

# Techniques d'optimisation de formes d'antennes lentilles intégrées

Ronan Sauleau

(En collaboration avec B. Barès, G. Godi, A. Rolland, A. Boriskin)

[Ronan.Sauleau@univ-rennes1.fr](mailto:Ronan.Sauleau@univ-rennes1.fr)

IETR

(Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes)

UMR CNRS 6164

Université de Rennes 1 – Rennes, France

[www.ietr.org](http://www.ietr.org)

1. Applications et motivations
2. Problématique 1 : Optimisation en rayonnement
3. Approches possibles
4. Analyse asymptotique
5. Synthèse 3-D (tracé de rayons)
6. Optimisation locale
7. Optimisation globale
8. Conclusions et tendances

- Applications émergentes en ondes millimétriques

- Ondes millimétriques :  $30 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$

[GPS: 1.5 GHz ; GSM/DCS/UMTS: 0.9~2.1 GHz ; WiFi : 2.4 GHz]

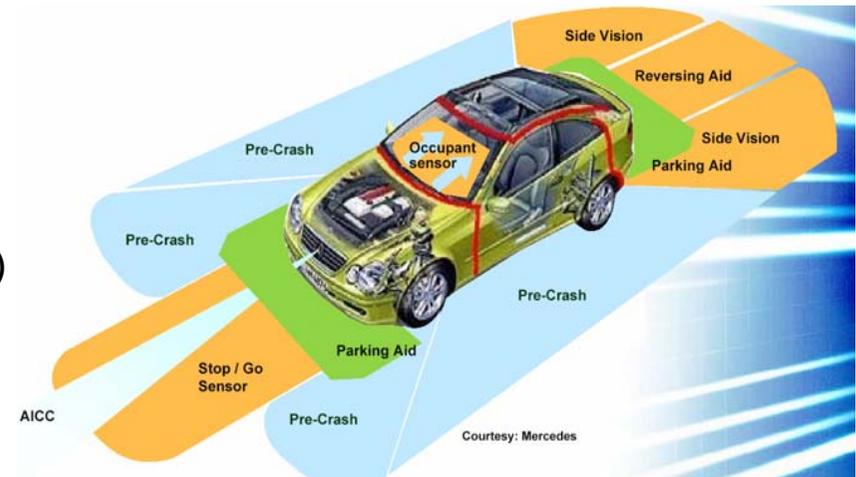
- Communications sans fil à très haut débit

- Intra-bâtiment (~ 60 GHz, IEEE 802.11)
  - Réseau domestique
  - Réseau professionnel
- Extra-bâtiment (LMDS : ~30 et ~40 GHz )

- Télécommunications spatiales (Ka, Q)

- Secteur automobile (Intelligent Transport Systems)

- Radars automobiles d'aide à la conduite (77 GHz)
- Communications (63~65 GHz)
  - inter-véhicules
  - véhicules-infrastructures



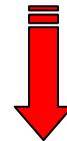
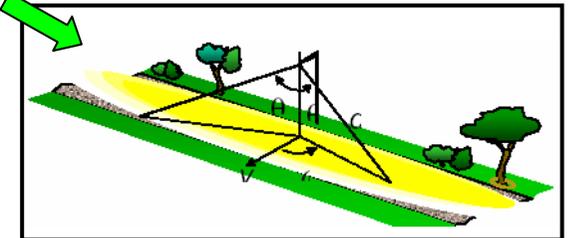
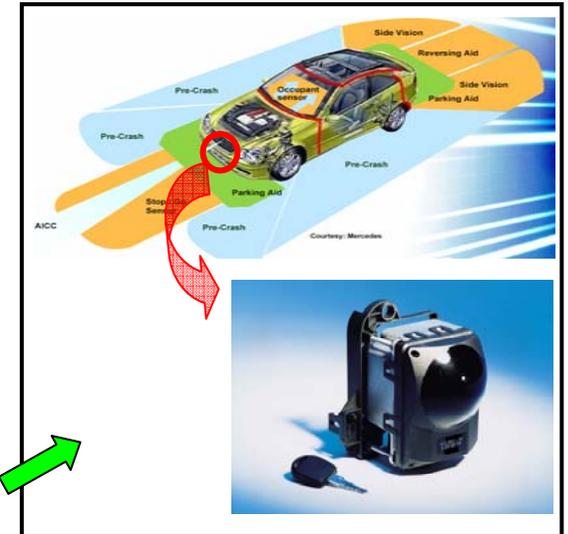
## • Exemples de contraintes antennaires

### 1- Dispositifs à faibles pertes (bilan de liaison)

- En ondes millimétriques : pertes métalliques prohibitives
- Matériaux de choix : **diélectriques** ( $\epsilon$ )  
[contraintes applicatives parfois fortes : spatial, automobile]

### 2- Dispositifs à grande diversité de rayonnement

- Sources compactes (spatial multi-spots)
- Antennes à faisceau directif (radar longue/courte portée)
- Antennes à faisceau formé (indoor, outdoor, automobile)
- Antennes multi-faisceaux (indoor, automobile)

