

Optimisation de formes d'antennes lentilles diélectriques : méthodes de conception et exemples d'applications

Ronan SAULEAU

Barbara BARES, Gaël GODI, Anthony ROLLAND

Ronan.Sauleau@univ-rennes1.fr

IETR, UMR CNRS 6164

Université de Rennes 1 – Rennes, France

www.ietr.org

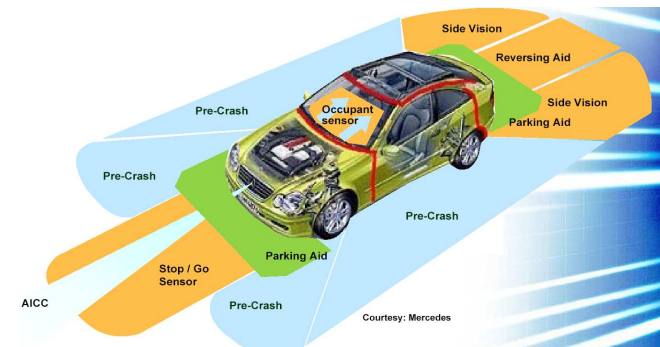
1. Introduction
2. Problématique, Outils de conception spécifiques
3. Synthèse de formes 3-D
4. Optimisation locale de formes 3-D
5. Optimisation globale de formes 3-D
6. Lentilles formées de taille réduite
7. Lentilles formées multi-matériaux
8. Conclusion

• Applications émergentes en ondes millimétriques (2/2)

□ Secteur automobile (Intelligent Transport System)

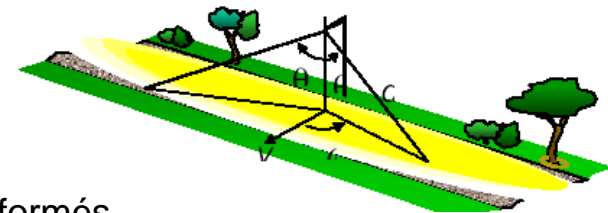
▶ Radar d'assistance à la conduite (76-82 GHz)

- Radar ACC Long Range (~ 80-200m)
 - Champ de vision ~ 6°
 - Antennes à très fort gain (~ 30dBi)
- Radar ACC Short Range (~ 20-80m)
 - Champ de vision ~ ±20°
 - Antennes multi-faisceaux
- Radar UWB (> 2010)
 - Champ de vision ~ ±80°
 - Antennes multi-faisceaux



▶ Véhicules intelligents (63-64 GHz)

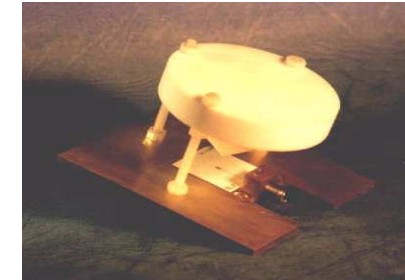
- Road Transport and Traffic Telematics [RTTT]
 - Communications inter-véhicules
 - Communications véhicules-infrastructures
- Caractéristiques antennaires
 - Antennes multi-faisceaux, Antennes à faisceaux formés
 - Gain ~ 10-30dBi



- Les antennes lentilles : Une technologie candidate en mm ?

- Antenne lentille

= Source primaire + Système(s) de focalisation



Lentille hyperbolique éclairée par un patch sur alumine à 38GHz

- 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)

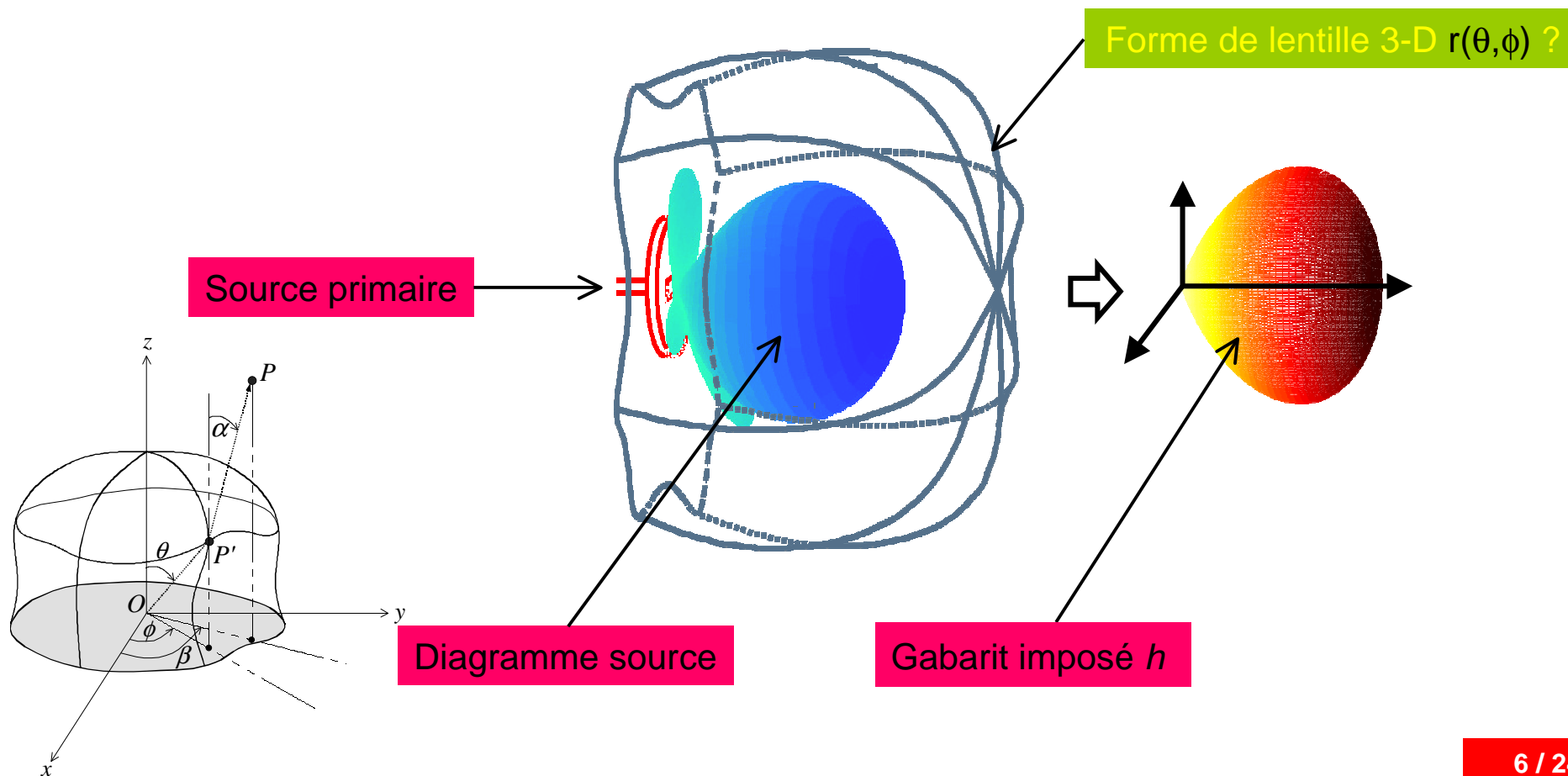
- Etat de l'art : 4 constats

- ▶ Formes canoniques, souvent conservatives
 - ▶ Formes arbitraires de révolution
 - ▶ Lentilles de grande taille
 - ▶ Seulement analyse EM
- } → Formes arbitraires 3-D
- Taille réduite
- Optimisation (formes,...)

