode F.I.T

**FIT = Finite Integration Technique:**

- Maillages hexaédriques réguliers (Weiland, 1977)

**Extensions:**

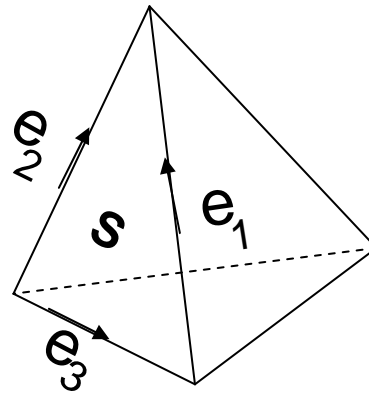
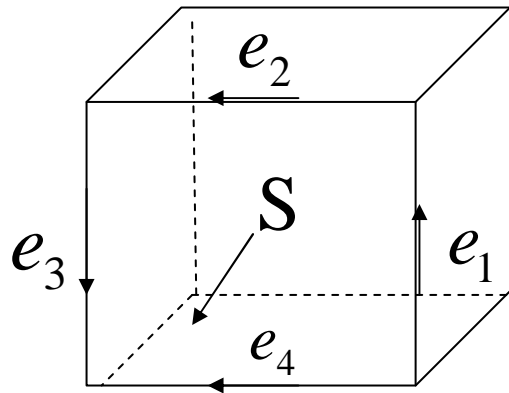
- Micro-Cell Method, (Marrone, 2001)
- Méthode des différences finies généralisées (Bossavit, 2001)

**Principe de FIT: *Intégration des équations de Maxwell sur deux maillages duaux***

# Méthode F.I.T

Maillage « primal »

$$\int_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} \, ds$$



$$e_a = \int_a \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$b_s = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

$$-\frac{d}{dt} b_s = \sum_a R_{sa} e_a$$

$$R_{sa} = 0, \pm 1$$

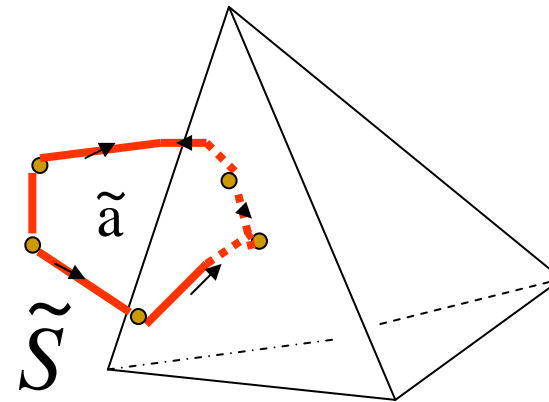
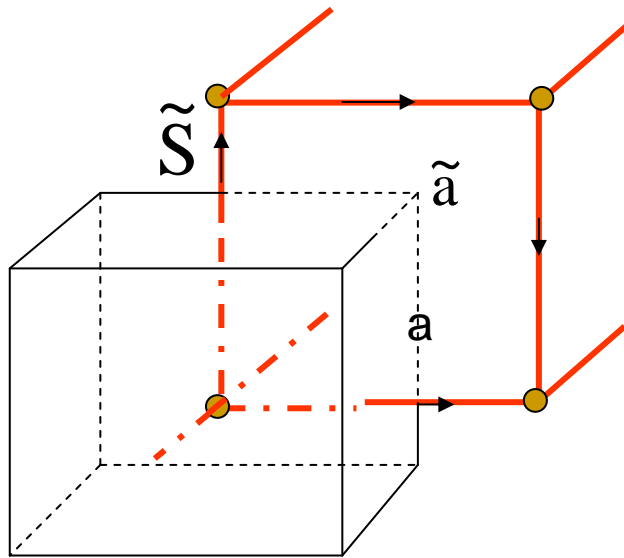


$$-\frac{d}{dt} \mathbf{b} = \mathbf{R} \mathbf{e}$$

# Méthode F.I.T

Maillage « dual »

$$\int_{\partial \tilde{a}} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{d}{dt} \int_{\tilde{a}} \vec{D} \cdot \vec{n} \, ds$$



$$h_{\tilde{S}} = \int_{\tilde{S}} \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

$$d_{\tilde{a}} = \int_{\tilde{a}} \vec{D} \cdot d\vec{s}$$

$$\frac{d}{dt} d_{\tilde{a}} = \sum_{\tilde{S}} \tilde{R}_{\tilde{a}\tilde{S}} h_{\tilde{S}}$$



$$\frac{d}{dt} d = \tilde{R} h$$

$$\tilde{R} = R^t$$

## Méthode F.I.T

Matrices constitutives (de masse) :

$$\mathbf{d} = \mathbf{M}_\varepsilon \mathbf{e}$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{M}_\nu \mathbf{b}$$

Schéma temporel « saute-mouton » :

$$-\frac{d}{dt} \mathbf{b} = \mathbf{R} \mathbf{e} \quad \Rightarrow \quad -\frac{1}{\Delta t} (\mathbf{b}^{k+1} - \mathbf{b}^k) = \mathbf{R} \mathbf{e}^{k+\frac{1}{2}}$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{d} = \mathbf{R}^t \mathbf{h} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\Delta t} \mathbf{M}_\varepsilon (e^{k+1/2} - e^{k-1/2}) = \mathbf{R}^t \mathbf{M}_\nu \mathbf{b}^k$$

Performant lorsque les matrices constitutives sont :  
 diagonales ( par exemple « Dual orthogonal »)

# Méthode F.I.T

Signaux et discrétisations

$$E_z(x, t) = \frac{4E_0}{T\sqrt{\pi}} \exp\left(-\left(\frac{4}{T}(c_0(t - t_0) - x)\right)^2\right). \quad \xrightarrow{\text{Fourier}} \quad F(f) = \frac{E_0}{c_0} \exp\left(-\frac{1}{4}\left(\frac{2\pi f T}{4c_0}\right)^2\right).$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F(f_{max}) = \frac{1}{A} \times \frac{E_0}{c_0} \\ A = 100 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leftarrow \text{ } \rightarrow \\ \text{ } \end{array} \begin{array}{l} T = 2 \quad \rightarrow \quad f_{max} = 400MHz \quad \leftrightarrow \quad \lambda_{min} = .75m \\ T = 4 \quad \rightarrow \quad f_{max} = 200MHz \quad \leftrightarrow \quad \lambda_{min} = 1.5m \end{array}$$

Discrétisation spatiale:

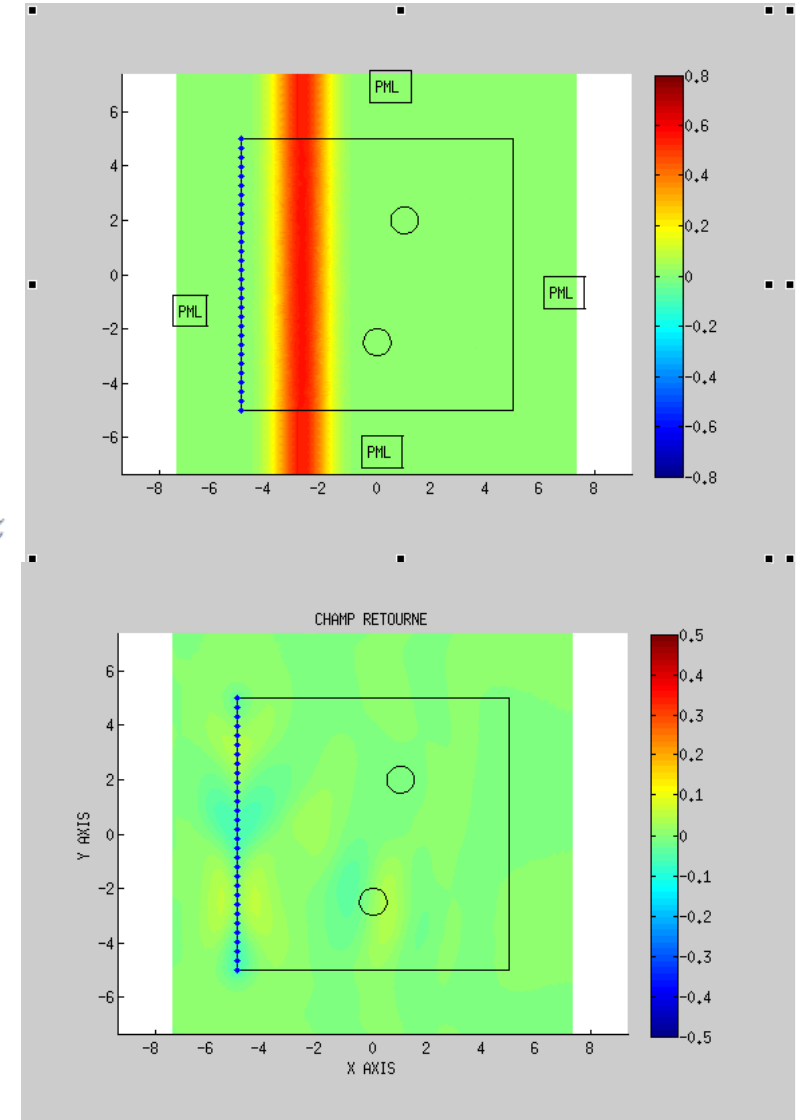
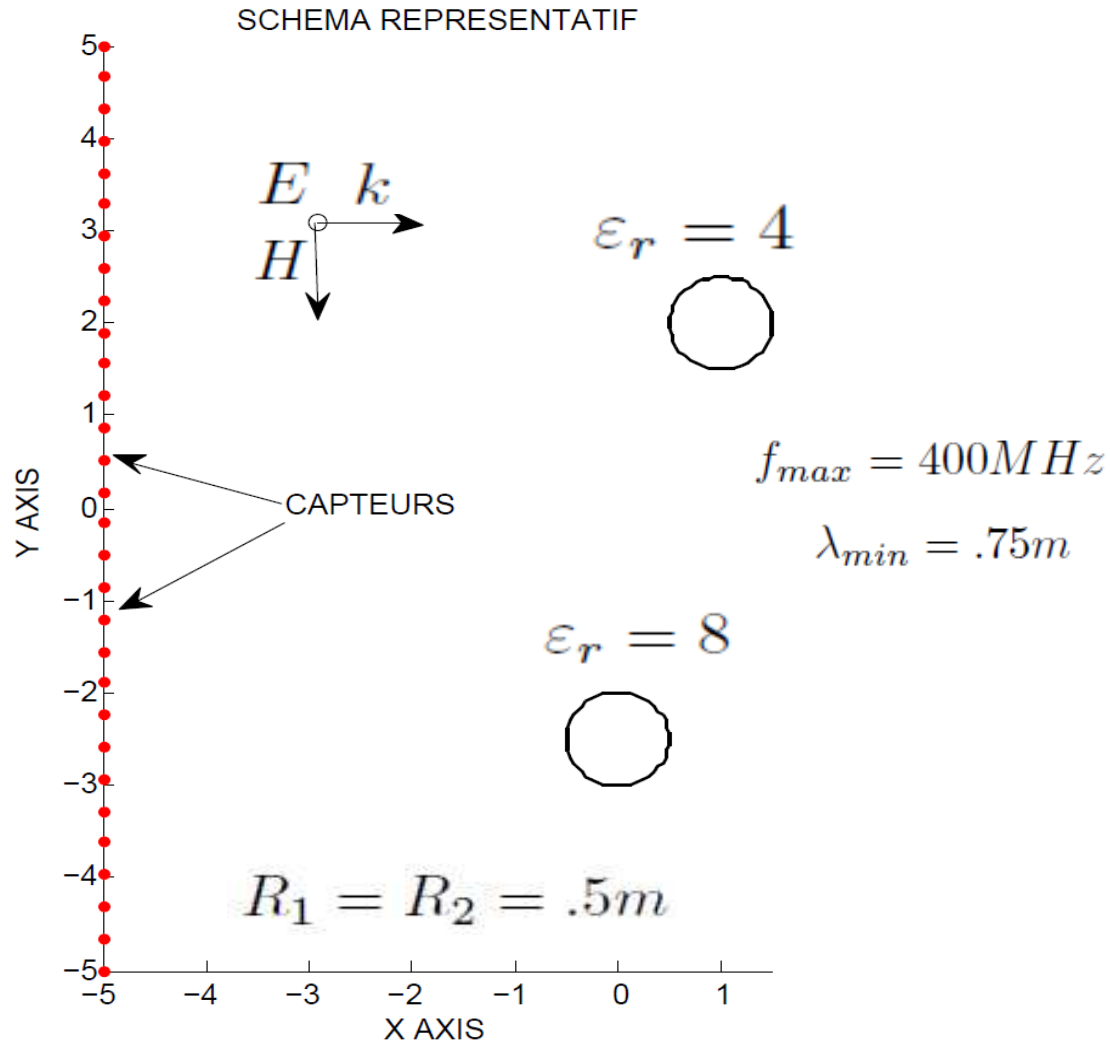
10~15 noeuds par  $\lambda_{min}$