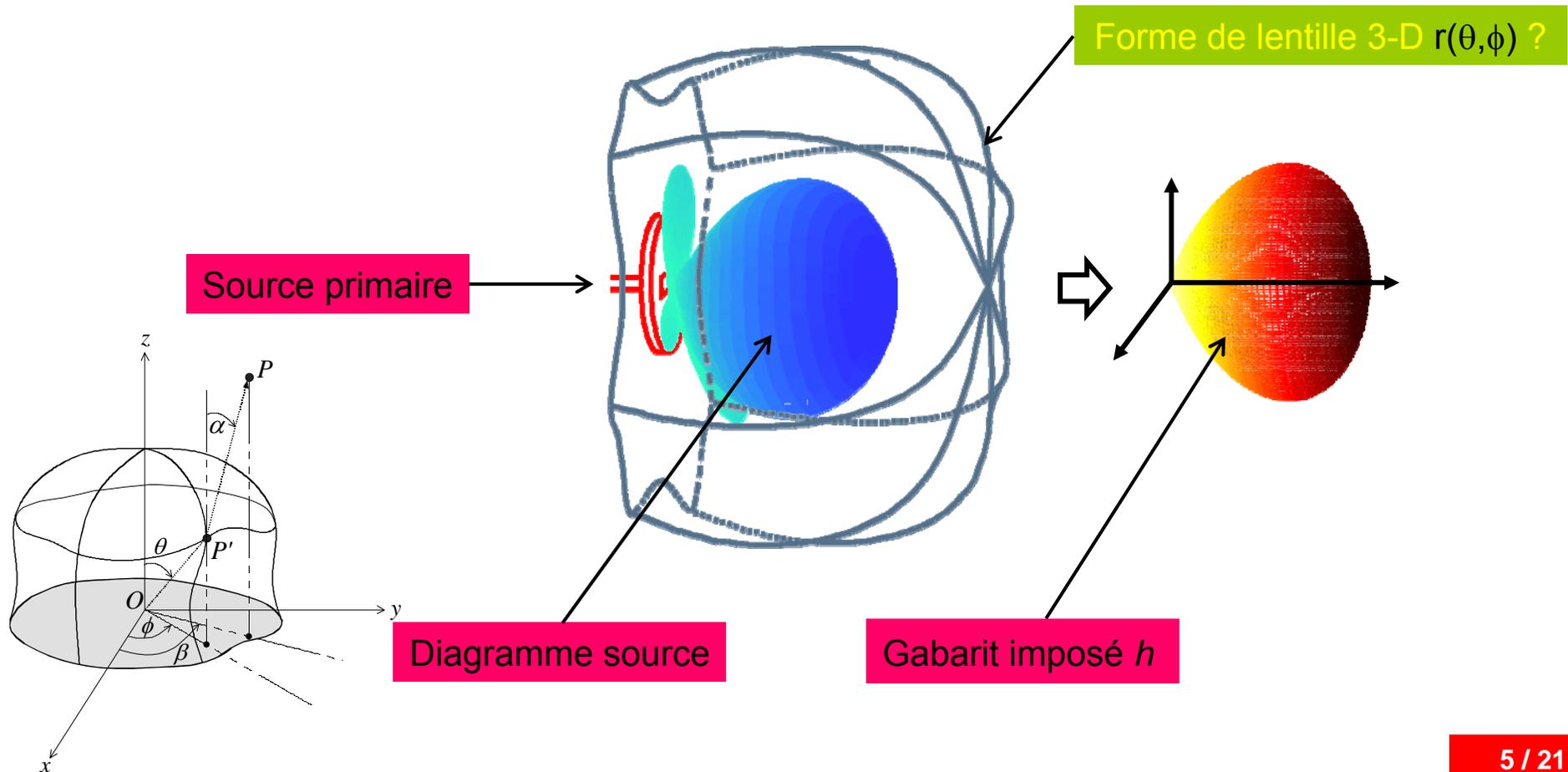


**Technologie candidate : Antennes lentilles  
(quasi-optique)**

- 1<sup>er</sup> problème posé

Paramètres = géométrie  
Objectif = rayonnement

**Quelles sont les formes de lentilles qui permettent d'obtenir des caractéristiques en rayonnement imposées ?**



Antenne lentille :=  
Source + Système focalisant

- 1<sup>er</sup> problème posé (suite)

- Synthèse de forme réfractante

- De multiples degrés de libertés
      - Forme de la lentille
        - ❖ 1 ou plusieurs surfaces réfractantes ?
        - ❖ Symétrie de révolution ou forme arbitraire ?
      - Matériaux constitutifs
        - ❖ Homogène (1 seul matériau)
        - ❖ Multi-matériaux ( $\epsilon_i$  ?, répartition spatiale ?)

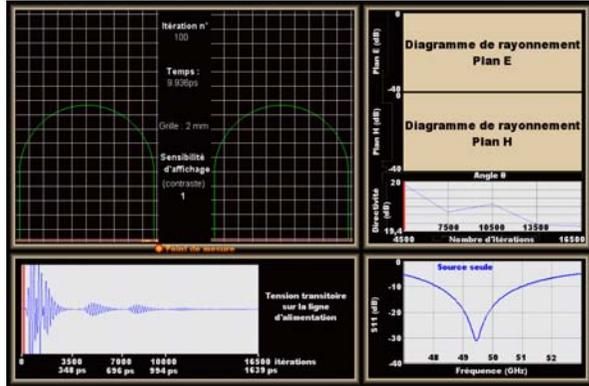
- Sources primaires

- 1 ou plusieurs sources
      - Sources planaires ou 3-D ? Géométrie, Constitution ?
      - Sources ponctuelles ou distribuées



**3 catégories de problèmes : Analyse, Synthèse, Optimisation**

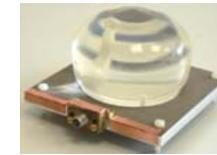
**Méthodes numériques spécifiques : diversité de taille, de formes, de matériaux**



Propagation of EM waves inside a hyperhemispherical substrate lens (time domain)



Local (GO-PO)



Global (GO-PO, BIE)

**Synthesis\***

**EM optimisation**

**EM analysis**  
(emission, reception)

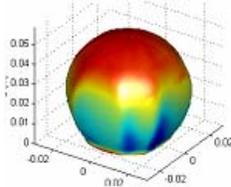
Axis symmetrical



3D arbitrary

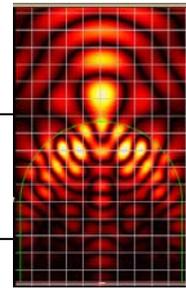


Nearly axis symmetrical

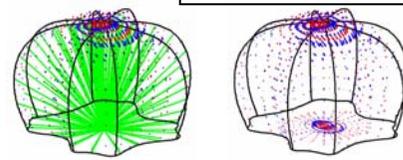


Asymptotic methods (GO, PO, hybridations)

Global (FDTD, IEs)



Modal decompositions (plane waves, spherical modes)



