

Antennes intégrées et microstructurées

Planning 2008

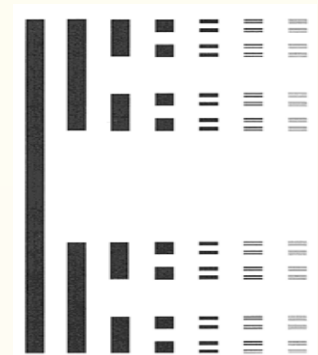
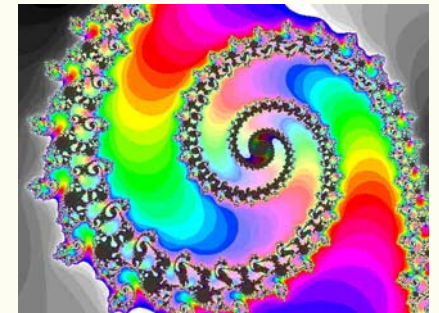
- | | | |
|----------------|-------|--|
| # 11 janvier : | AS | Poynting, Q, ondes spheriques, réduction de taille |
| # 18 janvier : | AS | antennes large bande, multibandes et UWB |
| # 25 janvier : | AS | Terahertz et μ technos |
| # 01 février : | CR | transitions, feeding, integration antennes-circuit |
| # 04 février : | CR | BIP, fractales, haute impedance |
| # 15 fevrier : | AS | diversité |
| # 22 février : | AS/CR | TP antennes ULB |
| # 22 février : | CR | TP mesures antennes ULB |
| # 7 mars : | CR | TP (2me ½ groupe) ? |
| # 21 mars : | AS-CR | CC |

AS = A. Sibille, alain.sibille@ensta.fr ; CR= C. Roblin, christophe.roblin@ensta.fr

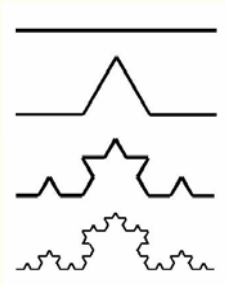
- ❑ Antennes Fractales
 - Quelques mots sur les fractales
 - Géométries fractales intéressante en antenne
- ❑ Bande Interdite Photonique
- ❑ Surfaces Sélectives en Fréquence (FSS) & Surfaces Haute Impédance (HIS)

Antennes fractales

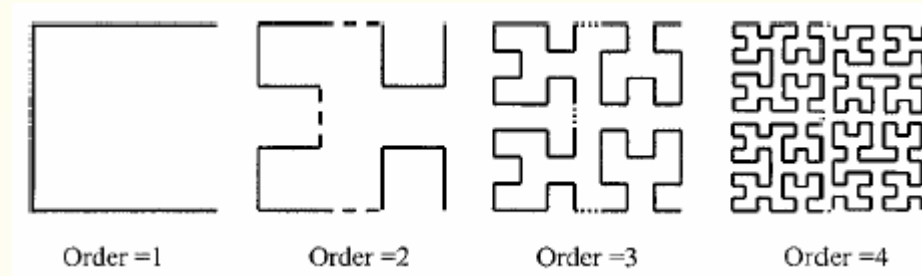
- ❑ Mesurer la longueur d'une courbe avec une « règle » (*jauge*) d'échelle variable (Ex. : longueur des côtes Françaises...)
- ❑ Mesurer la « capacité » d'une courbe à paver (remplir) une surface plus ou moins complètement
- ❑ S'intéresser à des courbes (plus généralement des formes) dites pathologiques, c'est-à-dire non rectifiables (par ex. continues et dérivables nulle part)
- ❑ S'intéresser tout particulièrement à l'**auto-similarité** (cas particulier le plus important)



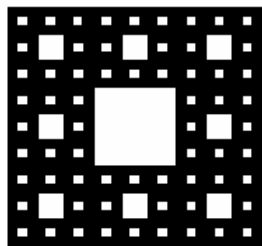
*Poussière de Cantor
(1870)*



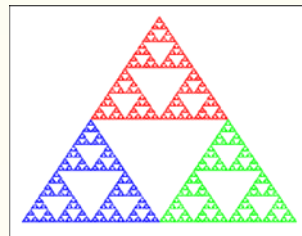
Courbe de Von Koch



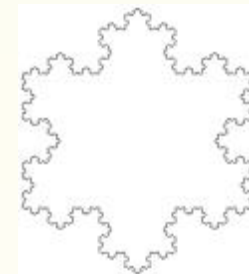
Courbe de Hilbert



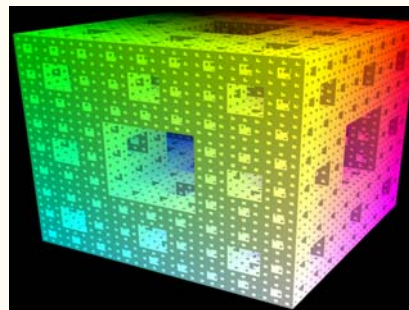
Carré de Sierpinski



Tamis (gasket) de Sierpinski



Flocon de Von Koch

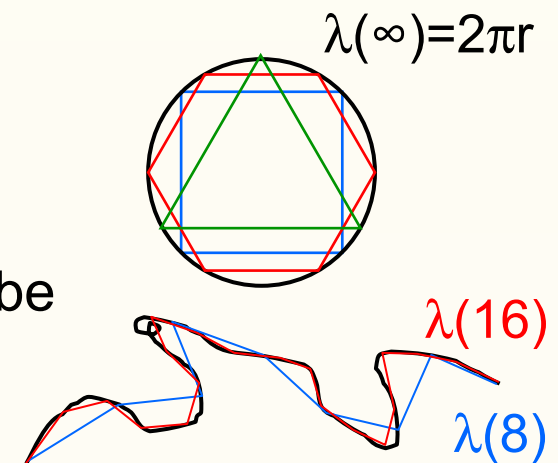


- ❑ Présentation restreinte aux géométries **auto-similaires**, les plus intéressantes pour l'antenniste
- ❑ Approche intuitive : mesure de la longueur d'un arc plan Γ par «rectification», càd par mesure d'une ligne polygonale approchée («méthode de l'arpenteur») :
 - Soit η la jauge de mesure (règle élémentaire, pas du marcheur...)
 - Soit N le nombre d'arcs constituant la ligne
 - Soit p un nombre proportionnel au nombre de pas de mesure
 - Alors la longueur λ de Γ est : $\lambda(p) = N(p) \cdot \eta(p)$

❑ On dit que l'arc Γ est rectifiable si : $\lim_{p \rightarrow \infty} \lambda(p) = L < \infty$

❑ On peut donc appréhender la rectifiabilité d'une courbe dans un diagramme (η, λ) :

λ doit tendre vers L finie lorsque $\eta \rightarrow 0$



- ❑ Question : la notion, simple et intuitive, de rectifiabilité d'un arc est-elle universelle ? Non ! \exists des courbes dites (autrefois) pathologiques telles que : $\lim_{\eta \rightarrow 0} \lambda(p) = \infty$ ou n'est pas définie.

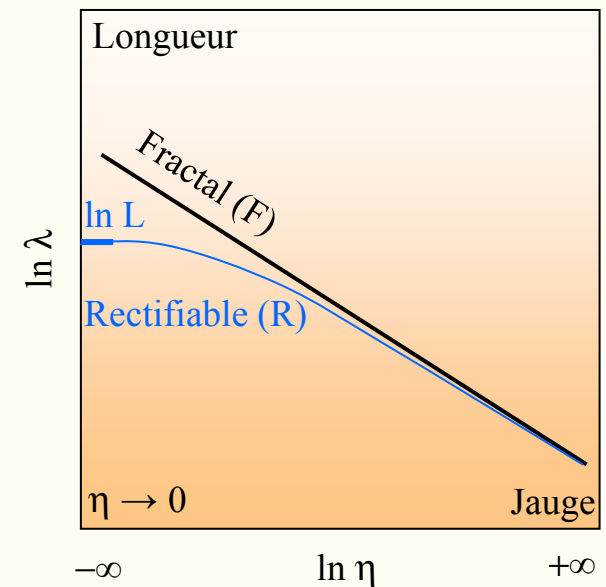
Comment les classer, les qualifier ?

- ❑ Les fonctions R & F sont a priori quelconques. On suppose juste que F n'est pas rectifiable : F ne tend vers aucune limite qd $\eta \rightarrow 0$.
- ❑ Mais, si on suppose que F est une droite de pente $1-\Delta$ (hyp. heuristique), alors :

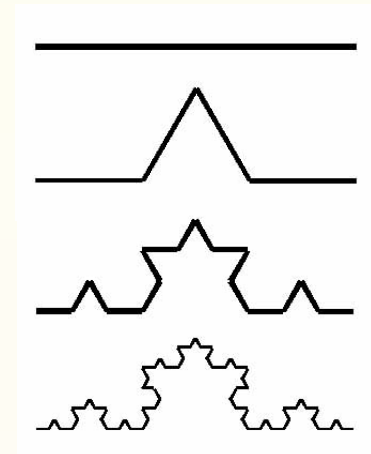
$$\lambda(p) \propto [\eta(p)]^{1-\Delta} \quad \text{d'où : } N(p) \propto [\eta(p)]^{-\Delta}$$

ou encore : $N(p) \cdot [\eta(p)]^\Delta = \ell_0^\Delta$ où ℓ_0 est une longueur caractéristique

- ❑ Le nombre $\Delta = \frac{\ln N}{\ln(1/\eta)}$ est appelé **dimension fractale**.