Discrétisation temporelle:

$$\Delta t < \frac{\min_{i,j \in D} \|x_i - x_j\|}{C_0}$$

# Localisation d'objet en espace libre -2D

Diffraction d'un signal gaussien par deux Cylindres diélectriques



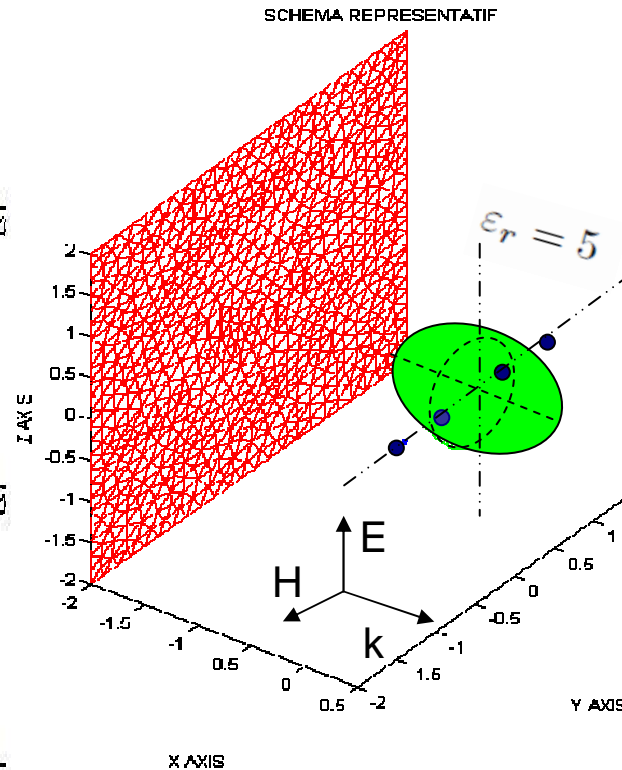
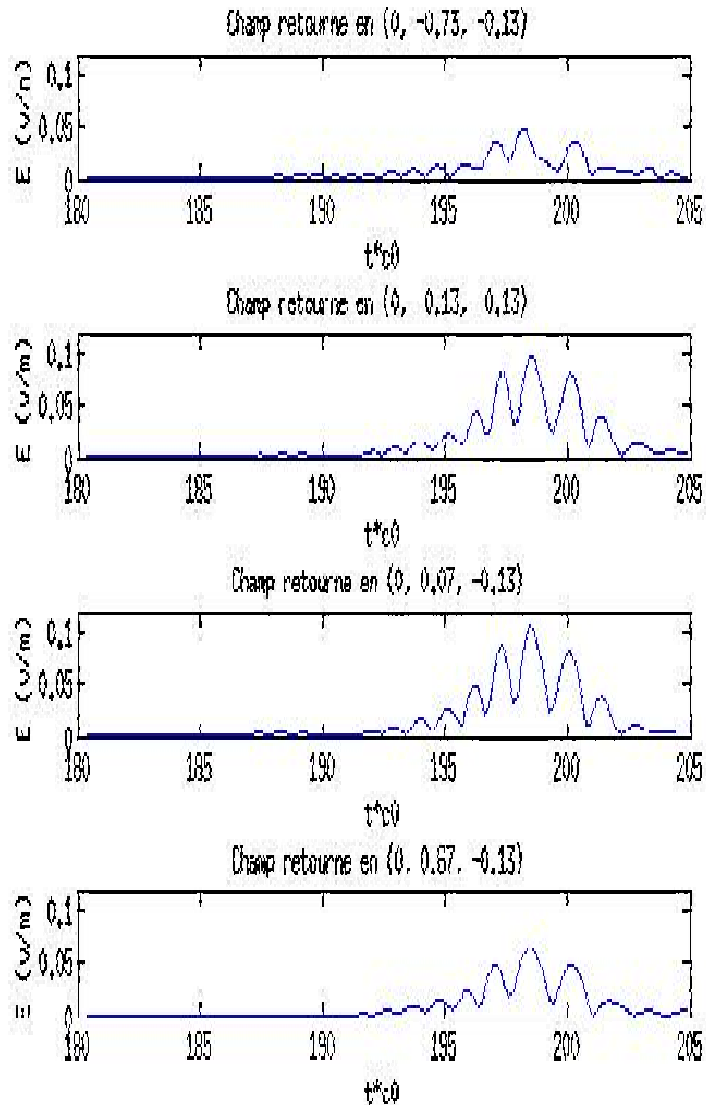
# Localisation d'objet en espace libre -3D