Point-source or distributed source

\* Ray tracing approach

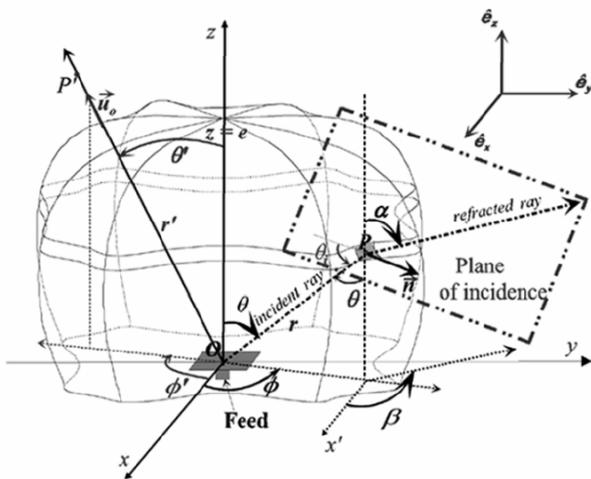
## • Analyse électromagnétique

### □ Méthodes numériques globales (FEM, FDTD, EI)

- En 3-D : volume restreint à quelques  $\lambda^3$

### □ En général : méthodes hautes fréquences

- Retenues pour :
  - l'analyse de performances (en général)
  - l'optimisation de performances (quasi-systématiquement)
- Formulation de base simple : intégrales de diffraction (hybridation OG-OP)



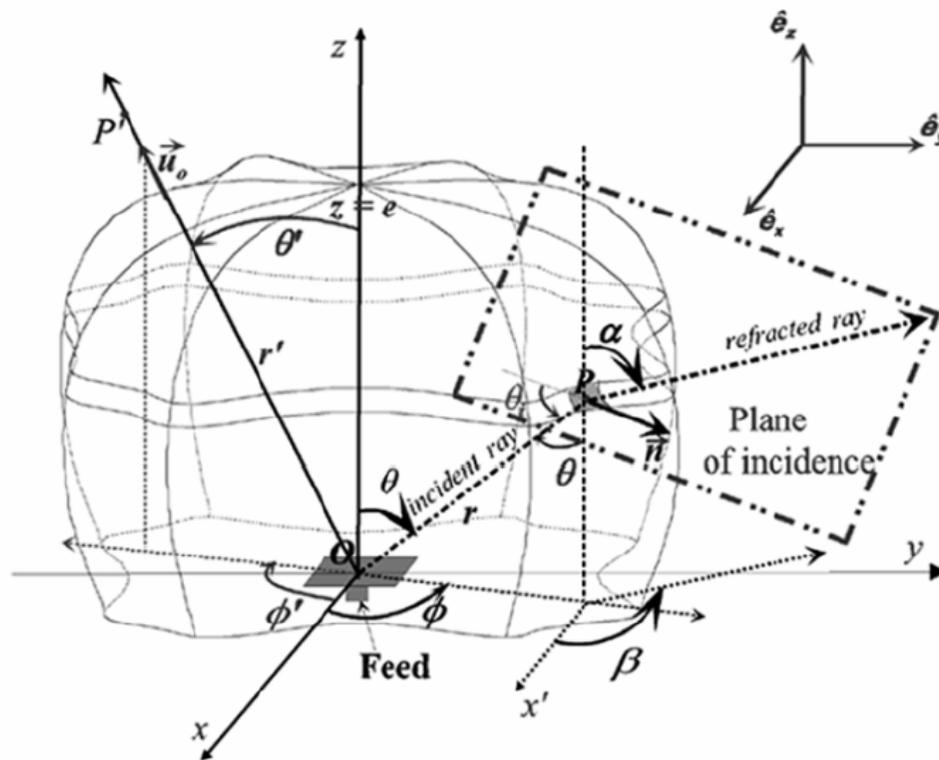
$$\vec{E}(P') = \frac{-j}{4\pi\omega\epsilon_0} \iint_S \left[ (\vec{J}_S \cdot \vec{\nabla}) \vec{\nabla} + k_0^2 \vec{J}_S - j\omega\epsilon_0 (\vec{M}_S \times \vec{\nabla}) \right] \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dS$$

$$\vec{H}(P') = \frac{-j}{4\pi\omega\mu_0} \iint_S \left[ (\vec{M}_S \cdot \vec{\nabla}) \vec{\nabla} + k_0^2 \vec{M}_S + j\omega\mu_0 (\vec{J}_S \times \vec{\nabla}) \right] \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dS$$

### Limitations :

- Taille minimale et rayons de courbure locaux
- Réflexions internes et réflexion totale
- Absence d'interactions source(s) / surface(s) réfractantes

- Formulation “tracé de rayons” ( $\Leftrightarrow$  Optique Géométrique)



## Hypothèses

- Lentille **simple matériau**
- Diélectrique **homogène**
- Base plane ( $z=0$ )
- **Source ponctuelle** (origine)
- **Lentille de grandes dimensions** (taille + rayons de courbure)  $\gg \lambda_d$
- $P \in$  surface extérieure
- $P'$  = point d'observation

## Notations

- $r(\theta, \phi)$  : **profil de lentille inconnu**
- $\epsilon_{r,d}(\mathbf{n}_d)$  = permittivité (indice)
- $(\theta, \phi)$  : rayon incident sur la surface interne
- $(\alpha, \beta)$  : rayon réfracté
- Specifications :
  - $g(\theta, \phi)$  : rayonnement primaire
  - $h(\alpha, \beta)$  : gabarit désiré



- Formulation “tracé de rayons” ( $\Leftrightarrow$  Optique Géométrique)

- Résolution itérative de M.A.