- $\Delta = 1 \rightarrow$ mesure d'un segment de longueur l_0
- $\Delta = 2 \rightarrow$ mesure (pavage) d'un carré de côté l_0
- $1 < \Delta < 2 \rightarrow$ dimension fractale : mesure la capacité d'une courbe à «remplir» une surface ; plus Δ est grand, plus le recouvrement est dense
- Ex. : construction d'un ensemble tel que $\Delta = \ln 4 / \ln 3$: partant d'un générateur, segment de longueur 1, on construit la courbe Γ par itération, cad des approximations de Γ à différentes échelles ($1/\eta$)
la relation impose que la jauge soit égale au tiers de l'arc à mesurer, \forall sa taille ($\eta=1/3 \forall p$ lors de l'itération)
- Etape 1 : $N = 4, \eta=1/3 \rightarrow N\eta^\Delta = 1$ ($4(1/3)^\Delta = 1$)
Etape 2 : $N = 4^2, \eta=(1/3)^2 \rightarrow N\eta^\Delta = 1$ ($16(1/9)^\Delta = 1$)
...



□ Dimension topologique

	Δ
Point	0
Courbe	1
Surface	2
Volume	3

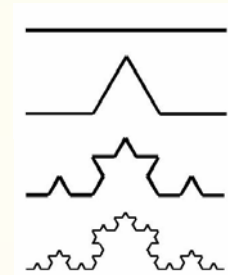
Exemples de dimensions fractales

Objet	Δ	
Cantor	0.631	ln2/ln3
Côte	1.2	
Flocon (Koch)	1.262	ln4/ln3
Triangle (Sierpinski)	1.585	ln3/ln2
Fougères	1.7	
Molécule protéine	1.7	
Tapis (Sierpinski)	1.723	ln16/ln5
Carpette (Sierpinski)	1.893	ln8/ln3
Courbe de Peano	2	Pas fractale
Courbe de Hilbert	2	Pas fractale
Papire froissé	2.5	
Fougères 3D	2.5	

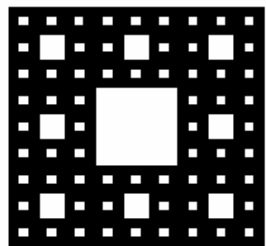
- ❑ Intérêt des structures auto-similaires
 - Construction itérative donc assez simple
 - Loi d'échelle → comportement **multibande** (voire très large bande)
 - Allongement des chemins de courant → **réduction de taille**
 - Grand nombre de paramètres de conception → «tuning», optimisation...



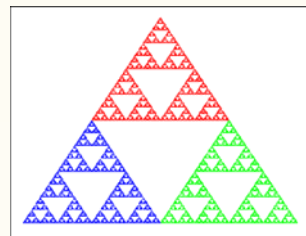
- ❑ Principales géométries utilisées en antenne (>1994)
Patches, monopôles épais, antennes filaires,...



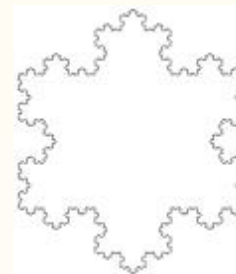
Courbe de Von Koch



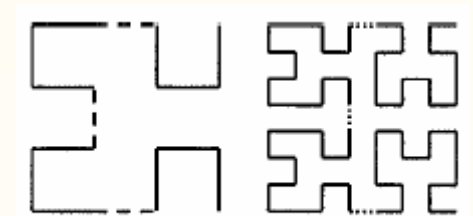
Carré de Sierpinski



Tamis (gasket) de Sierpinski



Flocon de Von Koch



Order =2

Order =3

Courbe de Hilbert

- ❑ Intérêt : obtenir une petite antenne (*low profile*)
- ❑ Exemple de design (Puente Balardía *et al*, 2000)

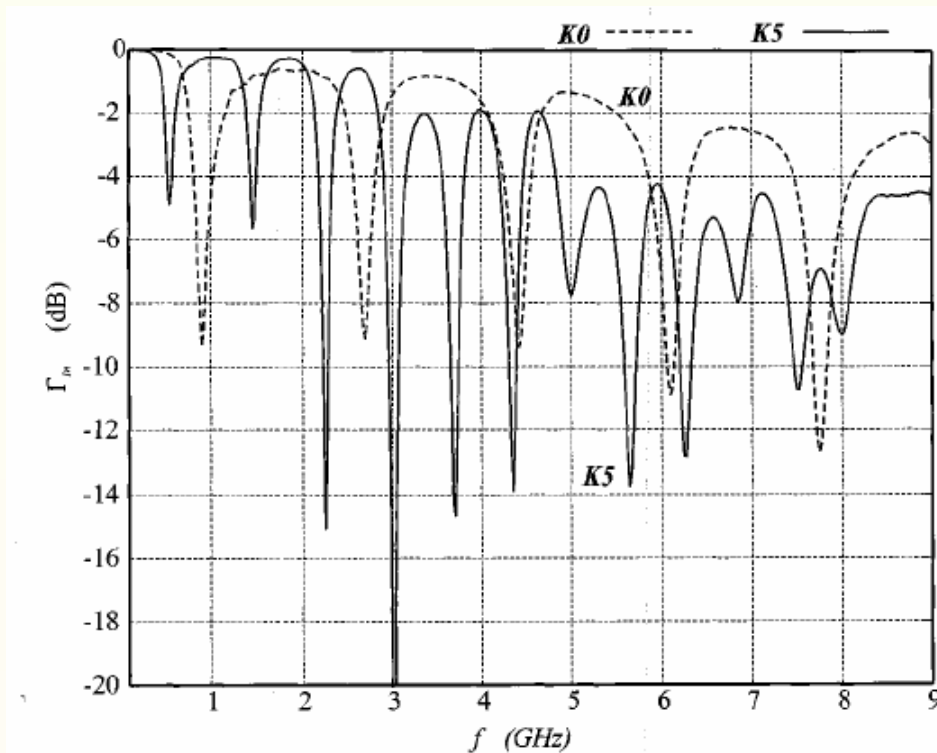


Fig. 11. Measured input return loss of the K5 and K0 antennas. The behavior of the input return loss of the K5 antenna suggests a harmonic, rather than a multiband, behavior.

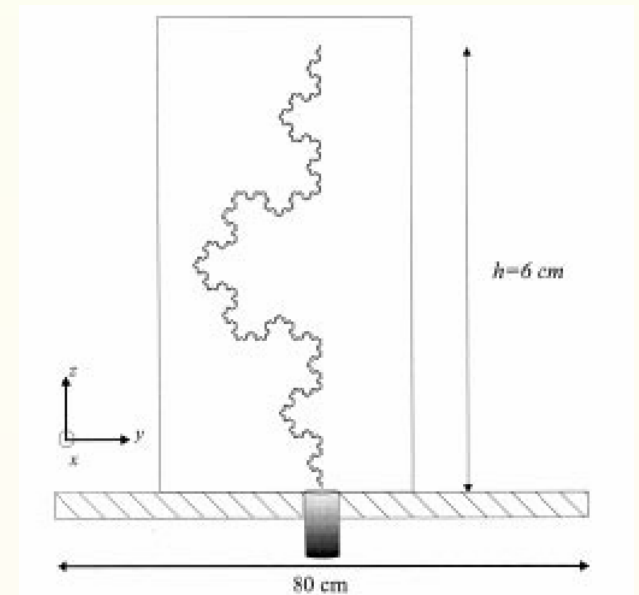
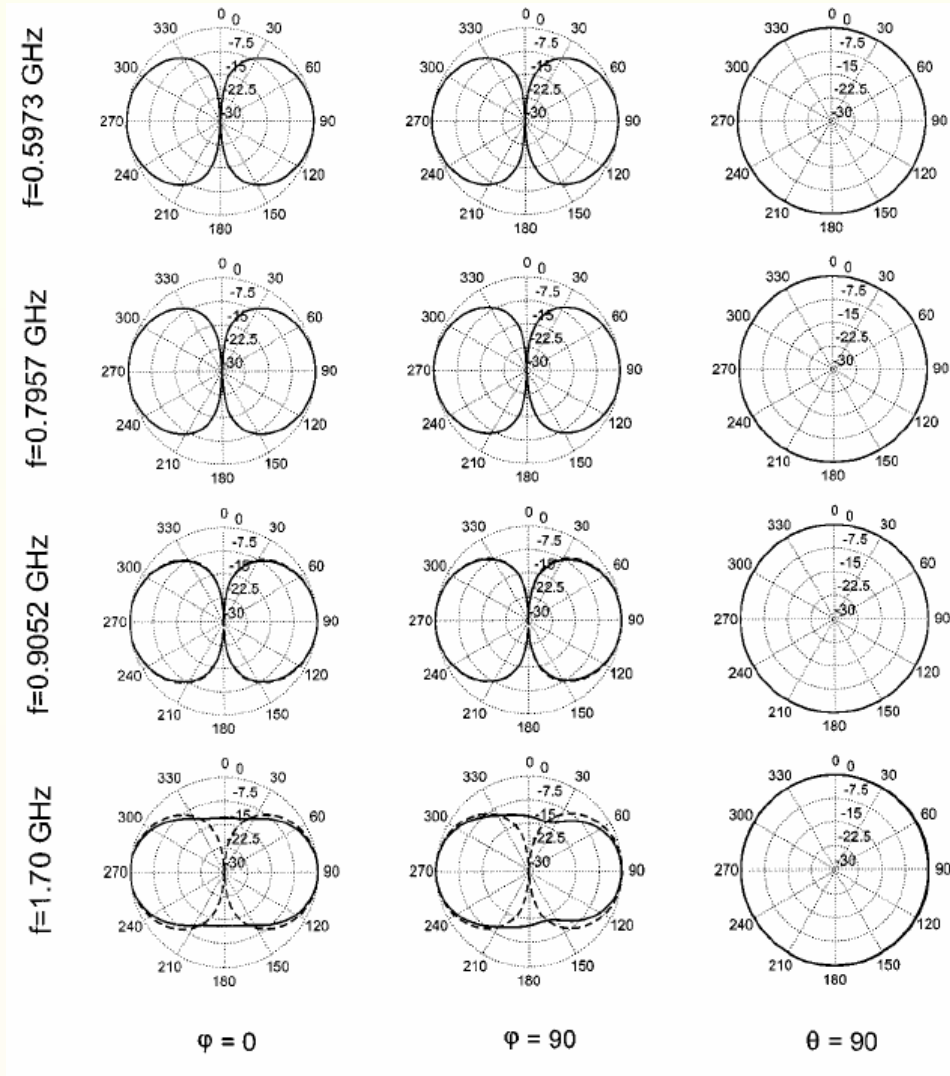