Signal retourné, pour un ellipsoïde diélectrique

$$f_{max} = 200MHz$$

$$\lambda_{min} = 1.5m$$

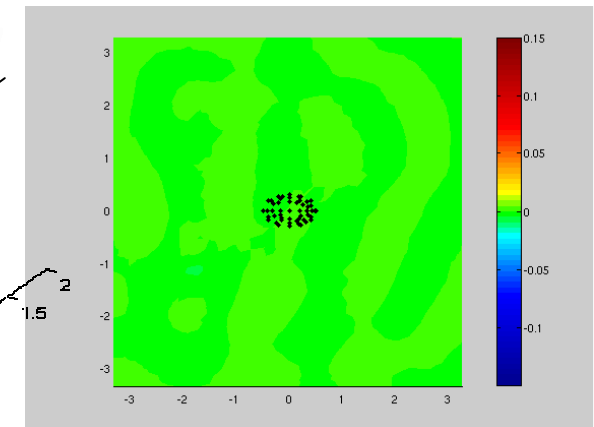
10 noeuds par  $\lambda_{min}$



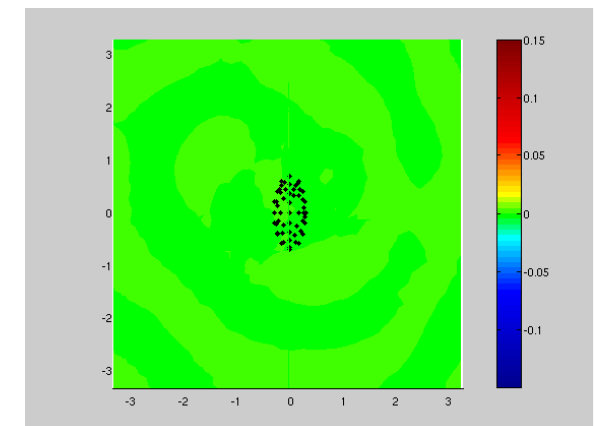
$$R_x = .5m \quad R_y = .3m$$

$$R_z = .7m$$

Plan  $z=0$

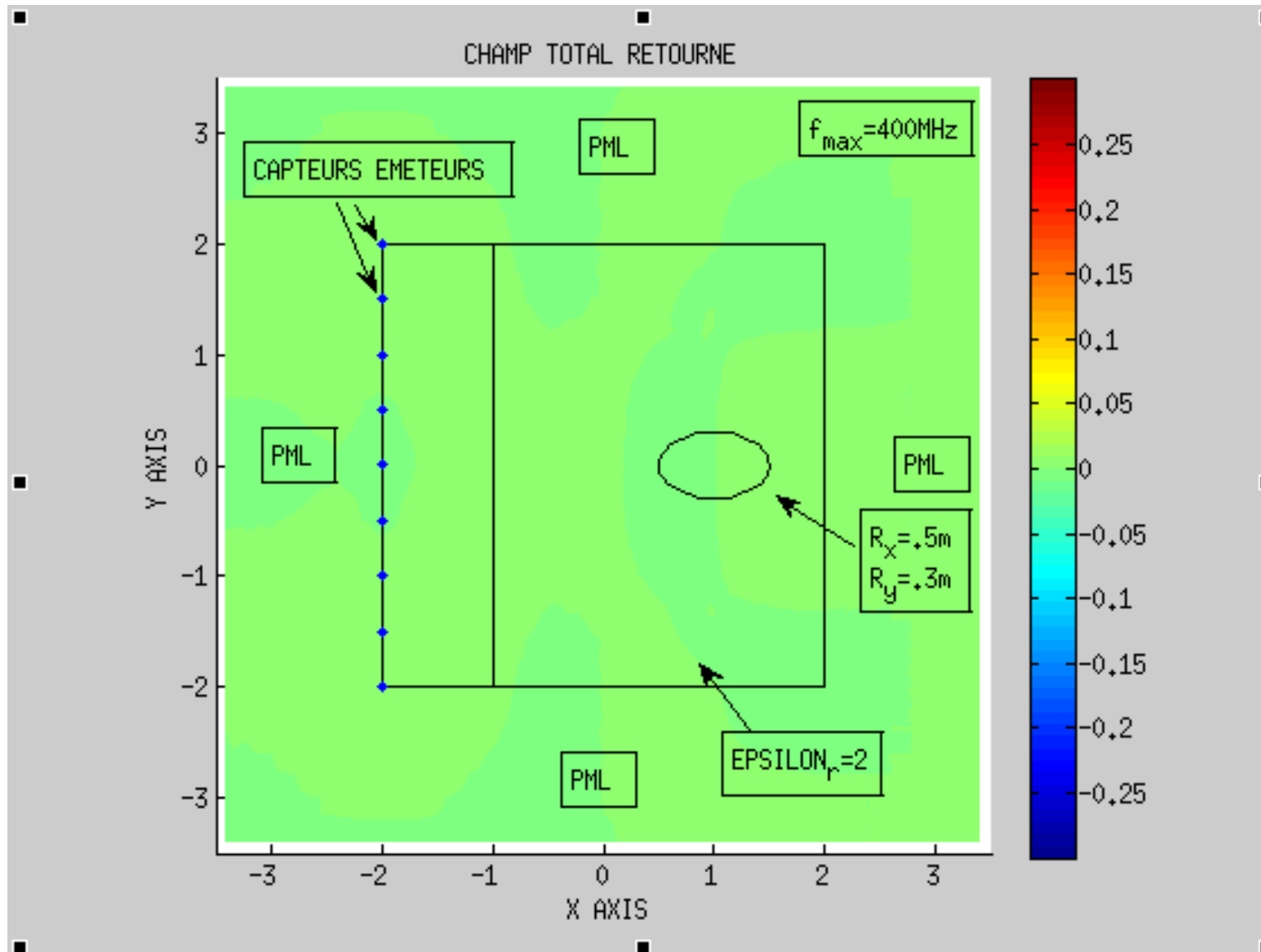


Plan  $x=0$



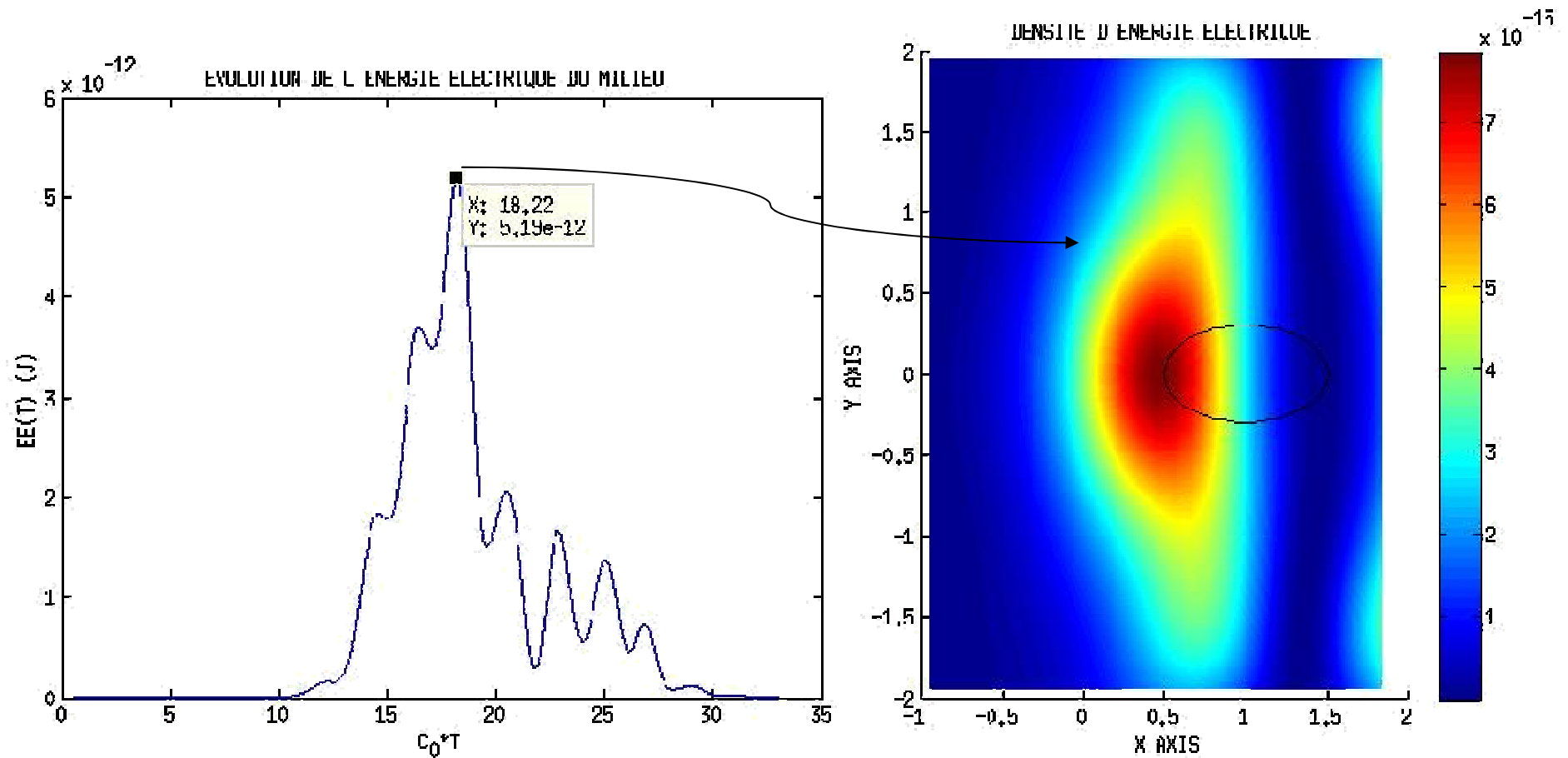
## Localisation d'objet en demi-espace -2D

Signal retourné, pour un cylindre elliptique diélectrique  $\epsilon_r = 5$ .