- Linéarisation

$$\alpha_1^{k-1} r_{\theta\theta}^k + \alpha_2^{k-1} r_{\theta\phi}^k + \alpha_3^{k-1} r_{\phi\phi}^k + \alpha_4^{k-1} r_{\theta}^k + \alpha_5^{k-1} r_{\phi}^k + \alpha_6^{k-1} r^k + \alpha_7^{k-1} = 0$$

$$\alpha_{i(i=1,\dots,7)} = f(a^{k-1}, b^{k-1}, c^{k-1}, H^{k-1}, \mathbf{r}^{k-1})$$

- Discrétisation (différences finies centrées au 1<sup>er</sup> ordre)

$$r_{i,j}^{k+1} = r^{k+1}(\theta_i, \phi_j)$$

- Application de conditions aux limites spécifiques
      - Epaisseur au centre = constante
      - Angle maximum de réfraction (base)
    - Résolution du système linéaire (mauvais conditionnement)

- Remarques

- Fortement NL
    - Schéma très peu stable
    - Existence d'une solution ( $\exists$  prouvée pour des problèmes de réflexion ( $n_d = -1$ ))

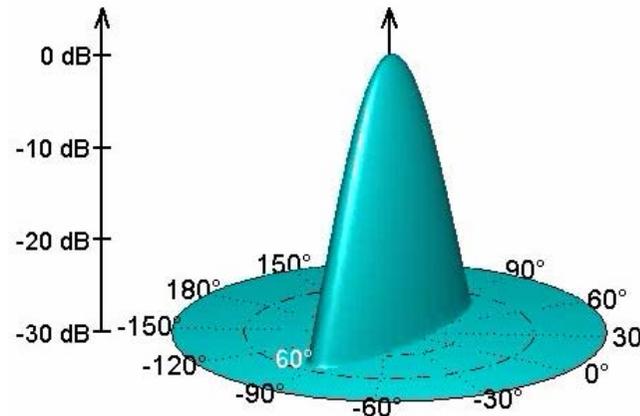
- Formulation “tracé de rayons” ( $\Leftrightarrow$  Optique Géométrique)

- Exemple d'application : synthèse d'une lentille à 58.5 GHz (communication indoor)

- **Gabarit imposé** = Faisceau gaussien elliptique asymétrique

- $\Rightarrow$  faible influence des réflexions multiples

$$h(\alpha, \beta) = \exp \left[ -\frac{\sin^2 \alpha \cos^2 \beta}{\alpha_1^2} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{\alpha_2^2} \right]$$



(HPBW=10° plan H, et 30° plan E)

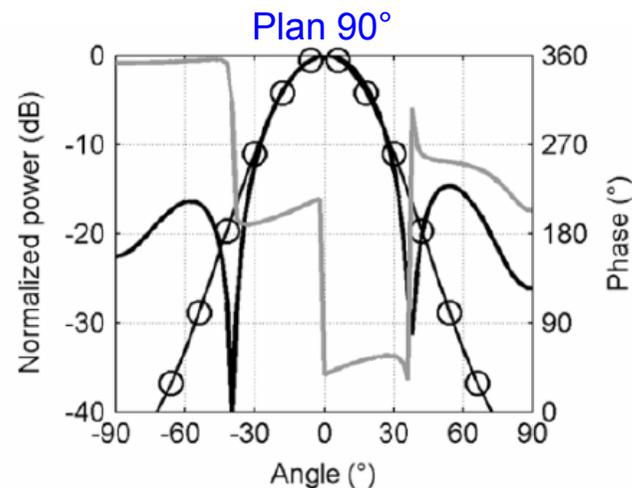
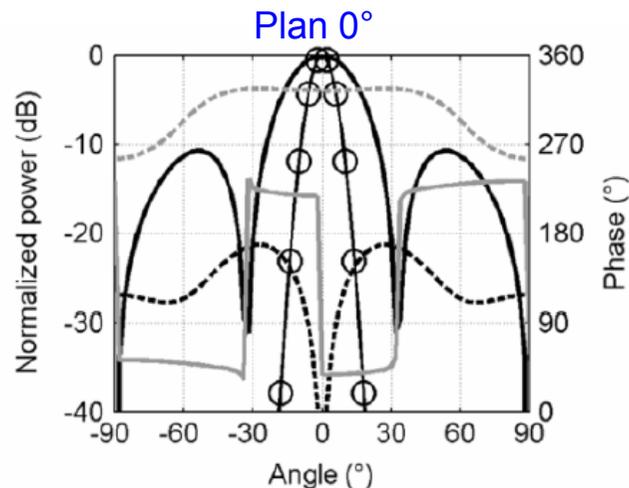
- Formulation “tracé de rayons” ( $\Leftrightarrow$  Optique Géométrique)

- Exemple d'application : synthèse d'une lentille à 58.5 GHz (communication indoor)

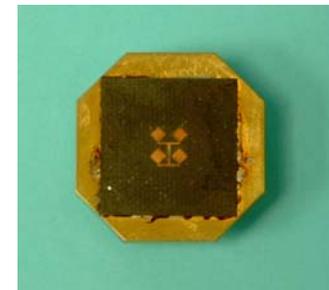
- Source primaire “réelle” = antenne imprimée

- Dimensionnement (MoM)

- Champs complexes rayonnés selon 2 plans orthononaux



Solid line: Co-pol  
Dotted line: X-pol  
Circle: Template

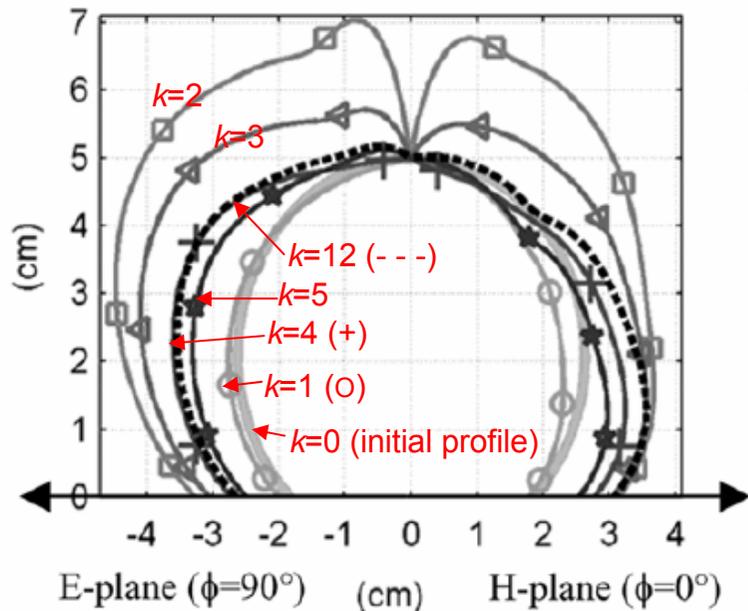


- Formulation “tracé de rayons” ( $\Leftrightarrow$  Optique Géométrique)