Fig. 2. Five-iteration Koch monopole over the ground plane used in the gathering of experimental data. The whole length of the element is $l = h \cdot (4/3)^5 = 25.3$ cm.

$$L_{Koch} = h (4/3)^n$$



Comportement «petite antenne»

$l \sim \lambda$: les nuls disparaissent

Effet de réduction de taille

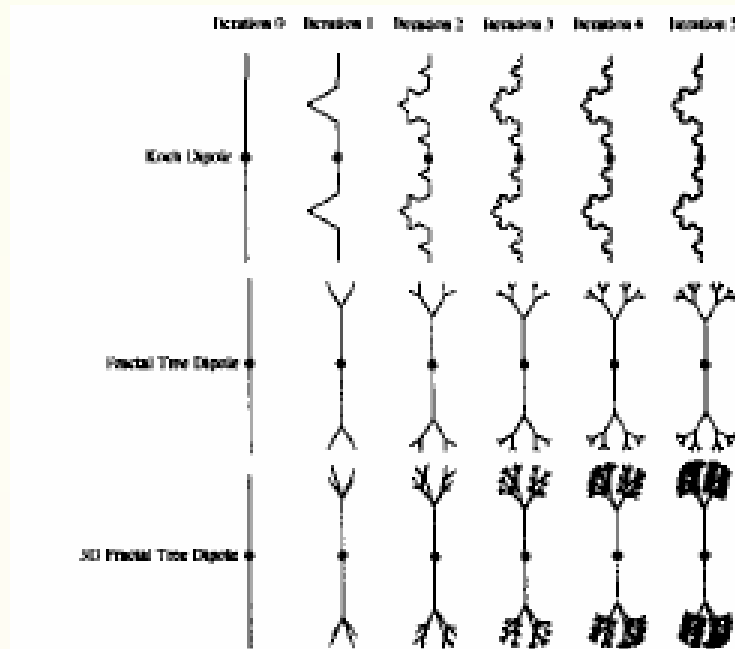


Figure 8: Various fractal dipole geometries including Koch dipoles, tree dipoles, and three dimensional tree dipoles.

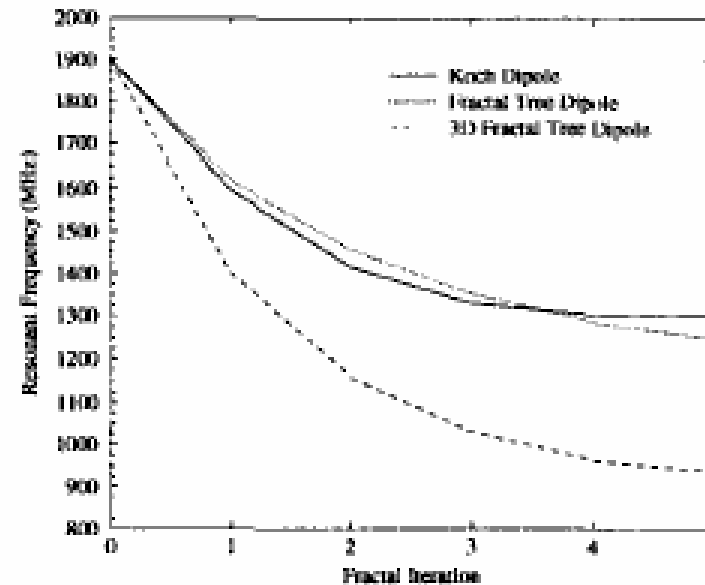


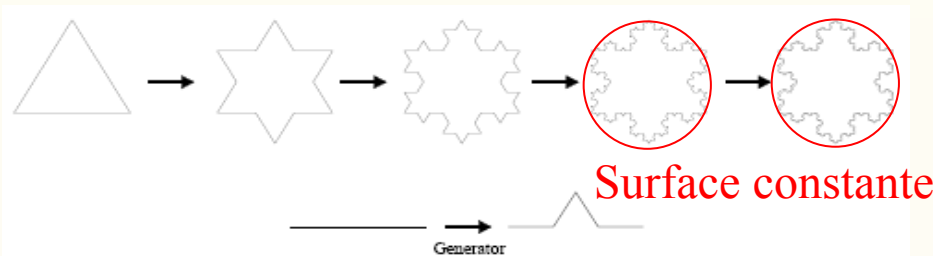
Figure 9: Resonant frequency for the first five iterations for a Koch dipole, a fractal tree dipole and a 3D fractal tree dipole antenna.

❑ Antennes boucle « classiques » : inconvénients

- Surface occupée importante, ou
- Pour les petites boucles : résistance d'entrée R_{in} très faible

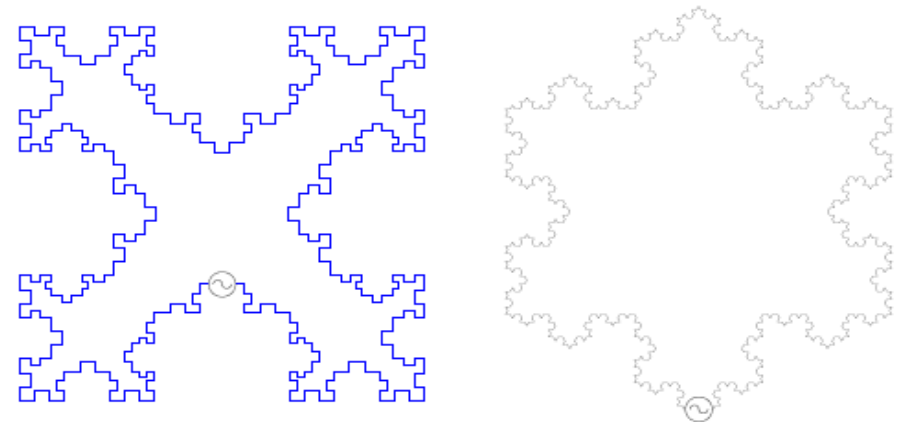
❑ Antennes boucle fractales :

- En théorie : lorsque $n \rightarrow \infty$, $p \rightarrow \infty$ avec S bornée
- \Rightarrow Permet de réduire la taille tout en maintenant des valeurs acceptables de R_{in} ($p \nearrow \Rightarrow R_{in} \nearrow$)
- Génération des fractales : Koch



$$\text{Area}_{\text{Koch loop}} = \left(1 + \frac{3}{9} + \frac{12}{81} + \frac{48}{729} + \frac{192}{6561}\right) \frac{1}{2} \frac{3\sqrt{3}}{2} r^2 = 2.05r^2$$

$$\text{Area}_{\text{Circular loop}} = \pi r^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\text{Area}_{\text{Koch loop}}}{\text{Area}_{\text{Circular loop}}} = 0.65$$



Feeding configuration for two variations of a fractal loop, a Koch fractal loop and a Minkowski fractal loop.