## Localisation d'objet en demi-espace -2D

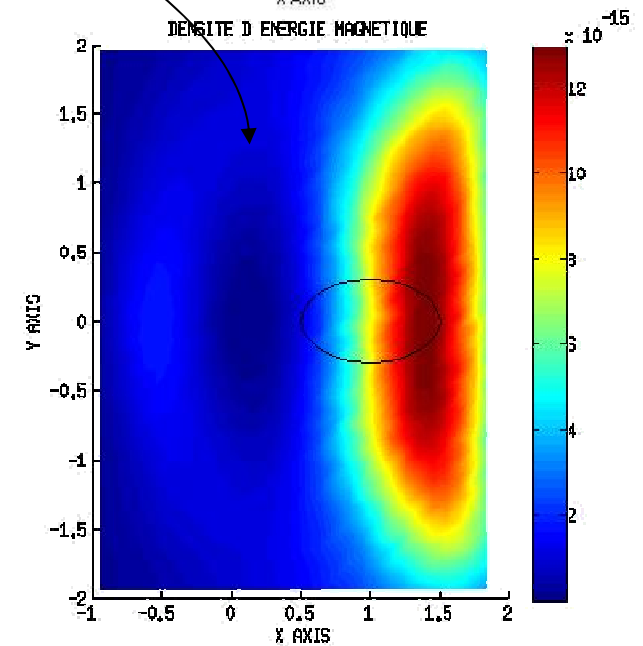
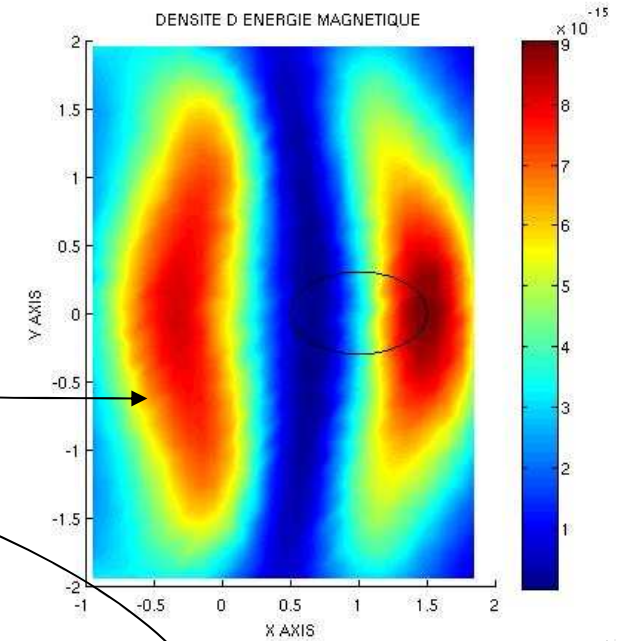
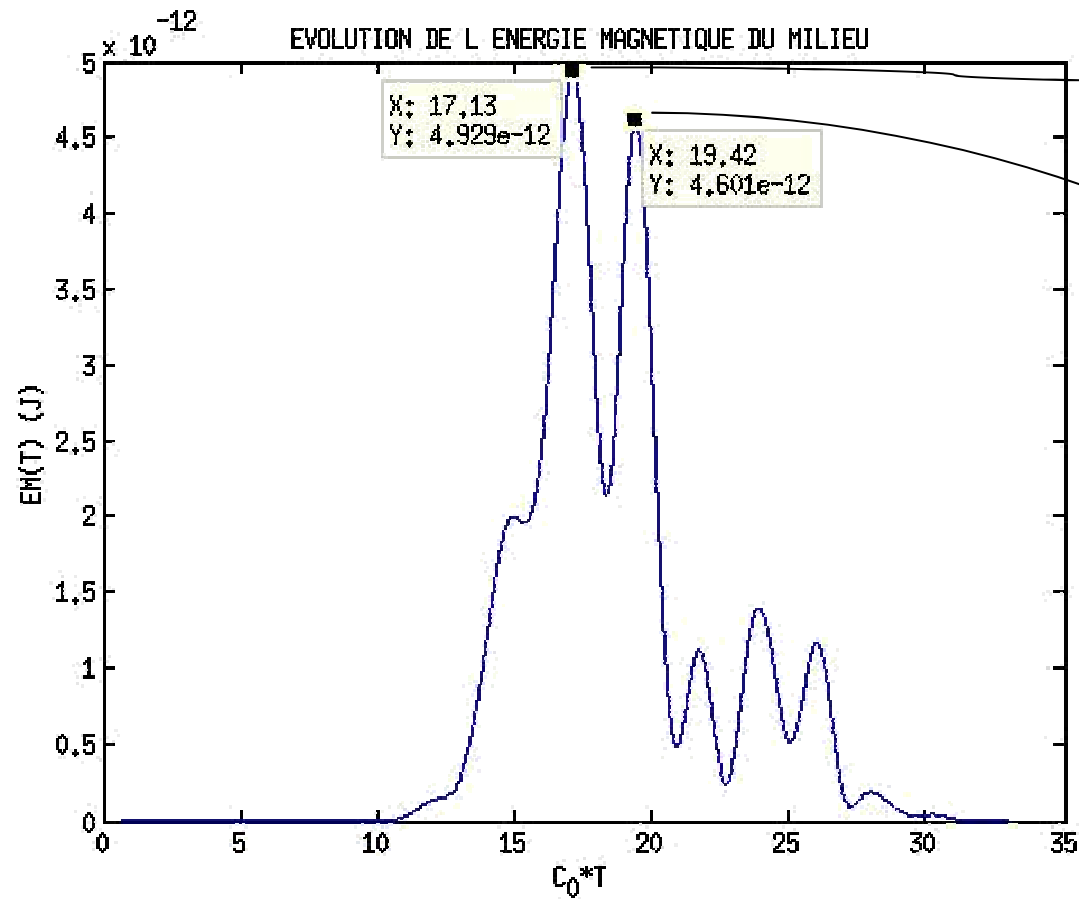
Signal retourné, pour un cylindre elliptique diélectrique