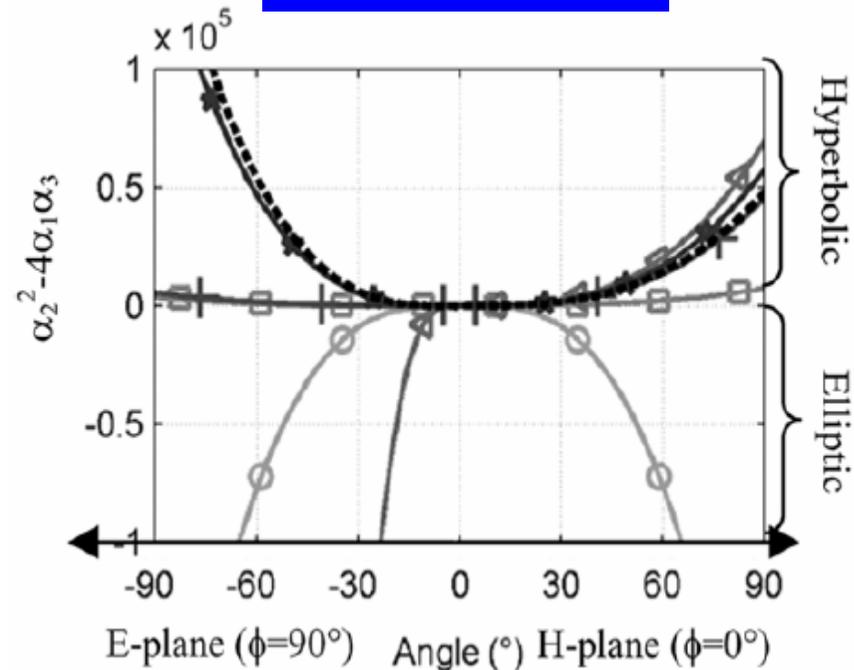
- Exemple d'application : synthèse d'une lentille à 58.5 GHz (communication indoor)

- Convergence (en 12 it.)

Variation du profil de lentille selon  $k$



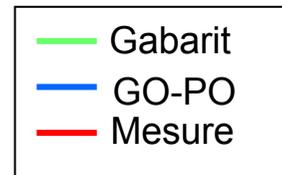
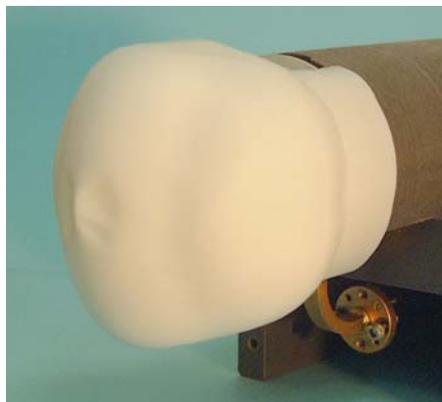
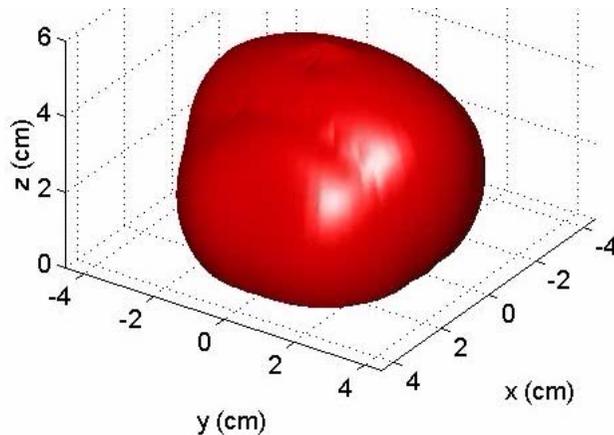
Nature de M.A. selon  $k$



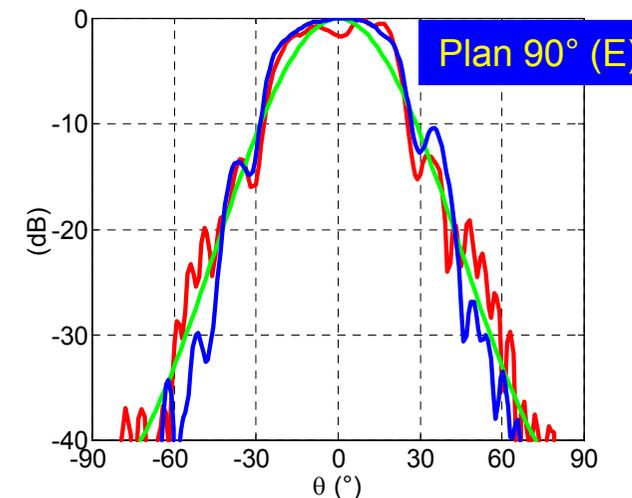
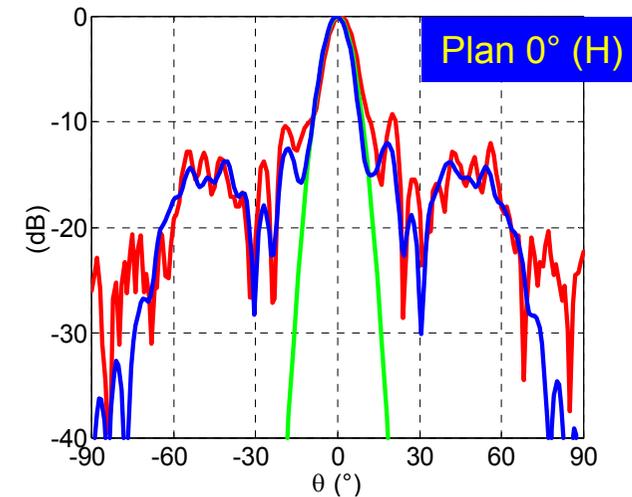
$$\Delta = \alpha_2^2 - 4\alpha_1\alpha_3 \begin{cases} \Delta > 0 \Rightarrow \text{Hyperbolique} \\ \Delta = 0 \Rightarrow \text{Parabolique} \\ \Delta < 0 \Rightarrow \text{Elliptique} \end{cases}$$