- 1^{er} problème posé

Paramètres = géométrie
Objectif = rayonnement

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



Antenne lentille :=
Source + Système focalisant

- 1^{er} problème posé (suite)

- Synthèse de forme(s) réfractante(s)

- ▶ De multiples degrés de libertés

- Formes du système focalisant

- 1 ou plusieurs surfaces réfractantes ?
 - Symétrie de révolution ou forme arbitraire ?

- Matériaux constitutifs

- Homogène (1 seul matériau)
 - Multi-matériaux (ϵ_i ?, répartition spatiale ?)

- Sources primaires

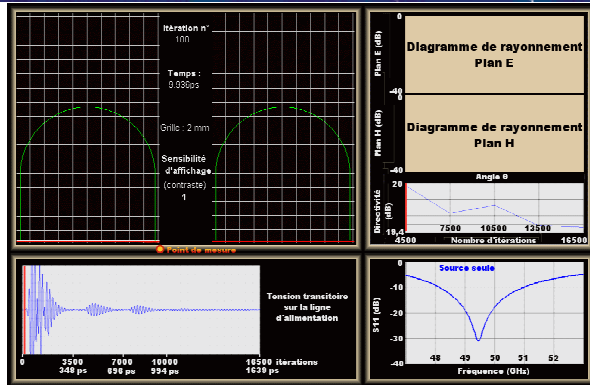
- ▶ 1 ou plusieurs sources

- Sources planaires ou 3-D ? Géométrie ? Passive ou active ?
 - Sources ponctuelles ou distribuées (réseaux, etc.)

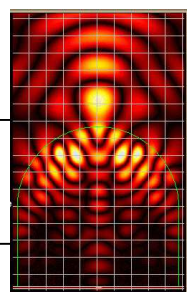
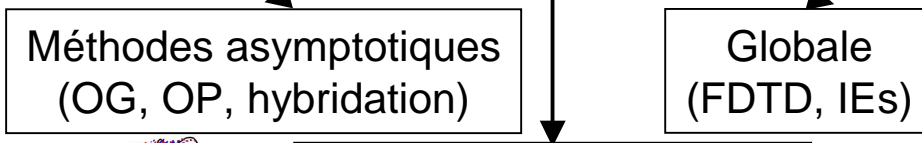
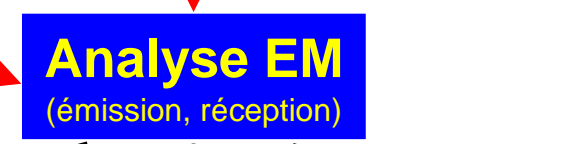
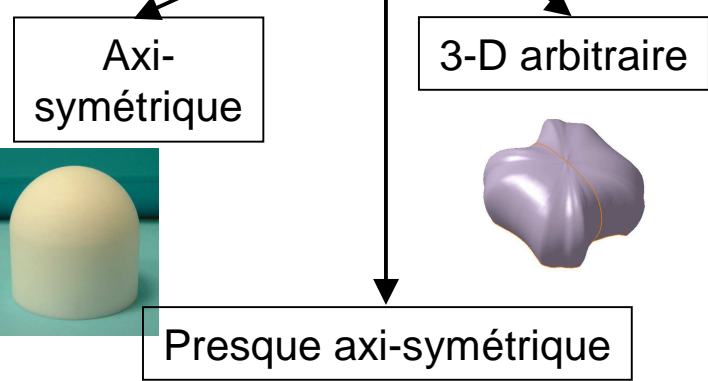
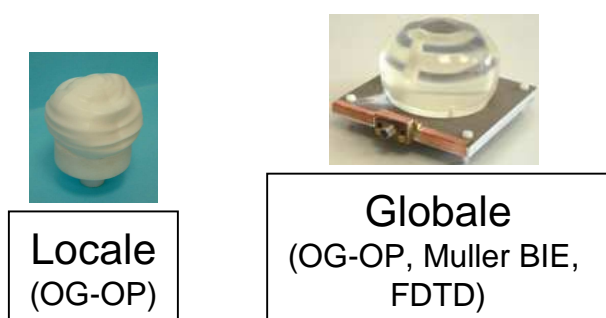


3 catégories de problèmes : Analyse, Synthèse, Optimisation

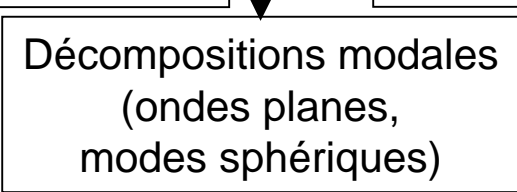
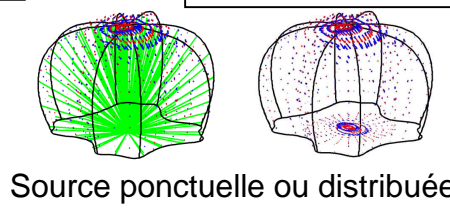
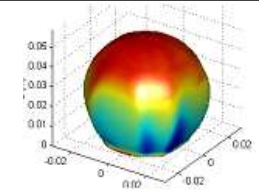
Méthodes numériques spécifiques : diversité de taille, de formes, de matériaux



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



* Tracé de rayons



• Formulation “tracé de rayons” (\Leftrightarrow Optique Géométrique) [1]

□ Conservation de la puissance dans un tube élémentaire de rayon

$$(E1) \quad h(\alpha, \beta) \sin \alpha \, d\alpha \, d\beta = K T(\theta, \phi) g(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi$$

□ Lois vectorielles de Snell-Descartes ($n_d \vec{k}_i \wedge \vec{n} = \vec{k}_t \wedge \vec{n}$)

$$(E2) \quad \frac{\partial r}{\partial \theta} = \frac{(\sin \alpha \cos \theta \cos(\beta - \phi) - \cos \alpha \sin \theta)r}{n_d - (\sin \alpha \sin \theta \cos(\beta - \phi) + \cos \alpha \cos \theta)}$$

$$(E3) \quad \frac{\partial r}{\partial \phi} = \frac{\sin \alpha \sin(\beta - \phi)r \sin \theta}{n_d - (\sin \alpha \sin \theta \cos(\beta - \phi) + \cos \alpha \cos \theta)}$$

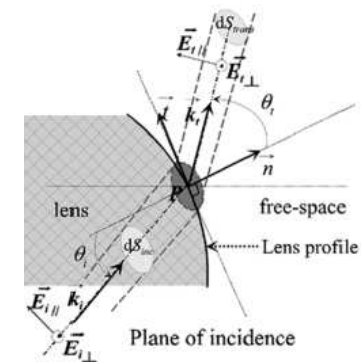
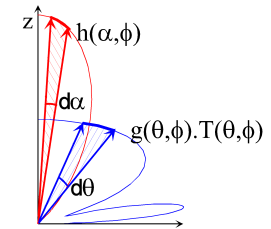
□ Condition de Schwartz

$$(E4) \quad \frac{\partial^2 r}{\partial \theta \partial \phi} = \frac{\partial^2 r}{\partial \phi \partial \theta}$$