# Localisation d'objet en demi-espace -2D

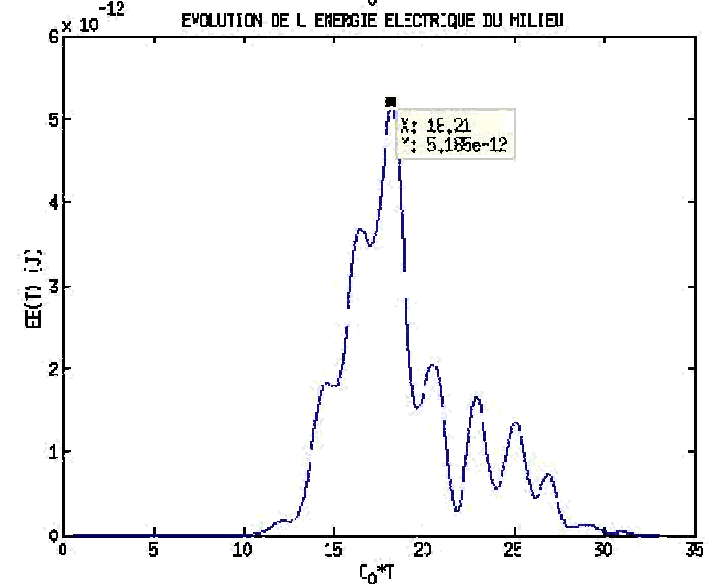
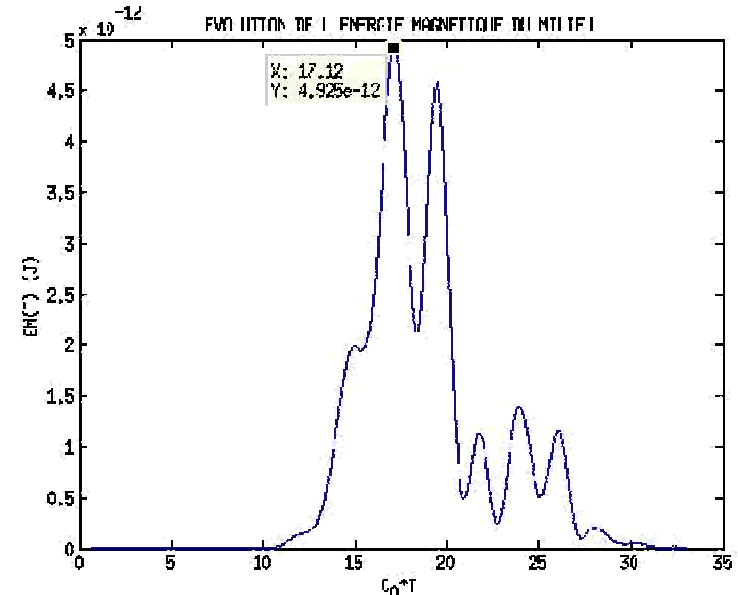
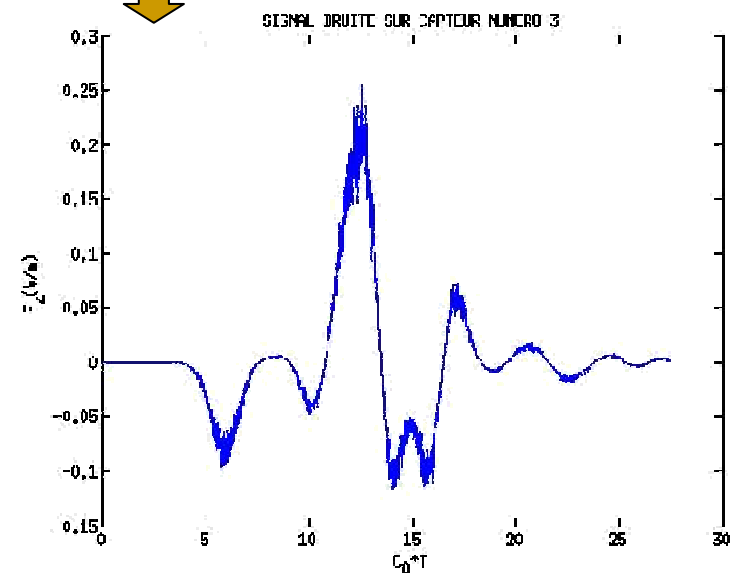
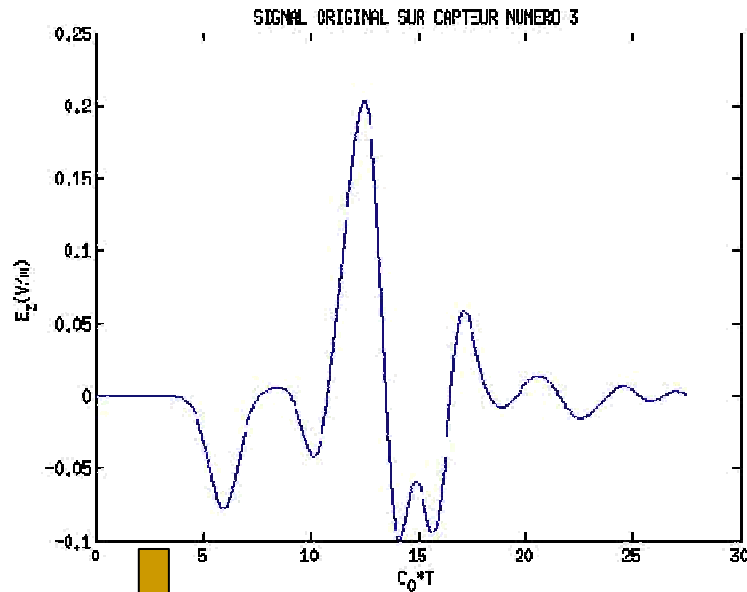
Signal retourné, pour un cylindre