- Formulation “tracé de rayons” ( $\Leftrightarrow$  Optique Géométrique)

- Exemple d'application : synthèse d'une lentille à 58.5 GHz (communication indoor)

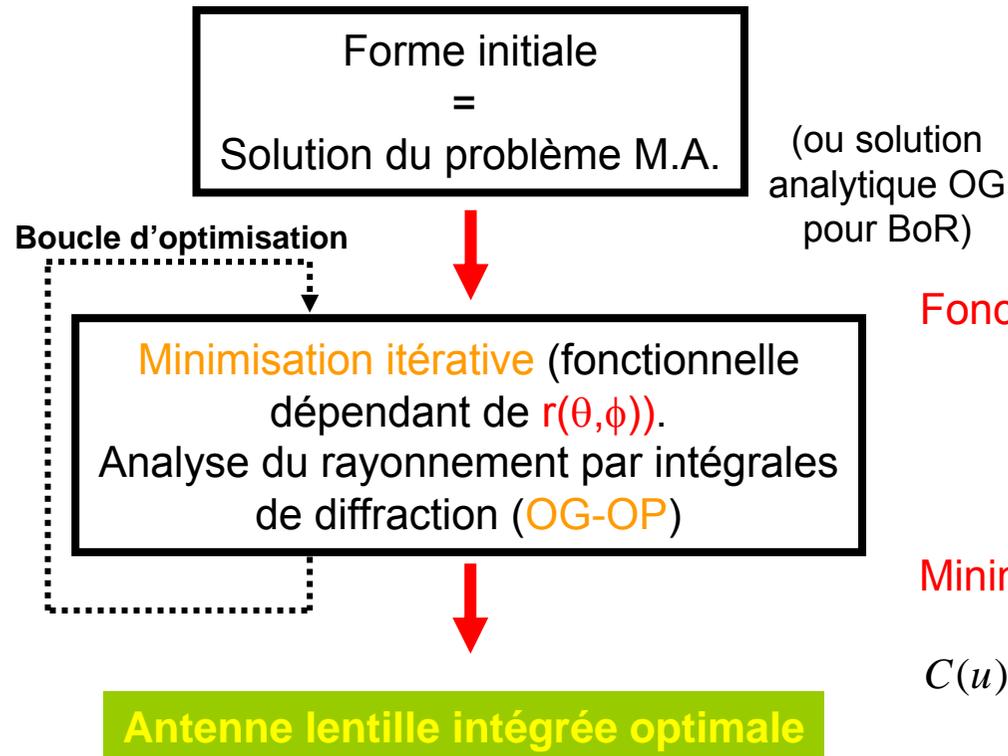


**Optimisation nécessaire**



- Principes généraux de conception

## Optimisation itérative



Fonction objectif :

$$C^k(r^k) = \sum_{i=0}^{N_d} \sum_{j=-K_d}^{K_d} p_{i,j} \left| G_{GO-PO}^k(\tilde{\theta}_i, \tilde{\varphi}_j) - h(\tilde{\theta}_i, \tilde{\varphi}_j) \right|^2$$

Minimisation type Gradient + Polak-Ribière :

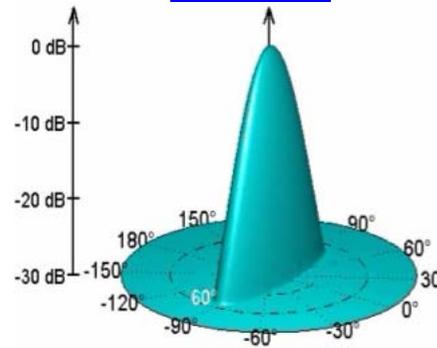
$$C(u) = C(O) + \sum_{v=0}^{N_T} \frac{\partial C}{\partial u_v} u_v + \frac{1}{2} \sum_{v=0}^{N_T} \sum_{t=0}^{N_T} \frac{\partial^2 C}{\partial u_v \partial u_t} u_v u_t + \dots$$

$$\approx c - \langle b, u \rangle + \frac{1}{2} \langle Au, u \rangle = c + f(u)$$

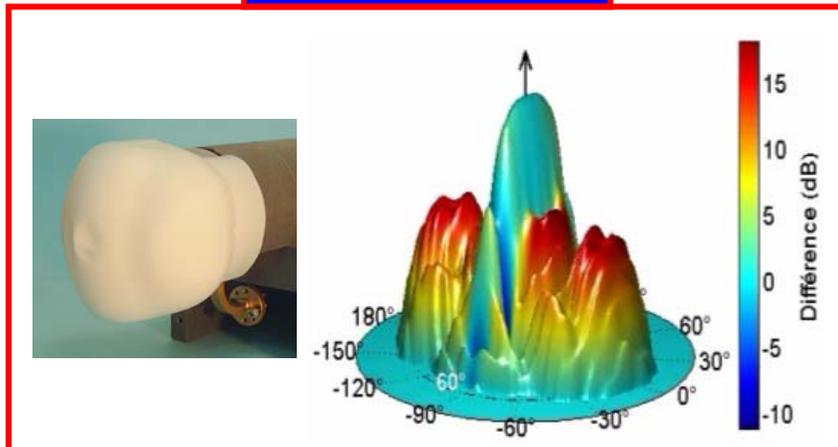
## • Illustration

- Même exemple d'application : optimisation d'une lentille à 58.5 GHz (comm. indoor)