□ Périmètre (Koch, $n = 4$) :

$$\text{Perimeter}_{\text{Koch loop}} = 3\sqrt{3}r \left(\frac{4}{3}\right)^n \Rightarrow \text{Perimeter}_{\text{Koch loop}} = 16.42r$$

$$\text{Perimeter}_{\text{Circular loop}} = 2\pi r \Rightarrow \frac{\text{Perimeter}_{\text{Koch loop}}}{\text{Perimeter}_{\text{Circular loop}}} = 2.614$$

□ Résistance d'entrée :

Simu. boucle : $R_{in} = 1.17 \Omega$ pour $p = 0.26 \lambda$

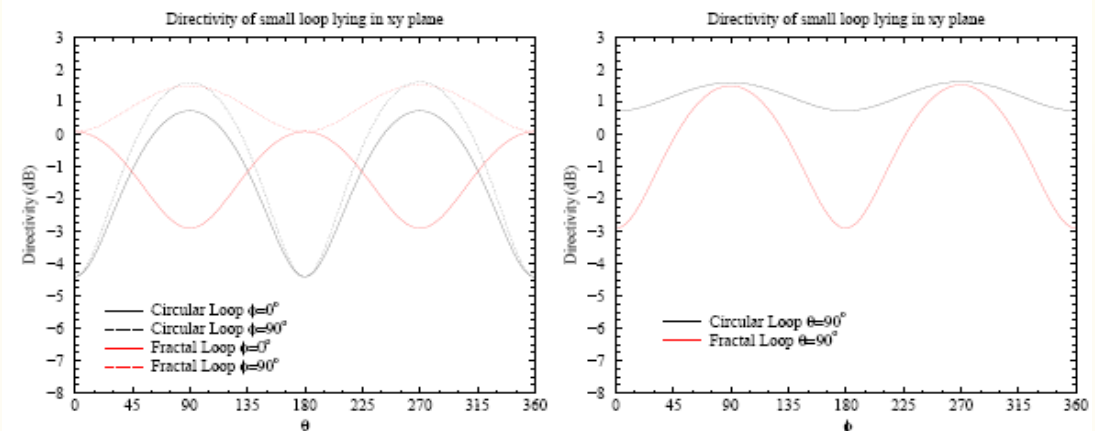
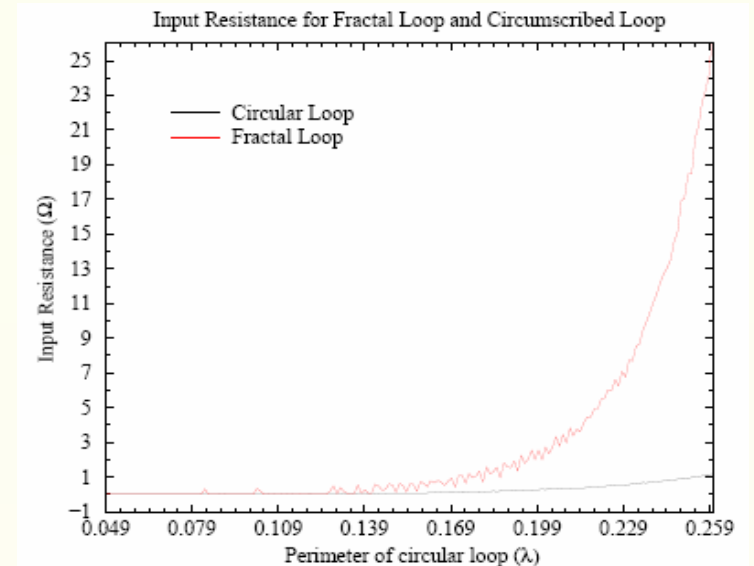
$$R_r \simeq 31,171 \left(\frac{S^2}{\lambda^4}\right) = 0.9\Omega$$

Simu. Koch : $R_{in} = 26.7 \Omega$ pour $p = 0.26 \lambda$

□ Directivité :

Simu. boucle : $D = 1.63 \text{ dBi}$

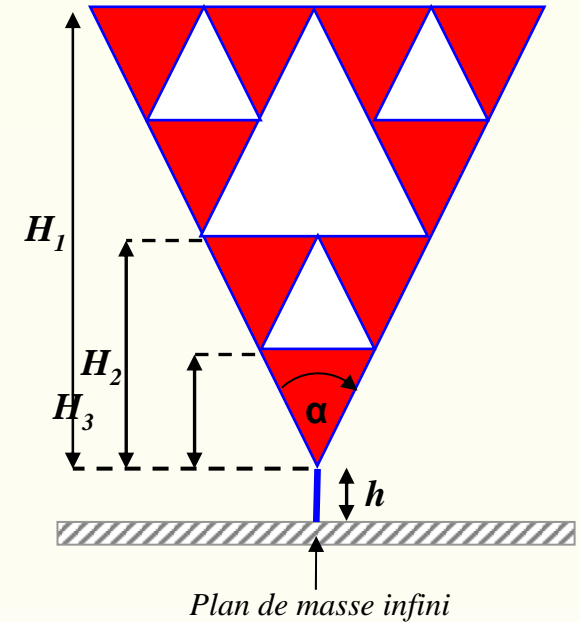
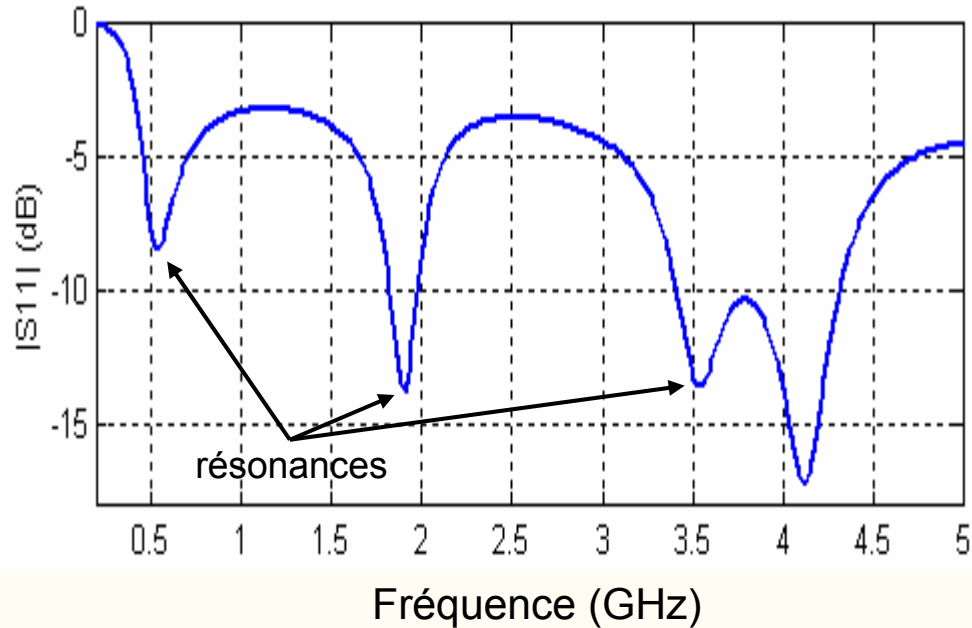
Simu. Koch : $D = 1.53 \text{ dBi}$



Simulated far field patterns for loop antennas lying in xy plane. a)

xz and yz cuts b) xy cut.

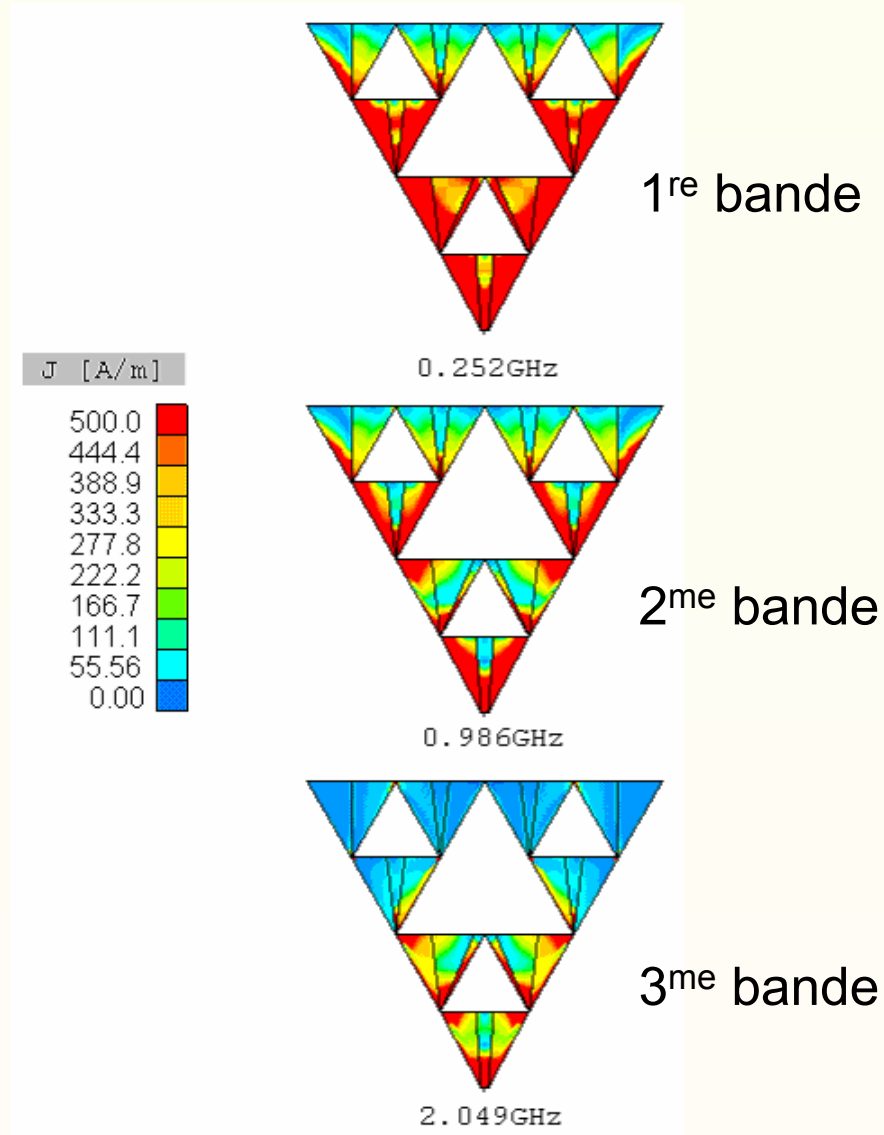
Auto-similarité : comportement multibande