elliptique diélectrique



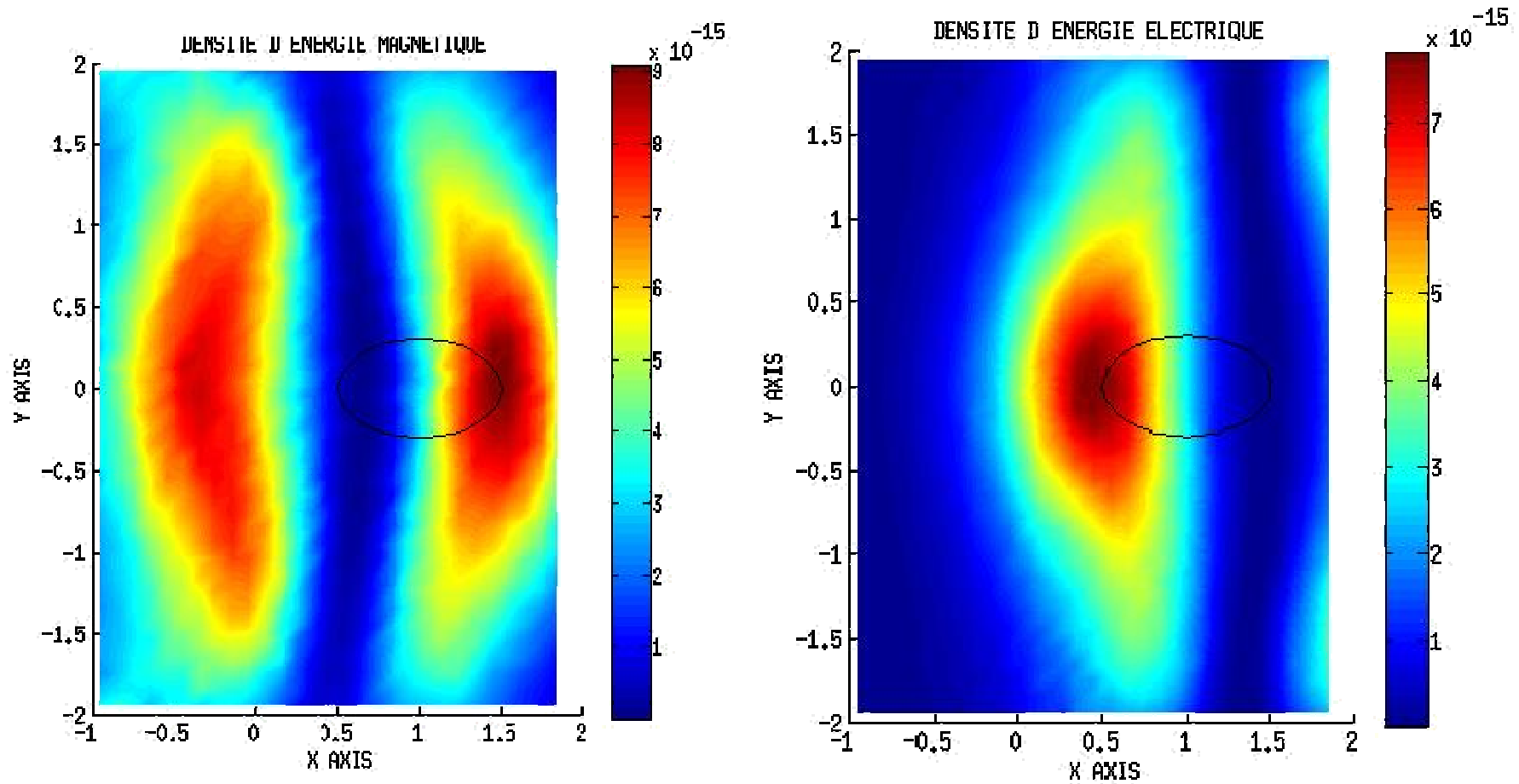
# Localisation d'objet en demi-espace -2D

Signal (bruité) retourné, pour un cylindre elliptique diélectrique



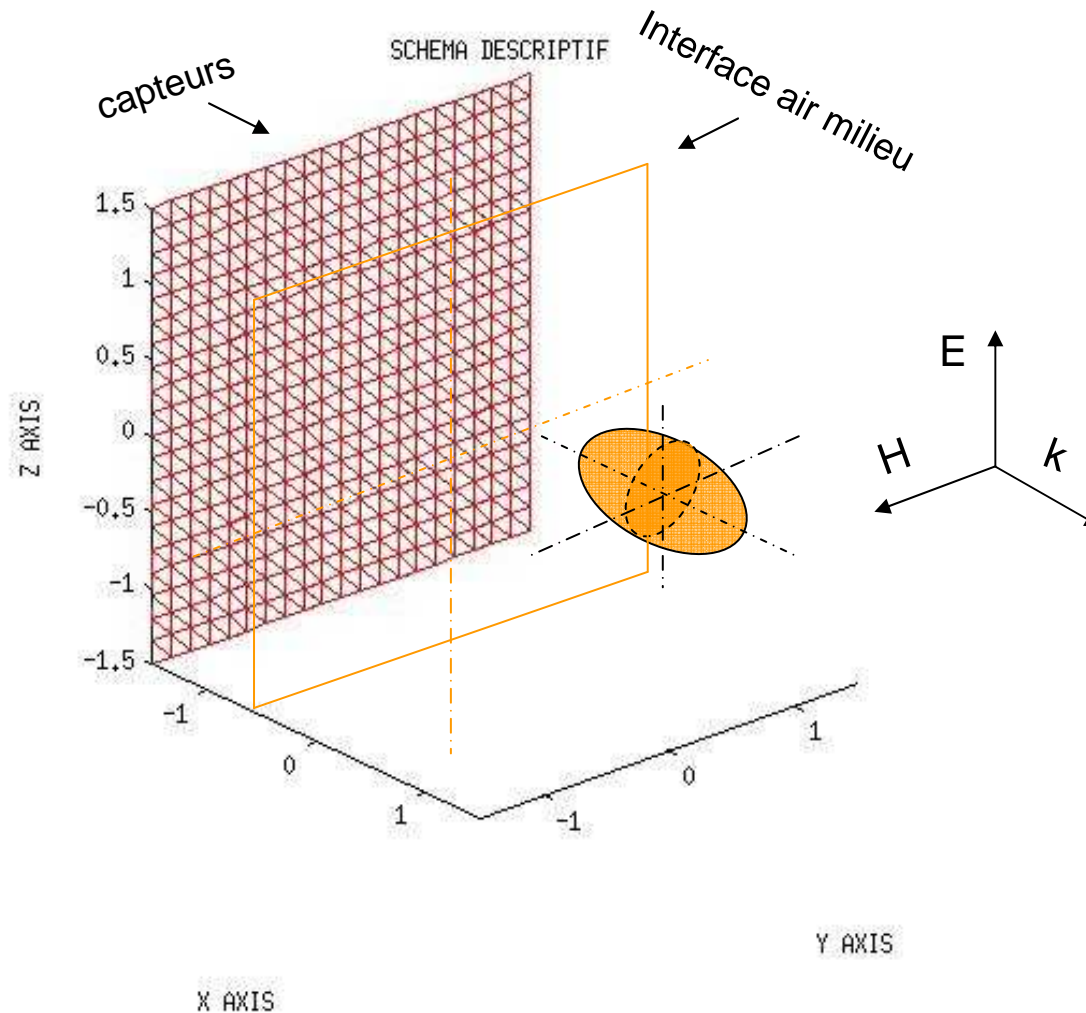
## Localisation d'objet en demi-espace -2D