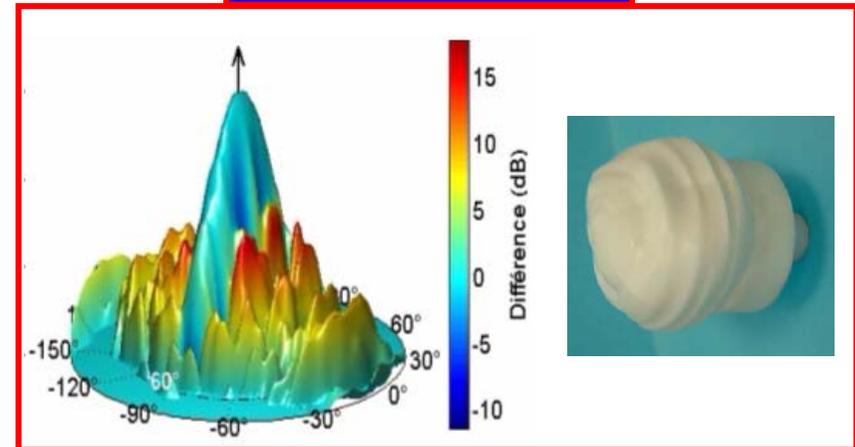
Gabarit



Après synthèse (1)  
↔  
Avant optimization



Après optimisation (2)



(1) B. Barès, R. Sauleau, IEEE TAP, March 2005

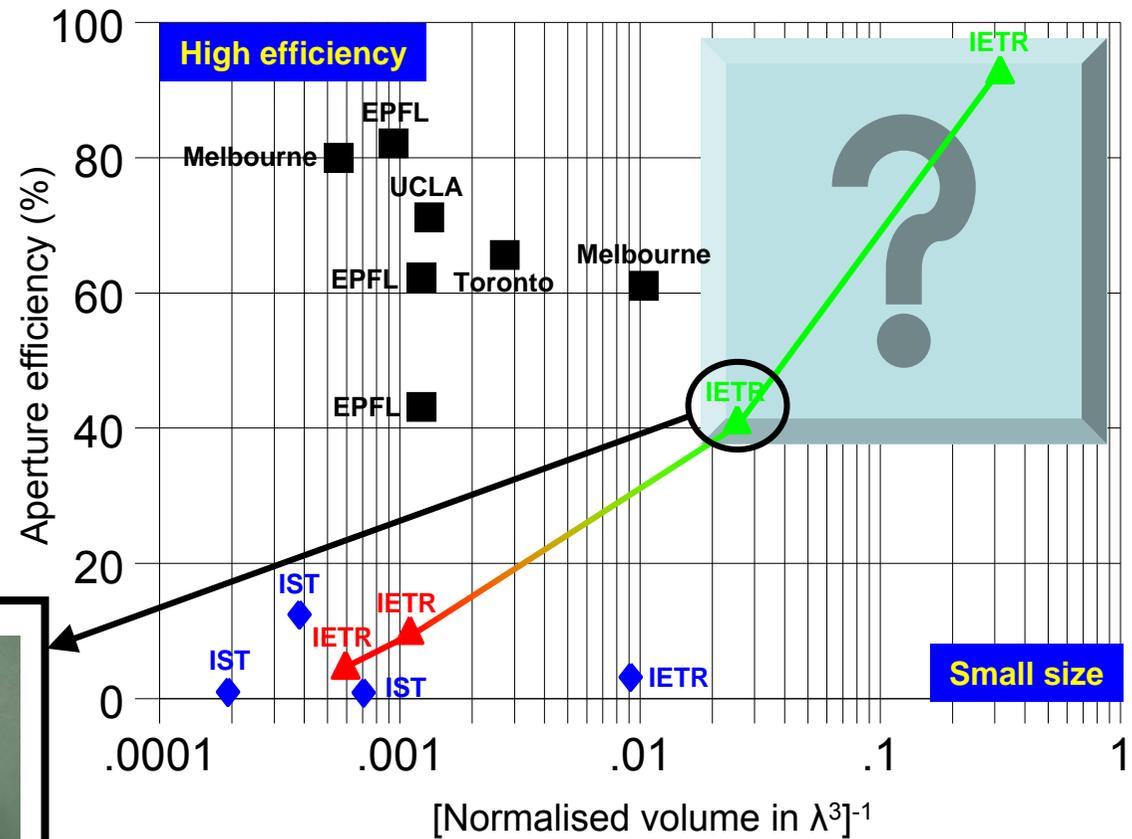
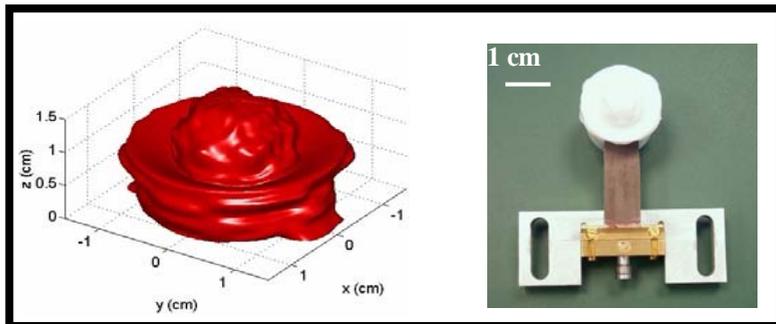
(2) R. Sauleau, B. Barès, IEEE TAP, April 2006

## Vers la miniaturisation

- Classification possible des **antennes lentilles intégrées**

### Trois catégories principales

- Canonical + Pencil beam ■
- Shaped + Shaped beam ◆
- Shaped + Pencil beam ▲



- Pourquoi ?