H_1 : Hauteur totale de l'antenne
 c : Vitesse de la lumière dans le vide
 $\delta = H_1 / H_2$: Facteur d'échelle
 χ : Constante dépendant du substrat utilisé

Fréquences de résonance

$$f_n = \frac{\chi \times c}{H_1} \delta^n \quad , \text{ pour } n \geq 2$$



Origine du comportement multi-bande :

Auto-similarité



Zones actives

□ Méthode

- Troncature → multi-bande
- Solution ULB : superposer plusieurs suites décalées de résonances → couplage de plusieurs éléments rayonnants

□ Exemple (C. T. P. Song *et al*, 1999) : BW ratio = 20:1

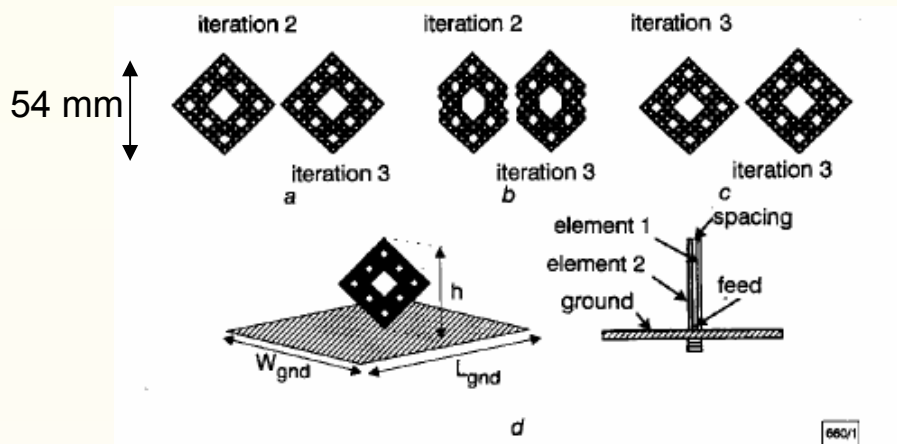


Fig. 1 Antenna configuration of proposed wideband fractal stack monopoles

Constituent elements of antennas:

- a Antenna 1
- b Antenna 2
- c Antenna 3
- d Mounting configuration of all antennas

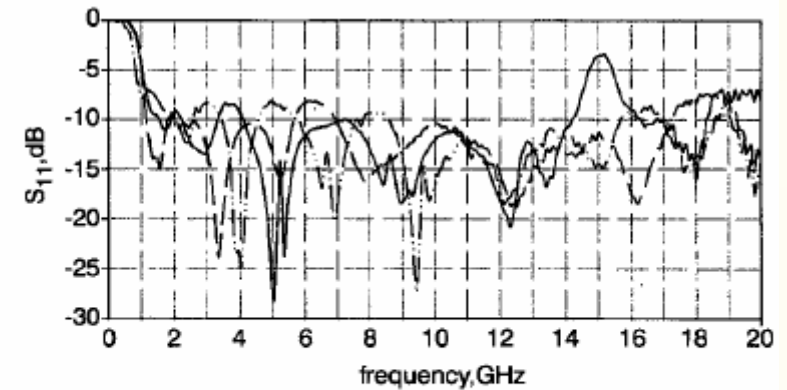


Fig. 2 S_{11} performance of three-stack monopole

- antenna 1
- - - antenna 2
- · - antenna 3

□ Gain & diagrammes

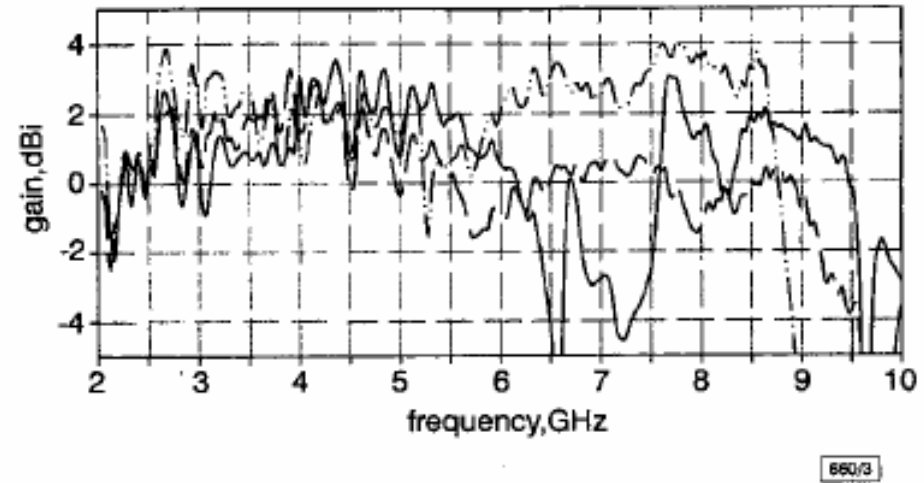


Fig. 3 Gain of antennas 1-3 at 45° elevation

— antenna 1
 - - - antenna 2
 - · - antenna 3

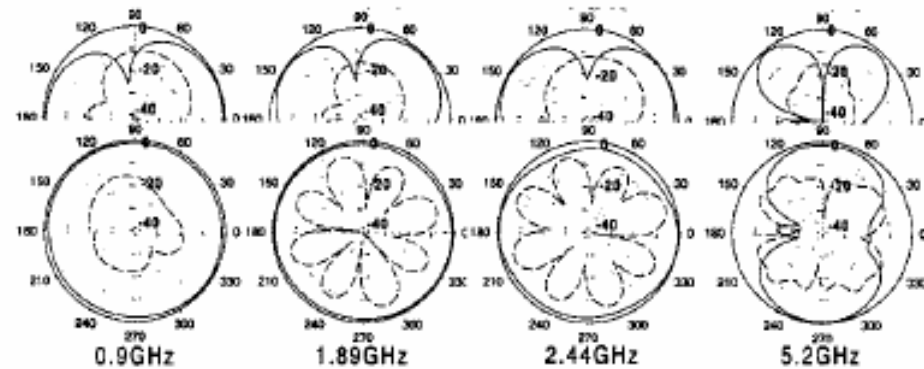


Fig. 4 Polarisation plots of Sierpinski stack antenna: antenna 1 (square Sierpinski)

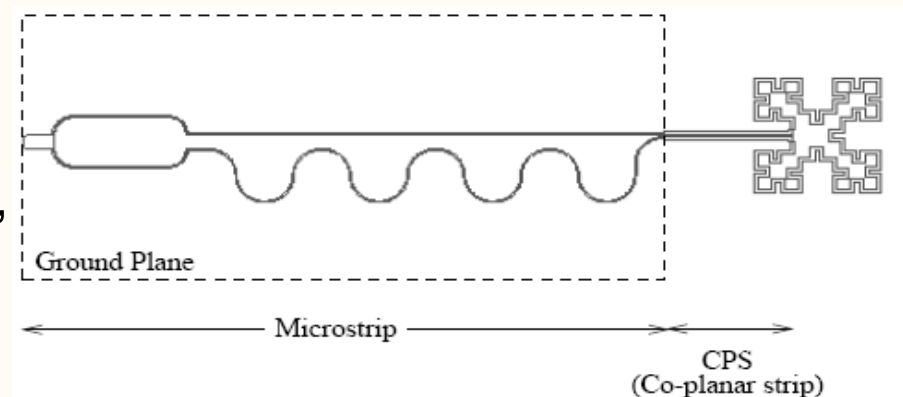
— co-polarisation
 - - - cross-polarisation

□ Géométries déterministes

- Pré-conception (dimensionnement) dans le vide ; Ex. : antennes filaires
- MAIS : fabrication délicate
- ⇒ Réalisation sur substrat : photolithogravure/micro-électronique
- ⇒ correction nécessaire : $v_{eff} < c : \lambda_{eff} \sim \lambda / [(1 + \epsilon_r) / 2]^{1/2}$

□ Antennes référencées versus équilibrées

- Référencées : 1. Plan de masse nécessaire (assez grand en général),
2. Difficultés de montage de la partie rayonnante (techno. « hybride »)
- Équilibrées : 1. Symétriseur nécessaire,
2. Techno. planaire « monolithique »



- ❑ Géométries aléatoires (Rmili *et al* (IETR, Rennes), EuCAP 2006, Nice)
 - Ex. : arbre fractal 2D ou 3D
 - Fabrication par dépôt électrochimique