□ Transformation de (E1)-(E4) en EDP de Monge-Ampère (M.A.)

$$r_{\theta\theta} r_{\phi\phi} - r_{\theta\phi}^2 - a r_{\theta\theta} - b r_{\theta\phi} - c r_{\phi\phi} - H = 0$$

$$a, b, c, H = f(\theta, \phi, r, r_\theta, r_\phi, \alpha, \beta, n_d)$$



- 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^{er} 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 ($n_d = -1$))

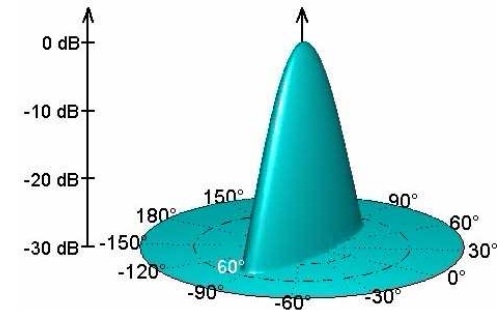
- Exemple : Synthèse d'une lentille à 58.5 GHz (comm. indoor)

- Gabarit

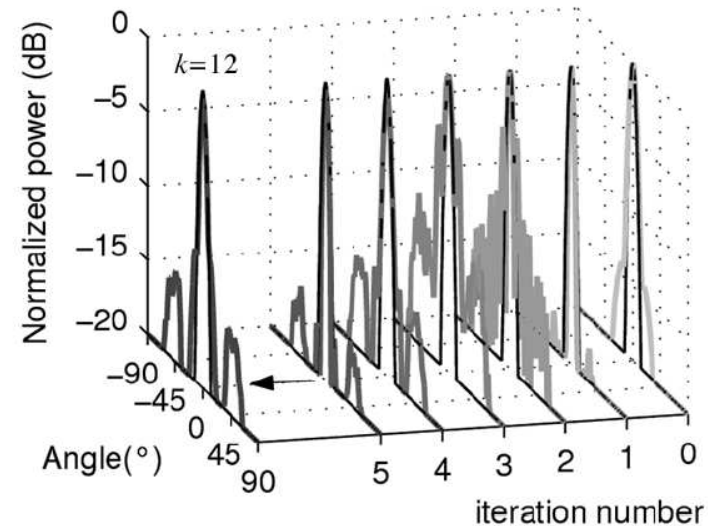
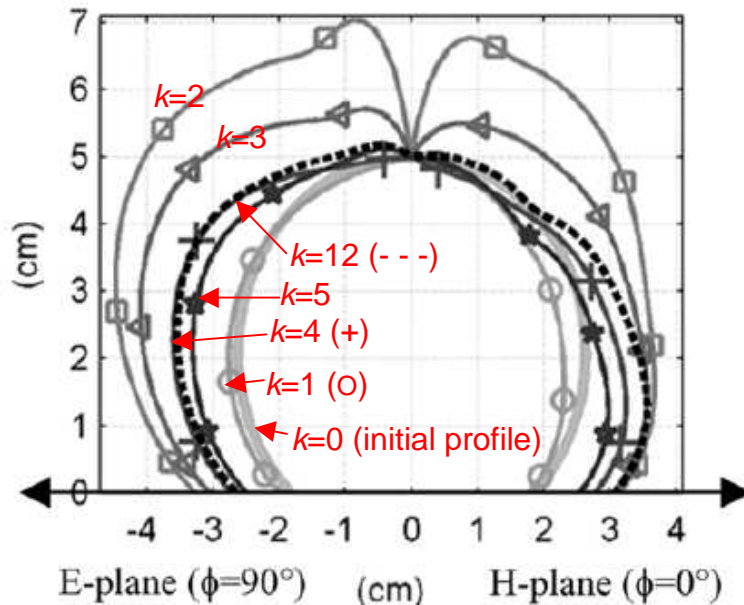
- Faisceau gaussien elliptique asymétrique

- HPBW=10° plan H, et 30° plan E

- Intérêt : Faible influence des réflexions multiples

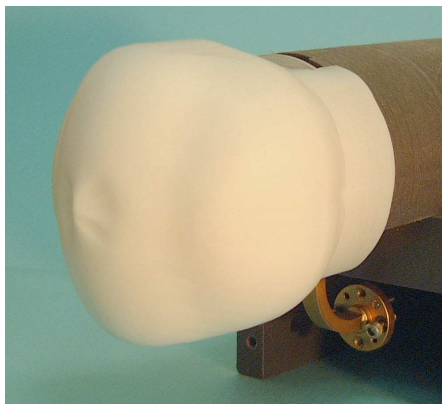
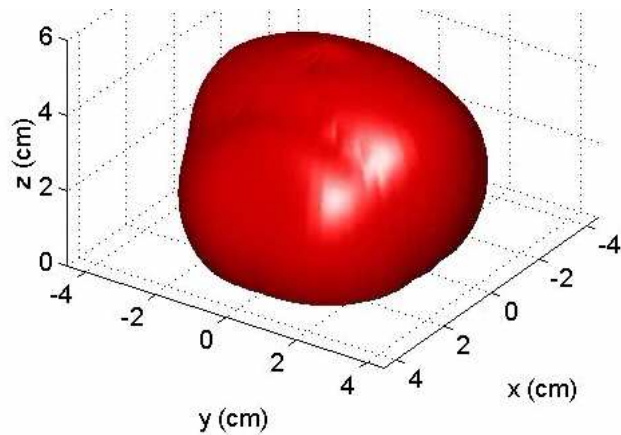


- Convergence selon itération k : Profil de lentille et Diagramme (plan H)

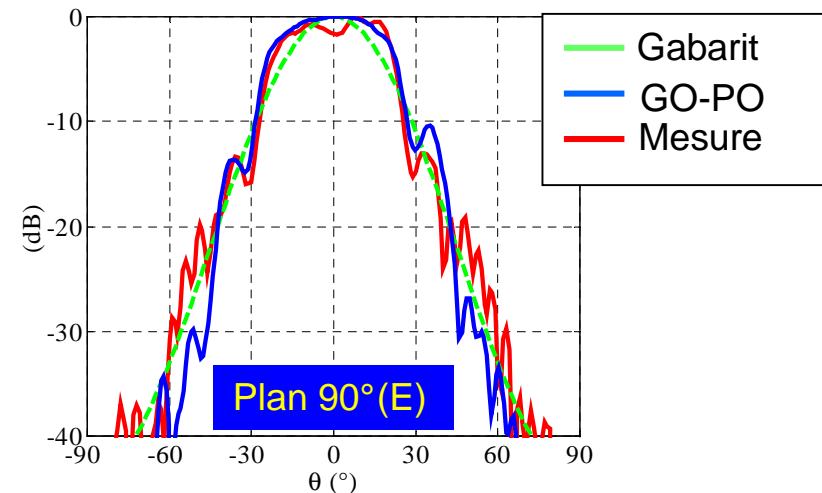
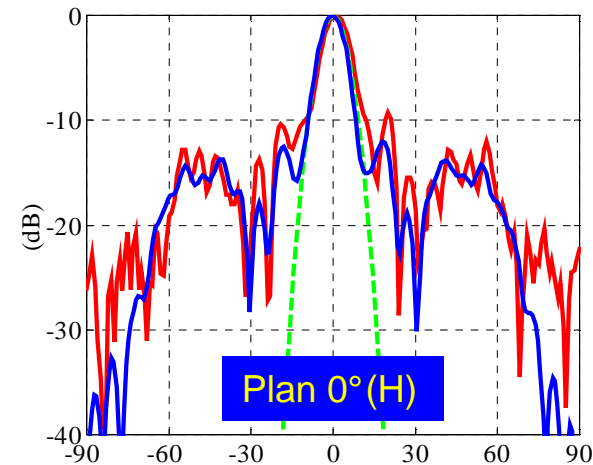