- Deux avantages principaux par rapport aux approches locales

- Evite l'étape de synthèse
      - Délicate (M.A.)
      - Existence de solutions ?
    - Permet une optimisation
      - Sous-contraintes (fabrication, assemblage, convexité, encombrement, etc.)
      - Multi-objectif (rayonnement, bande passante, etc.)
      - Multi-paramètres
        - ❖ Matériaux
        - ❖ Formes
        - ❖ Source(s) primaire(s)

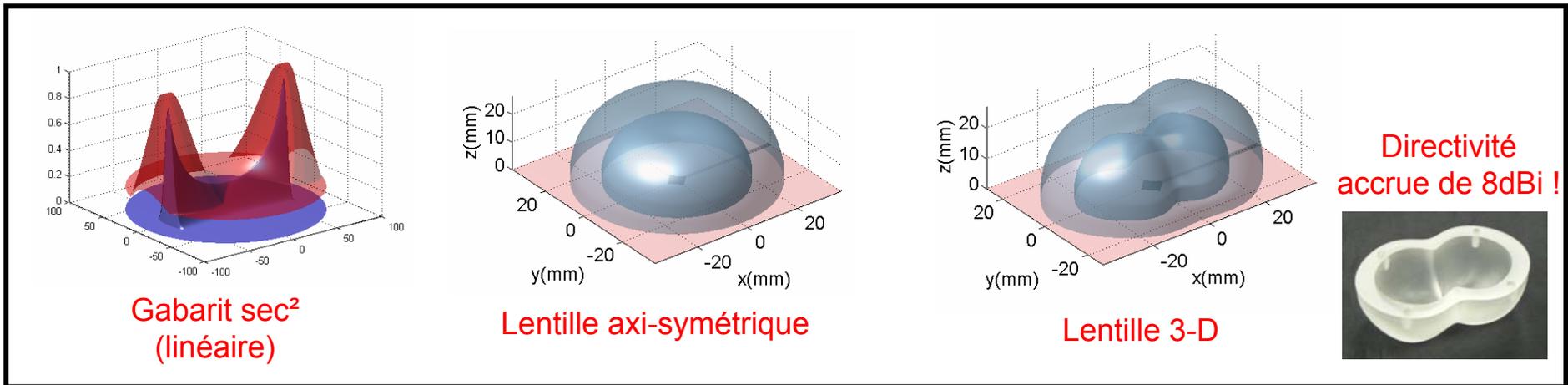


- Méthodologies actuelles

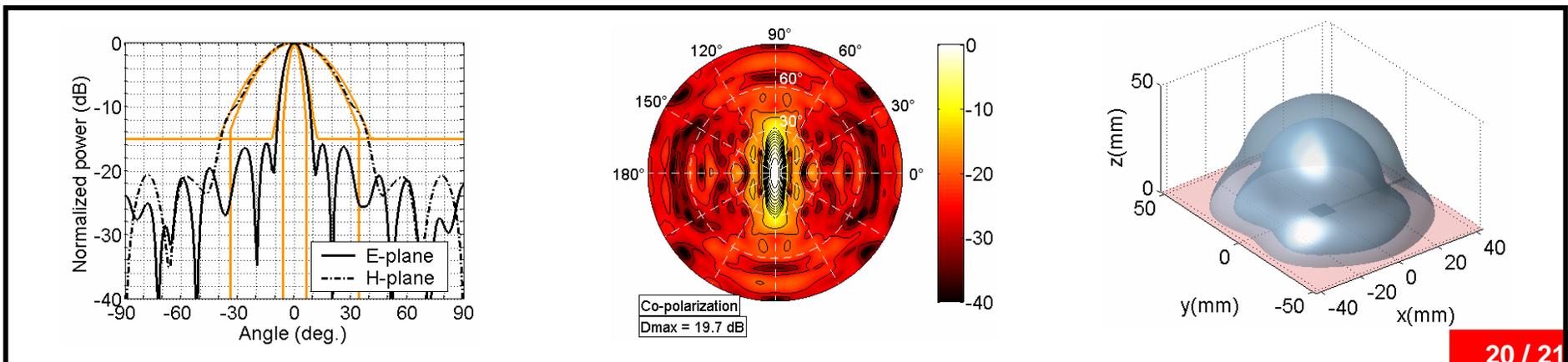
- Programmation évolutionnaire (GA) couplée à
      - OG-OP [IETR, IST (Lisbonne)] : méthode approchée (taille, diffraction, réfl. mult. + totale !)
      - BIE de Muller [IETR + IRE (Kharkov)] : formulation exacte, mais 2-D
      - FDTD [IETR] : méthode globale, 2-D, peu de contraintes (formes, matériaux, etc.)

## • Illustrations : 2 exemples de lentilles double-coque

- Double coque : aucune solution pour M.A. actuellement ...
- **Exemple 1** : Couverture terrestre globale en bande Ka (26 GHz) (Alcatel Alenia Space)



- **Exemple 2** : Communications intra-bâtiment (faisceau gaussien à section elliptique)



- Conclusions

- Présentation de méthodes de synthèse et d'optimisation d'antennes lentilles 3-D
- Synthèse OG
  - Monge-Ampère
- Optimisation (OG-OP, IE, FDTD)
  - Locale ou globale
- Méthodes applicable à d'autres types d'antennes diélectriques non résonantes (ex. : radômes)

- Tendances et besoins

- Extension des méthodes de synthèse par tracé de rayons (OG)
  - Dispositifs multi-matériaux
  - Dispositifs non homogènes
- Optimisation multi-objectifs (rayonnement, bande passante, rendement) sous contraintes (miniaturisation, ingénierie [matériaux, formes, etc.] )
- Optimisation + Calcul rapide (ex. : VIE + FMM), y compris source !

# Techniques d'optimisation de formes d'antennes lentilles intégrées

Ronan Sauleau

(En collaboration avec B. Barès, G. Godi, A. Rolland, A. Boriskin)

[Ronan.Sauleau@univ-rennes1.fr](mailto:Ronan.Sauleau@univ-rennes1.fr)

IETR

(Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes)

UMR CNRS 6164

Université de Rennes 1 – Rennes, France

[www.ietr.org](http://www.ietr.org)