Signal (bruité) retourné, pour un cylindre elliptique diélectrique



## Localisation d'objet en demi-espace -3D

Signal retourné, pour un ellipsoïde diélectrique



Signal et discrétisation

$$f_{max} = 200MHz$$



$$\lambda_{min} = 1.5m$$



11 noeuds par  $\lambda_{min}$

**Ellipsoïde**

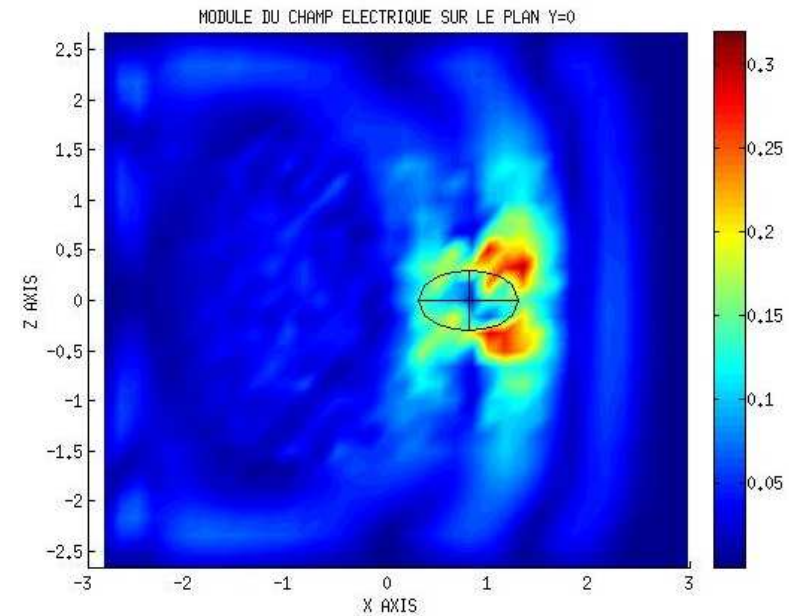
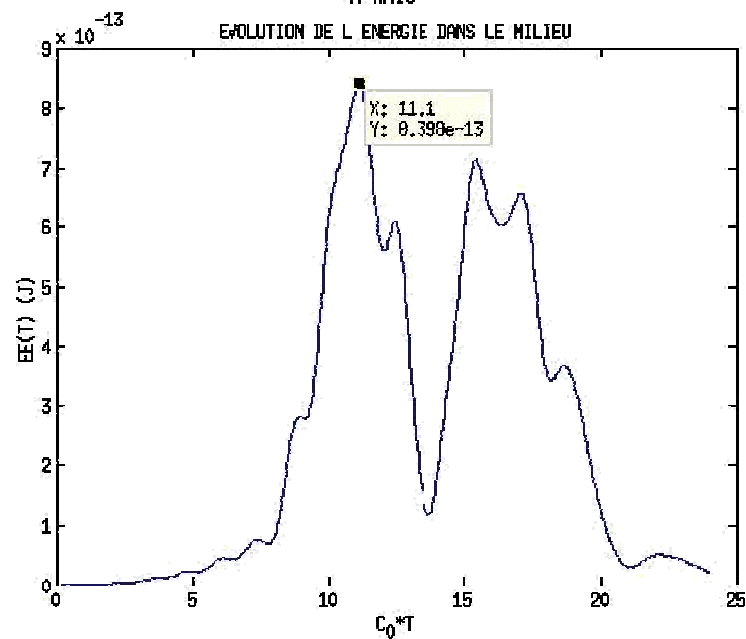
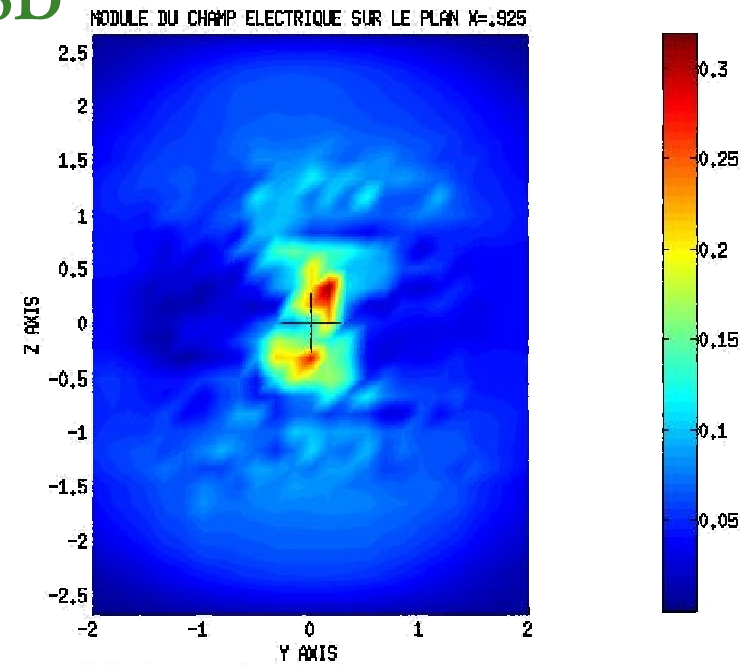
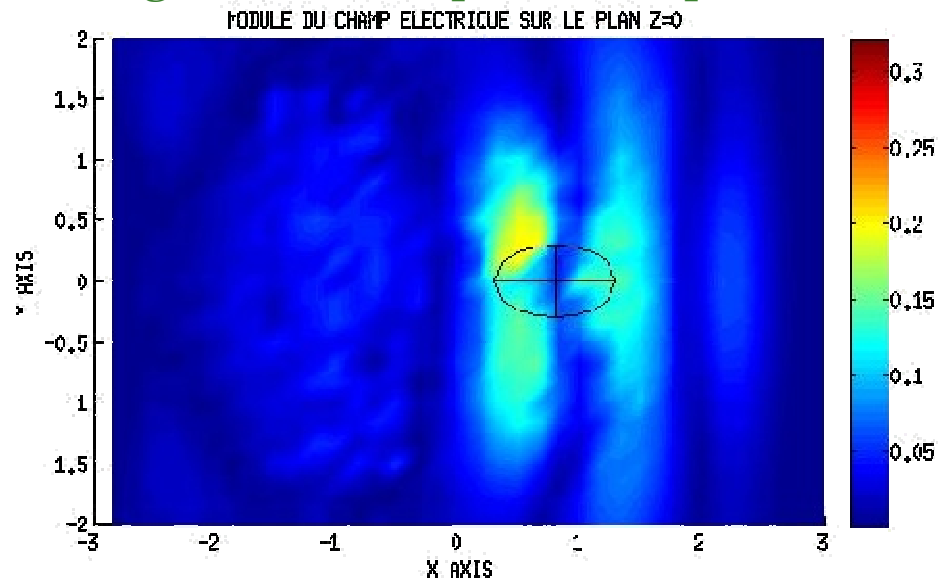
Centré en  $(.925m, 0, 0)$

$$R_y = R_z = .3m$$

$$R_x = .5m$$

# Localisation d'objet en demi-espace -3D

Signal retourné, pour un ellipsoïde diélectrique



# Conclusion et perspectives

## Conclusions

- Modèle de propagation dans le domaine temporel efficace.
- Détection et localisation d'objet enfoui par l'analyse des évolutions d'énergies.

## Perspectives

- Ordre de grandeur (la taille) et géométrie d'un objet enfoui.
- Propriétés électromagnétiques de l'objet.
- Décomposition des signaux pour la focalisation (plusieurs sources diffractantes).

**FIN**

MERCI DE VOTRE ATTENTION.