- Exemple : Synthèse d'une lentille à 58.5 GHz (comm. indoor)

□ Lentille synthétisée ($\varnothing \sim 13 \times \lambda_0$)



□ Diagrammes de rayonnement



Optimisation nécessaire

• Principes généraux

Optimisation itérative

Forme initiale
=
Solution du problème M.A.

(ou solution analytique OG pour BoR)

Boucle d'optimisation

Minimisation itérative (fonctionnelle dépendant de $r(\theta, \phi)$).
Analyse du rayonnement par intégrales de diffraction (OG-OP)

Antenne lentille intégrée optimale

Fonction objectif :

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

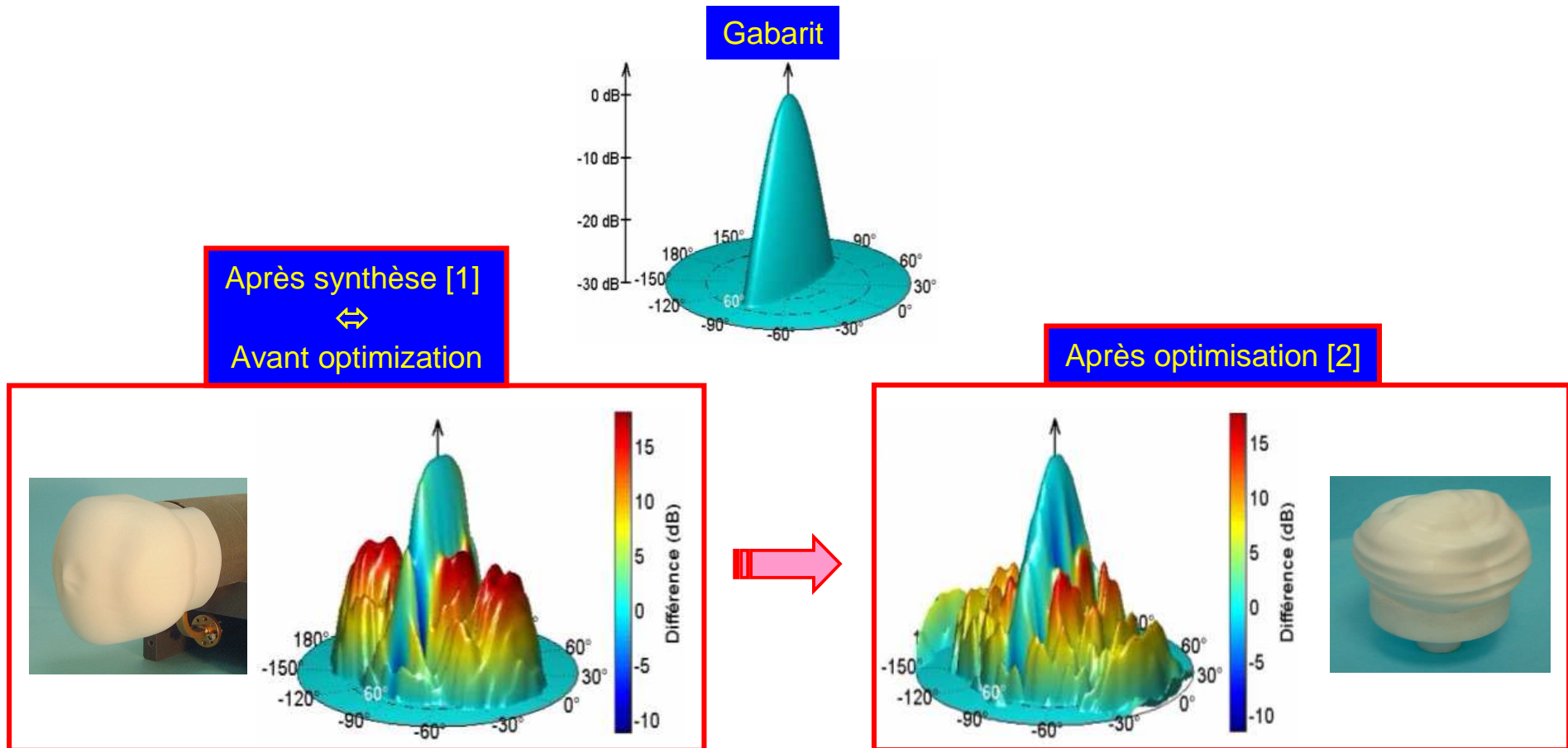
Minimisation type Gradient + Polak-Ribière :