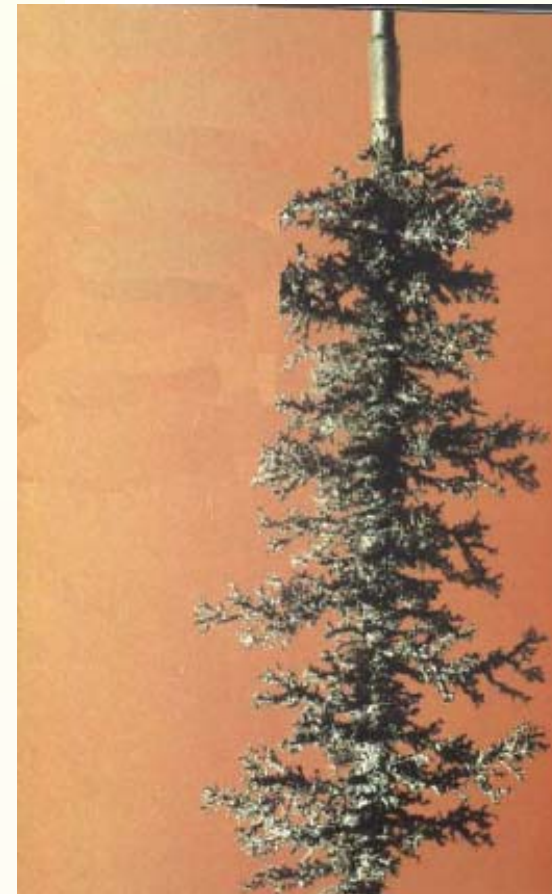
2D-Deposit



Copper sulfate electrochemical deposition
viewed through a microscope

<http://www.physionet.org>

3D- Deposit



□ Applications

- Elargissement de bande : communications large bande, Radar, etc.
- Comportement multi-bande : GSM, DCS, PCS, UMTS, WiFi (IEEE802.11), HYPERLAN, ISM...

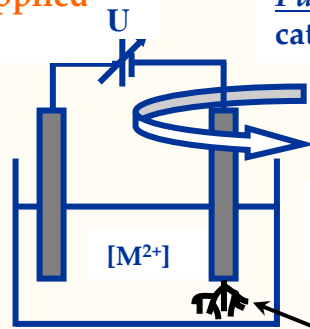
□ Procédé de fabrication

- Paramètres 1 & 2 : nature du dépôt
- Paramètres 3, 4 & 5 : contrôle la reproductibilité

Parameter 2: Concentration of metallic ion, $[M^{2+}]$

Parameter 3: Duration of deposition, t

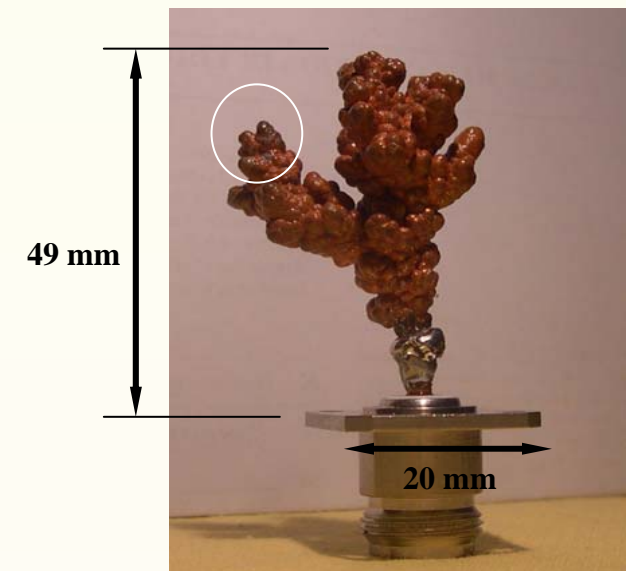
Parameter 1: Applied Voltage, U (V)



Parameter 4: Speed of the cathode rotation, $V(\text{rad/s})$

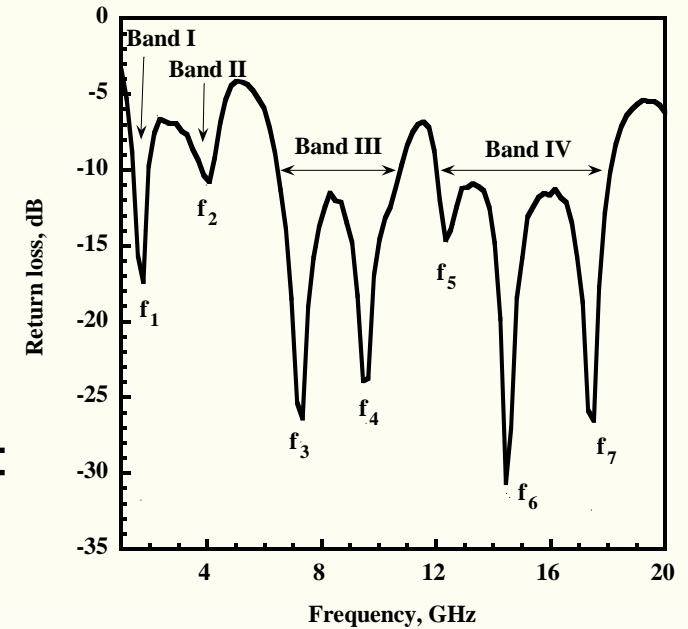
Parameter 5: Solution Temperature, T (°C)

Fractal or dendrite deposit



□ Résultats :

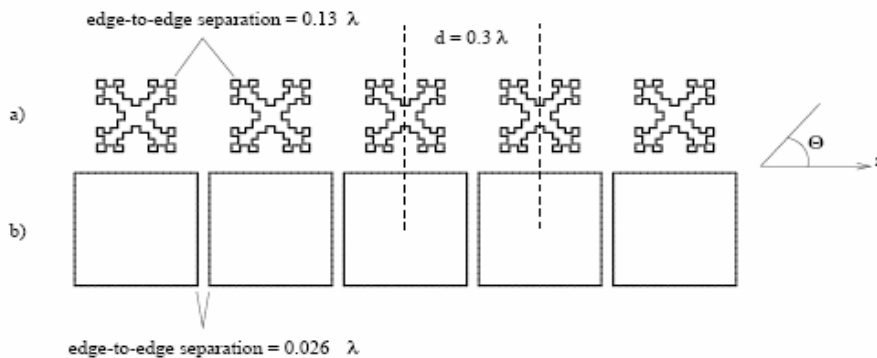
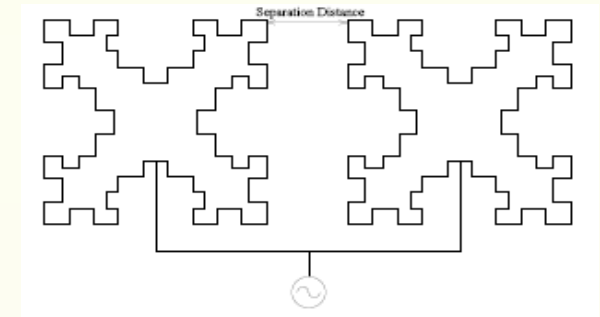
- $S_{11} : \langle L_n \rangle \sim \lambda_n/4 ;$
- Arbre fractal \Leftrightarrow ensemble de dipôles indépendants aléatoirement distribués
- L'observation du S_{11} montre une relation entre les comportements auto-similaire et multi-bande :
 $(\lambda_n/4)/(\lambda_{n+1}/4) \approx (\langle L_n \rangle / \langle L_{n+1} \rangle) \approx 2.0$



Band n°	I	II	III		IV		
Resonant freq, f_i (GHz)	1.57	3.73	7.04	9.55	11.94	14.56	17.41
Center frequency of the band, F_n (GHz)	1.75	3.96	8		15.8		
Associated $\lambda_n/4$ (mm)	42.85	18.93	9.37		4.74		
Bandwidth, BW_n (VSWR < 2)	1.4-1.85 GHz (25 %)	3.6-4.28 GHz (17 %)	6.5-10.6 GHz (51 %)		12.3-18.2 GHz (37 %)		
$(\lambda_n/4)/(\lambda_{n+1}/4)$	2.26	2.02	1.97		-		

□ Antennes à balayage :

- Éléments de taille réduite \Rightarrow
- Réduction du couplage mutuel
- Permet de rapprocher les éléments
- \Rightarrow Augmentation de la couverture angulaire



Relative geometry for the two arrays using a) Minkowski square loop elements, and b) using standard square loop elements. The space between the elements is increased for the array with fractal elements.

Specifications used in the design of arrays showing reduced mutual coupling with fractal elements.

	Spacing	Edge-to-Edge	Progressive Phase (rad)
Square Loop	0.3λ	0.026λ	1.632
Minkowski Fractal Loop	0.3λ	0.13λ	1.632

Matériaux BIP

- ❑ Qu'est-ce qu'un BIP ?
- ❑ Structure/matériau (artificiel) à Bande Interdite Photonique (*PBG*)
- ❑ Structures périodiques dans lesquelles la propagation des ondes est interdite pour certaines bandes de fréquence
- ❑ Origine physique : interférences des ondes
- ❑ Origines historiques : analogie avec les réseaux cristallins (périodiques) → utilisation des techniques de la physique du solide
- ❑ Champs d'application :
 - Antennes
 - Circuits : filtres, coupleurs
 - Les guides d'ondes (creux ou lignes)
 - Les « réflecteurs » : radomes, filtres spatiaux, plans de masse artificiels, etc.