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

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

• Illustration

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



[1] B. Barès, R. Sauleau, IEEE TAP, March 2005

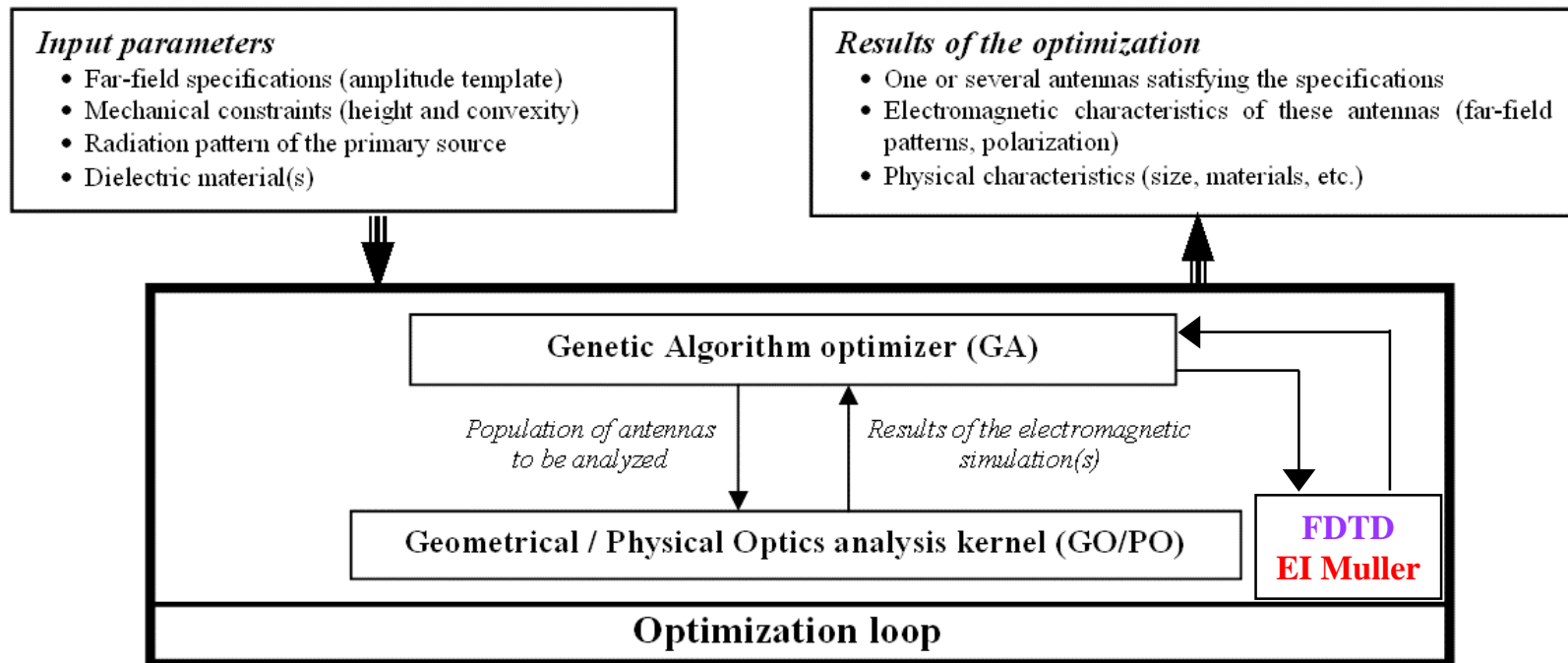
[2] R. Sauleau, B. Barès, IEEE TAP, April 2006

• Pourquoi ?

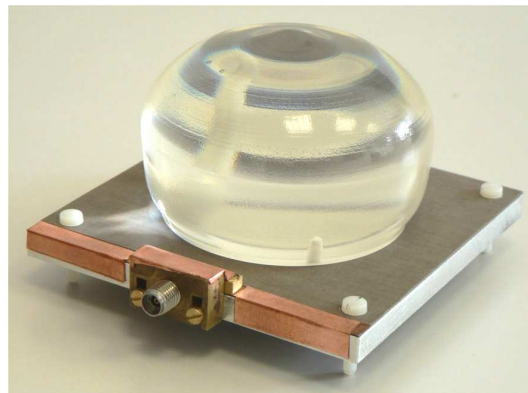
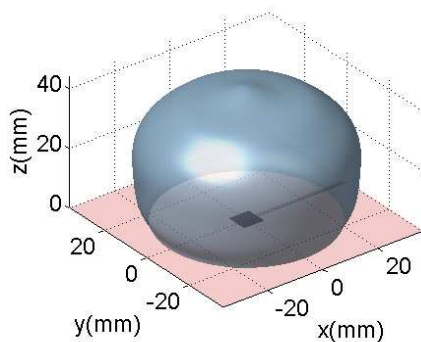
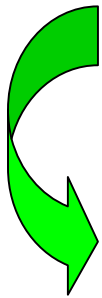
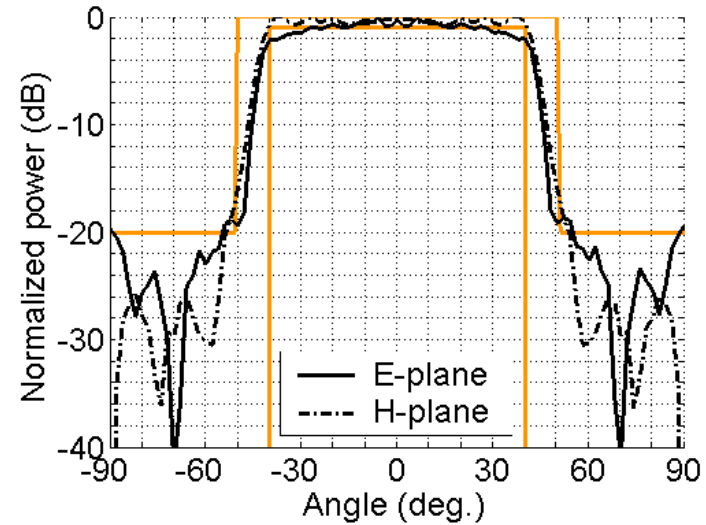
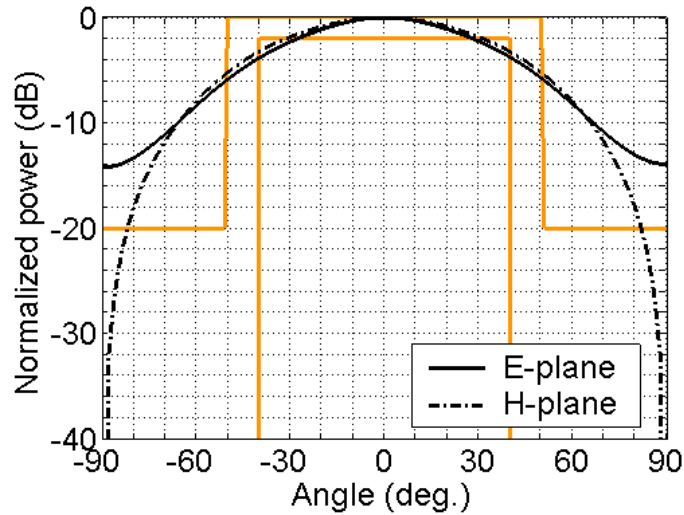
- Problème de synthèse par OG : délicat à résoudre (stabilité, convergence, etc.)

• Méthodologie possible

- Optimisation directe
- Par ex.: AG + Noyau d'analyse (HF, FDTD, EIs)



- Exemple : Diagramme sectoriel à 28 GHz



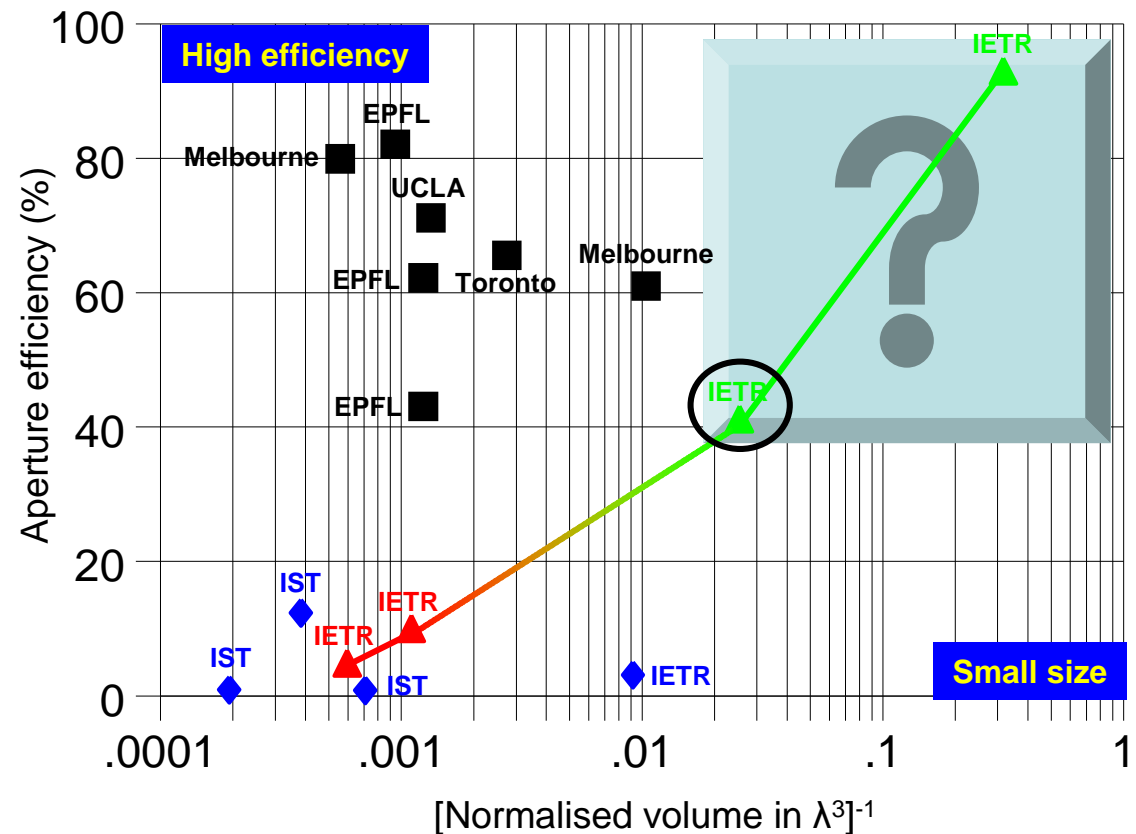
6 – Lentilles formées de taille réduite

• Vers la miniaturisation

- Conséquences : amélioration des rendements (rayonnement, surface)
- Classification possible des antennes lentilles intégrées

Trois catégories principales

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



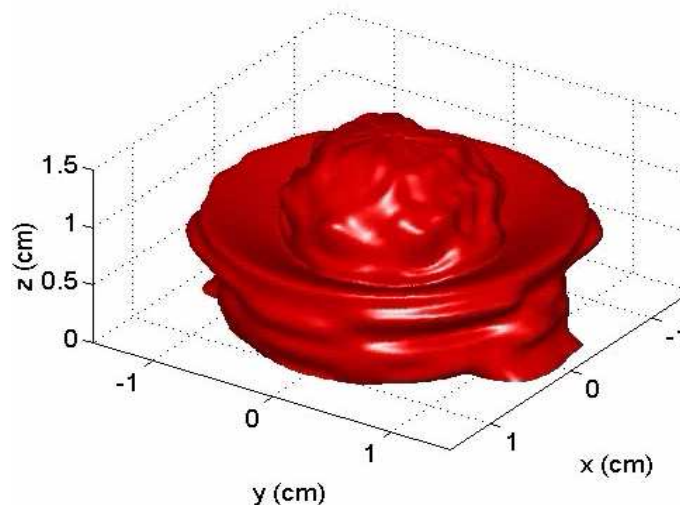
- Exemple en bande Q (47.2-50.2 GHz)

- Application : Source primaire pour antenne Réseau Focal [1]

- ▶ Principales spécifications

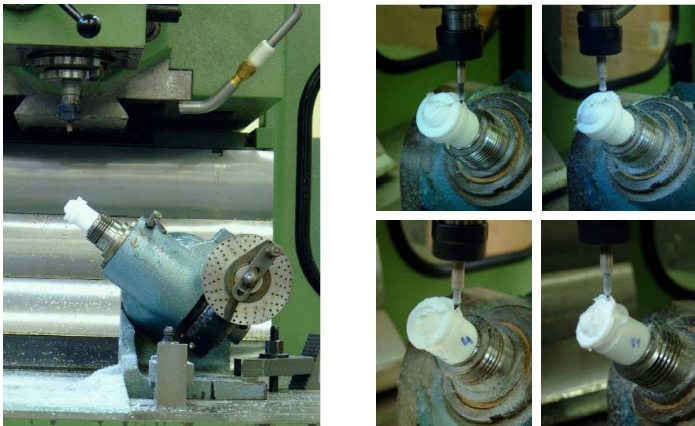
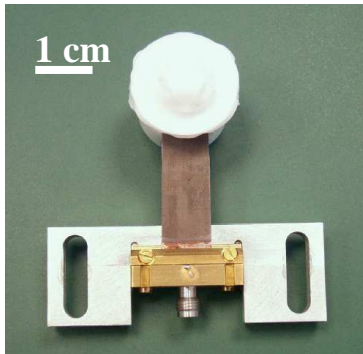
- Faisceau axi-symétrique, Niveau < -12dB au delà de $\theta = \pm 24^\circ$
 - Dimensions : hauteur < 15mm; diamètre < 18mm ($3x\lambda_0$)
 - Directivité dans l'axe > 19dBi $\Leftrightarrow \eta_{ap} > 90\%$
 - Rendement en rayonnement $\eta_{rad} > 70\%$

- Lentille optimisée

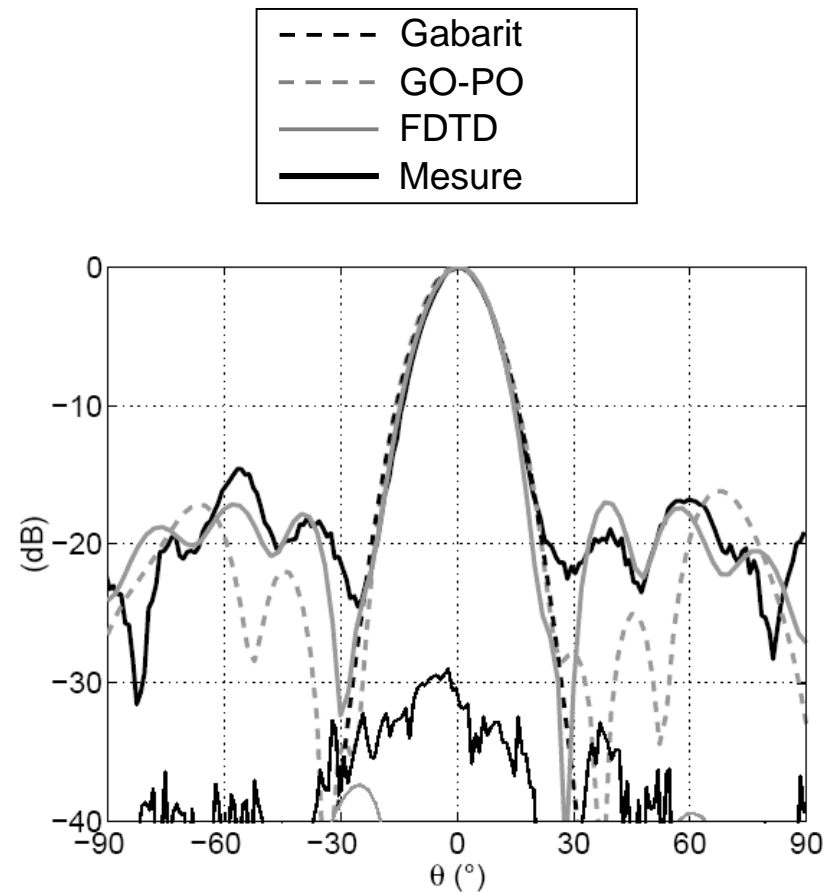


- Exemple en bande Q (47.2-50.2 GHz)