- ❑ Réflecteurs optiques
- ❑ 99.5 % de l'énergie réfléchi (incidence normale)
- ❑ Bien meilleur que les réflecteurs métalliques aux fréquences optiques

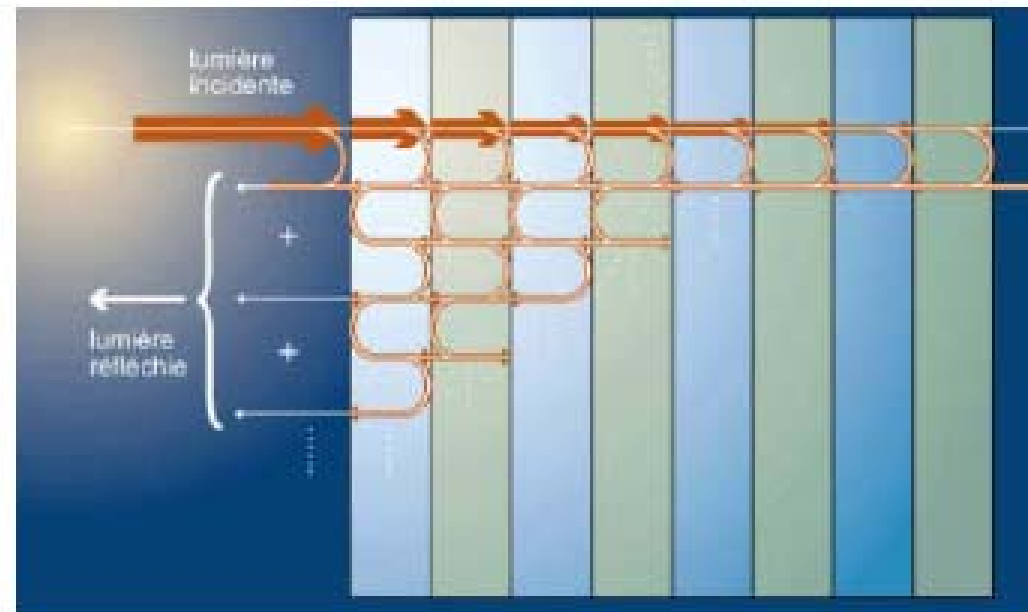


Figure I-1 : Miroir de Bragg

1963 Diélectriques artificiels, A.F. Harvey.

1987 Structures à BIP, E. Yablonovitch.

1989 Première réalisation d'une structure à BIP, E. Yablonovitch.

1993 Premières utilisations pour les antennes, E.R. Brown.

1996 Réalisation d'une structure à BIP reproduisant la structure du diamant, E. Yablonovitch.

1998 Premières utilisations pour des filtres, V. Radisic, T. Itoh.

1999 Premières utilisations avec des composants actifs, IEMN de Lille, IEF d'Orsay.

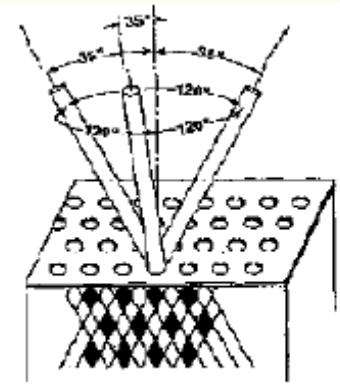


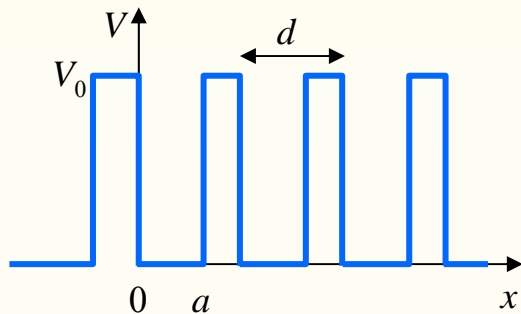
Figure I-2 : Yablonovite

Bloc de plexiglas
Structure diamant

- ❑ Analogie des équations d'ondes électromagnétiques avec celles des fonctions d'ondes en physique du solide
- ❑ Equations d'ondes avec un paramètre (permittivité) spatialement périodique → théorème de Floquet (ou de Bloch) :

Schroedinger

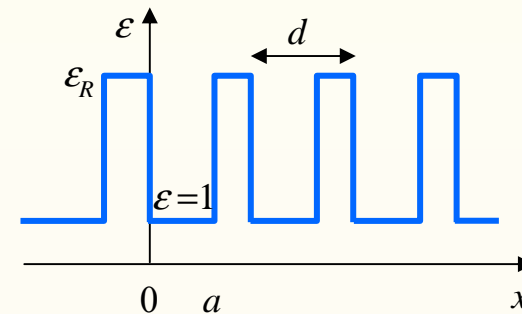
$$\Delta\psi(\mathbf{r}) + \frac{2m_n}{\hbar^2} [E - V(\mathbf{r})]\psi(\mathbf{r}) = 0$$



Bandes d'énergie interdites

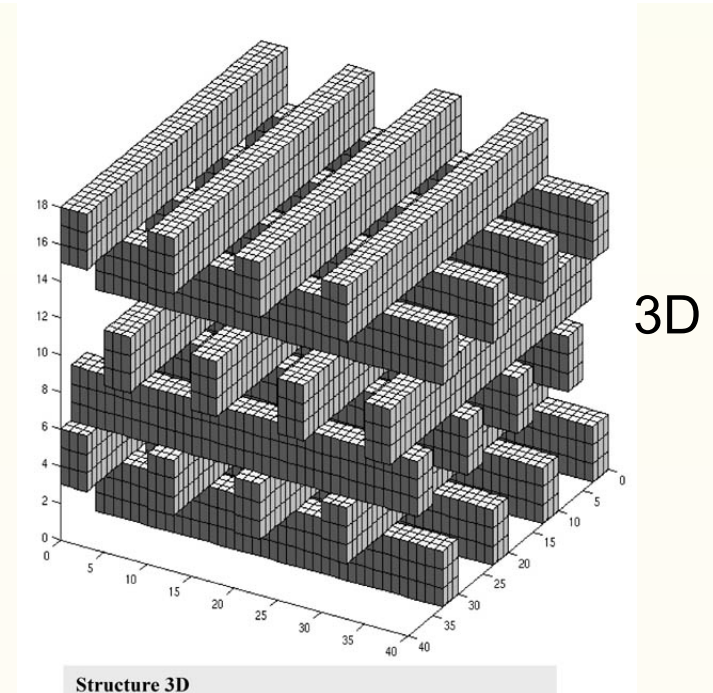
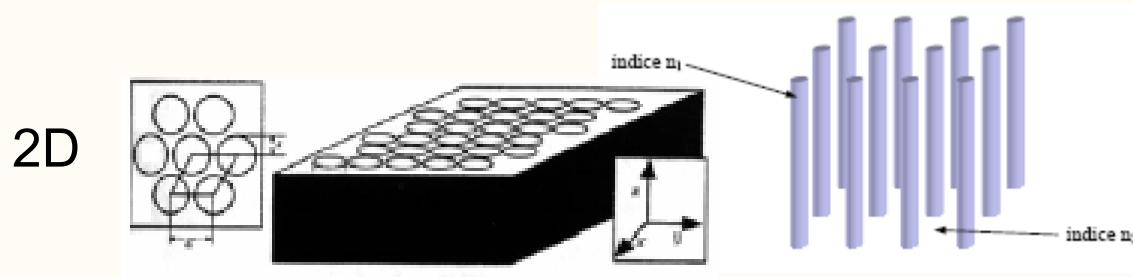
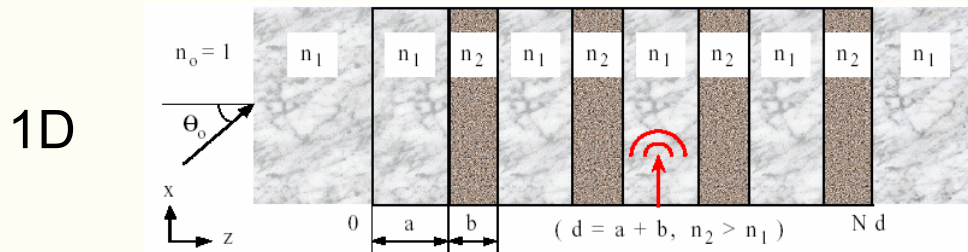
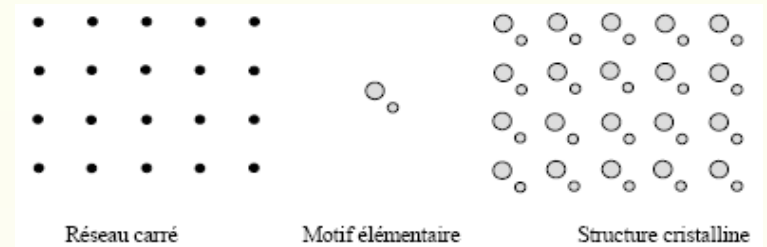
Maxwell

$$\Delta E(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}) = 0$$



Bandes de fréquences interdites

- ❑ BIP diélectriques ou métalliques
- ❑ Périodicité dans une ou plusieurs directions : Structures 1D, 2D ou 3D
- ❑ Changement abrupt de ε
- ❑ Motifs élémentaires : fils, rubans, disques, cylindres, poutres, sphères...