- Prototypage

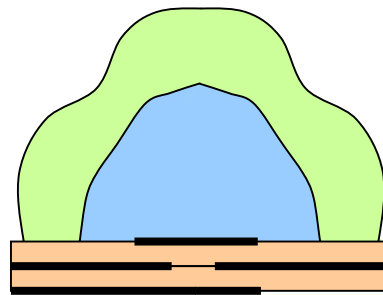


- Performances en rayonnement [1]



[1] R. Sauleau, B. Barès, IEEE TAP, April 2006

- Configuration générique



} Structure multi-coques (ici bi-coque)

} Source primaire

- Avantages

- Amélioration des performances

- ▶ Amélioration du rendement
 - ▶ Elargissement de la bande passante
 - ▶ Très fort dépointage électronique
 - ▶ Réduction de taille et de poids
 - ▶ Etc.

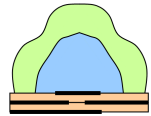
- Conception

- Optimisation globale (AG) + Méthodes asymptotiques OU globales

- Exemple : Observation terrestre en bande Ka en orbite basse

- Spécifications [1]



#	Fréquence	26 GHz
1	VSWR sur 50 Ω	≤ 1.5:1 (≤ -14dB)
2	Polarisation	RHCP
3	Ouverture en élévation	0 - 65° off-nadir
4	Gabarit en élévation (cosécante) Balayage mécanique	< -8 dBi @ 0° > -5 dBi @ 40° > +5.5 dBi @ 65°
5	Gabarit en azimut	Celui procurant le plus grand gain
6	Rapport axial	< 7 dB @ 0-70°
7	Matériaux 	- Coque interne : Macor - Coque externe : Rexolite
8	Poids	< 200g
9	Diamètre	< 70 mm

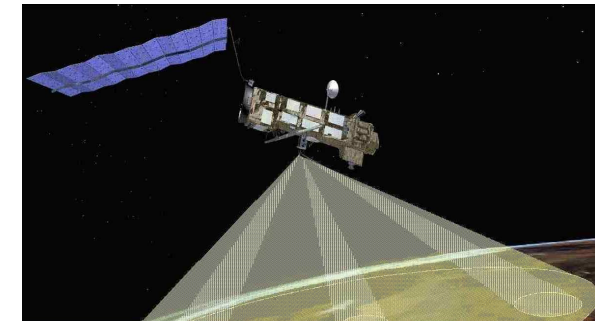
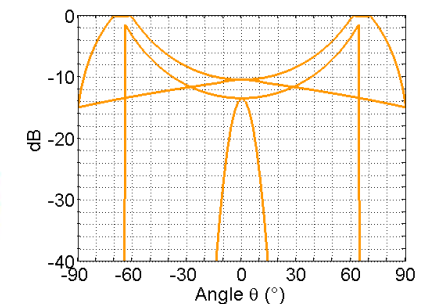
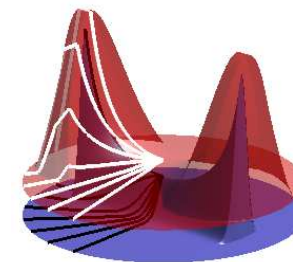


Diagramme cible



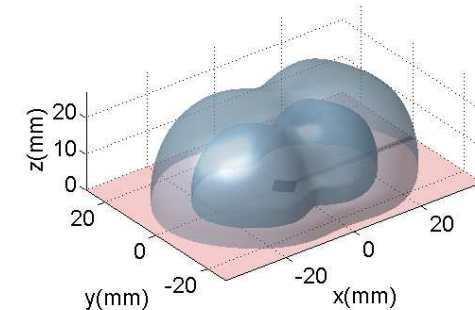
- Exemple : Observation terrestre en bande Ka en orbite basse

- Optimisation de formes de deux coques [1]

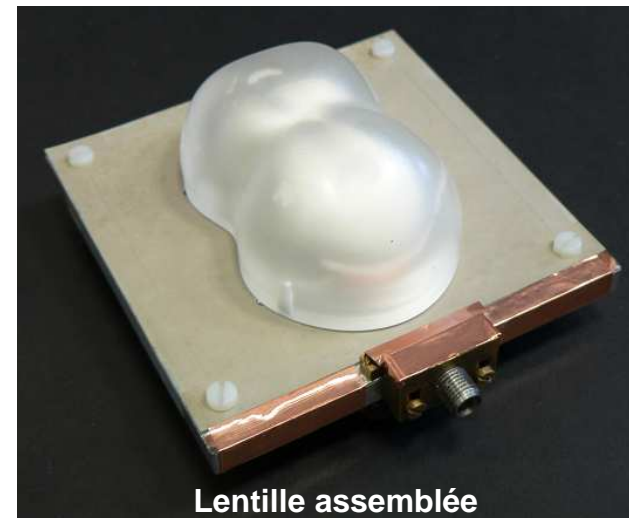
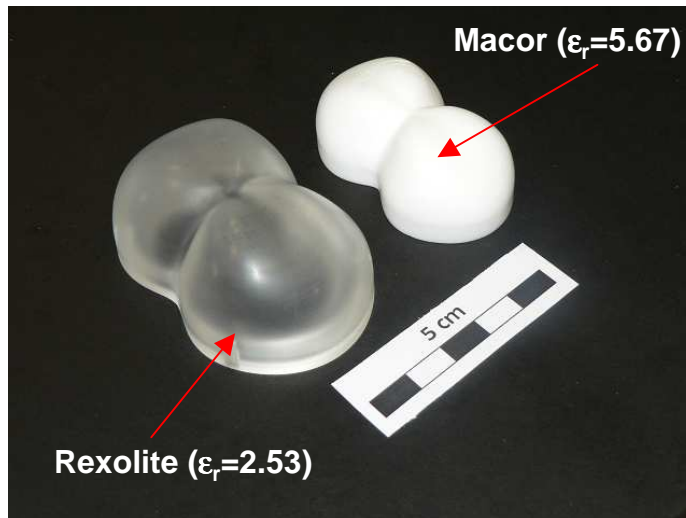
- ▶ GA + OG-OP en 3-D + Réflexions multiples

- ▶ Optimisation sous contraintes mécaniques

- Assemblage (convexité, rayons de courbure)



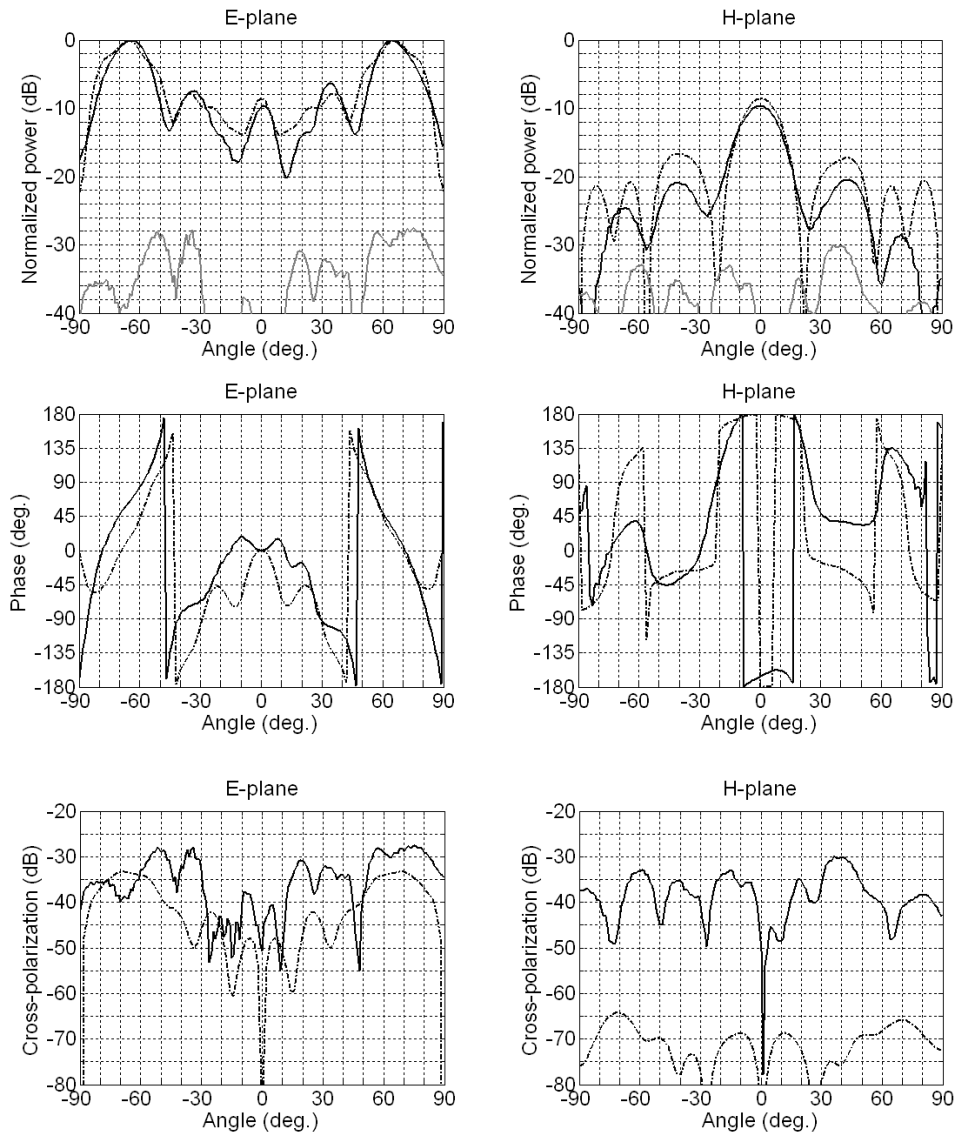
- Prototypage



[1] C. Fernandes, J. Costa, G. Godi, R. Sauleau, H. Legay, EuCAP 2006, Nov. 2006

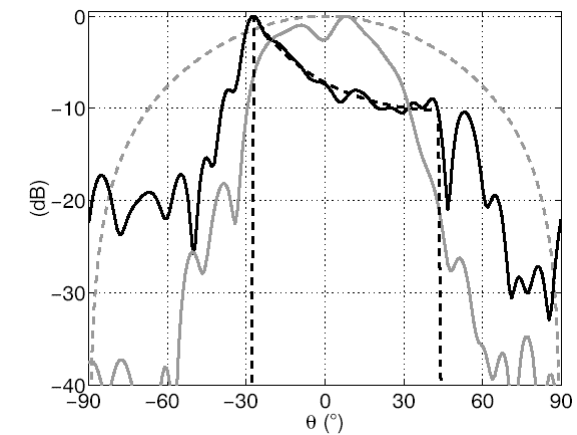
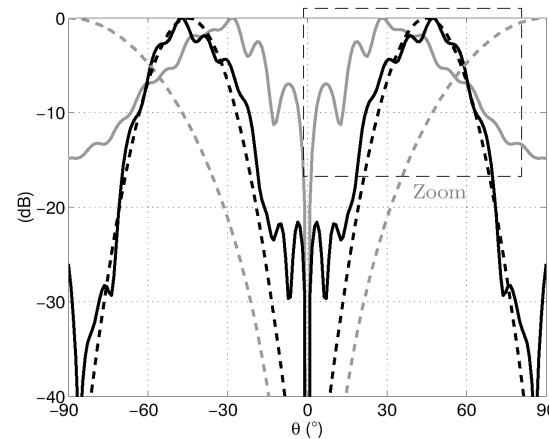
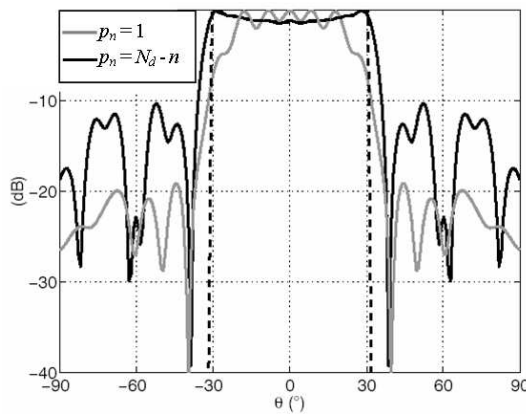
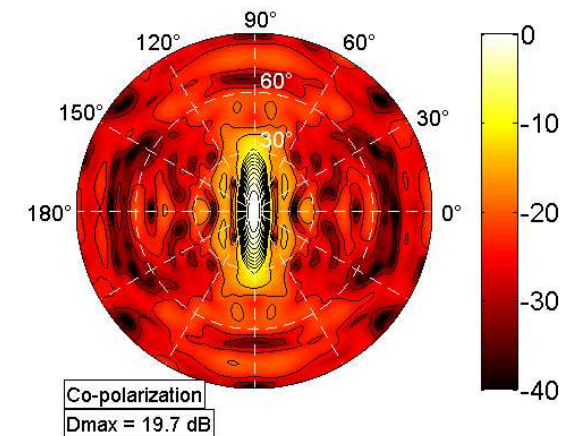
- Exemple : Observation terrestre en bande Ka en orbite basse

Diagrammes en amplitude et phase
mesurés à 26 GHz



• Optimisation de formes d'antennes lentilles

- Minimisation locale, globale, sous contraintes
- Analyse des performances
 - ▶ Méthodes asymptotiques
 - ▶ Méthodes globales (temps, fréquence)
- Grande variété de couvertures radio



(lens pattern = solid black line —)

Optimisation de formes d'antennes lentilles diélectriques : méthodes de conception et exemples d'applications

Ronan SAULEAU

Barbara BARES, Gaël GODI, Anthony ROLLAND

Ronan.Sauleau@univ-rennes1.fr

IETR, UMR CNRS 6164

Université de Rennes 1 – Rennes, France

www.ietr.org