- Bande interdite possible pour tous les angles d'incidence
- Mais aussi : filtrage non seulement fréquentiel mais également spatial
- Faible coût, facilité de fabrication
- Facilité d'intégration
- Utilisable pour de nombreuses fonctions ; optimisation des fonctions grâce aux paramètres de conception supplémentaires
- Miniaturisation de certaines fonctions
- Facilement transposable en fréquence par loi d'échelle

- ❑ Substrats BIP (amélioration des performances)
 - Réduction des lobes secondaire (notamment par onde de surface)
 - Augmentation du gain, voire « super-directivité »
- ❑ Radomes : fenêtres fréquentielle et/ou angulaire
- ❑ BIP 2D ou 3D : nouvelles antennes...
- ❑ Antennes actives « adaptables »
 - A commande électronique : balayage
 - Accordables en fréquence

- ❑ Le type de **motif** et ses **dimensions** fixent la **fréquence centrale**
- ❑ La **période** spatiale fixe la largeur de la **bande interdite**
- ❑ Introduction de **défauts** dans le réseau : taille du motif, ϵ , espacement, défaut par vacuité, etc.
 - → création d'une **bande permise** dans la BI
 - → action sur les directions de rayonnement

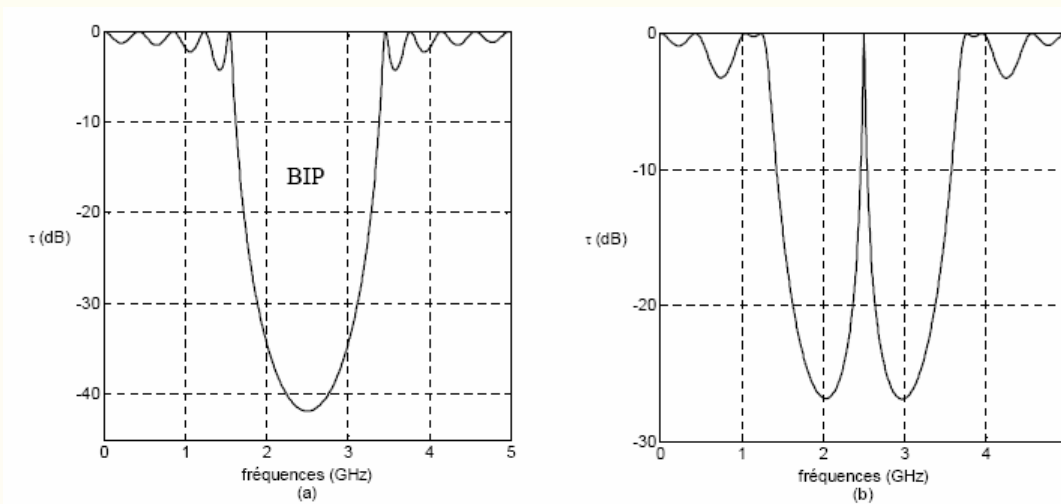
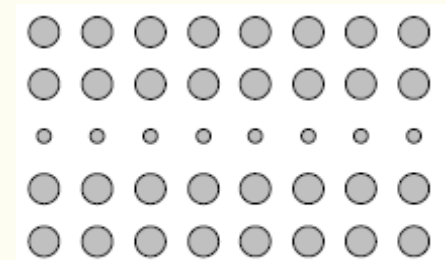


Figure II-22 : Coefficients de transmission d'une structure BIP 1D avec (b) et sans (a) défaut.



II-24 : Défaut de dimension du motif élémentaire

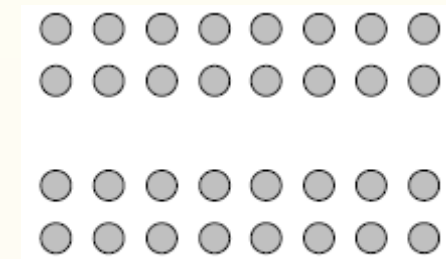
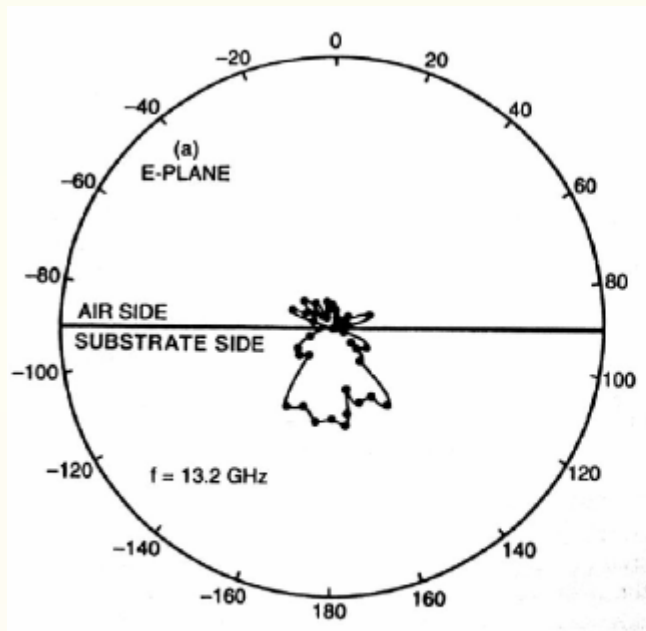
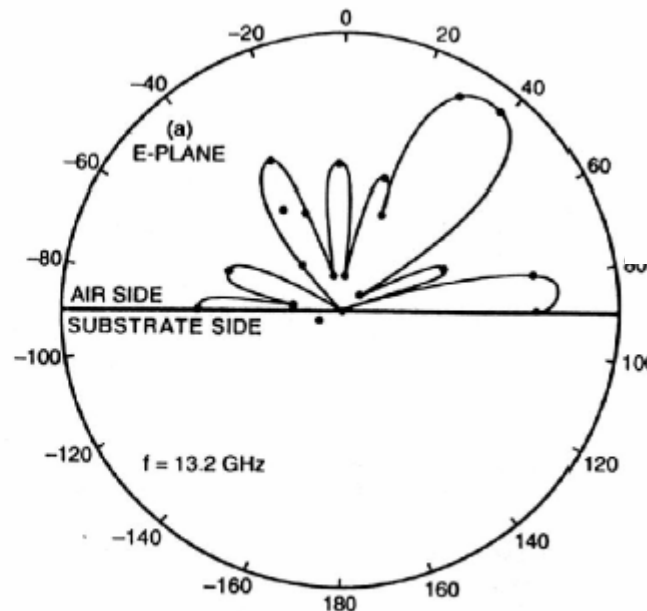


Figure II-27 : Défaut par vacuité

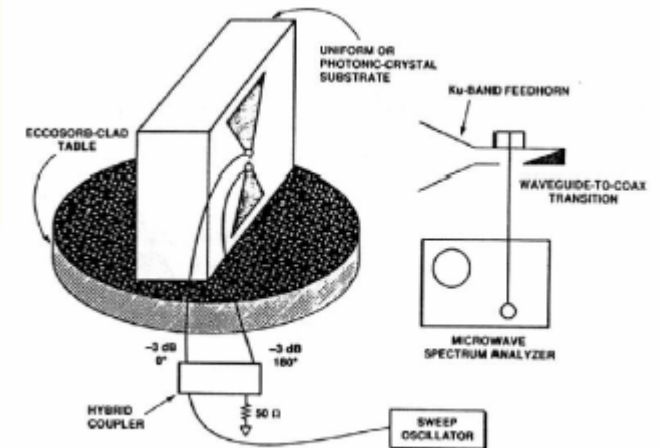
Elimination des ondes de surface → réduction des lobes secondaires



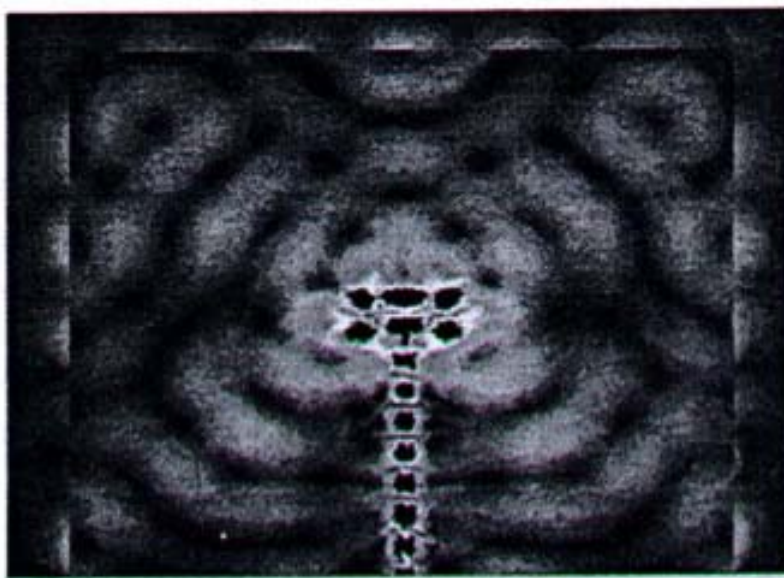
Substrat classique



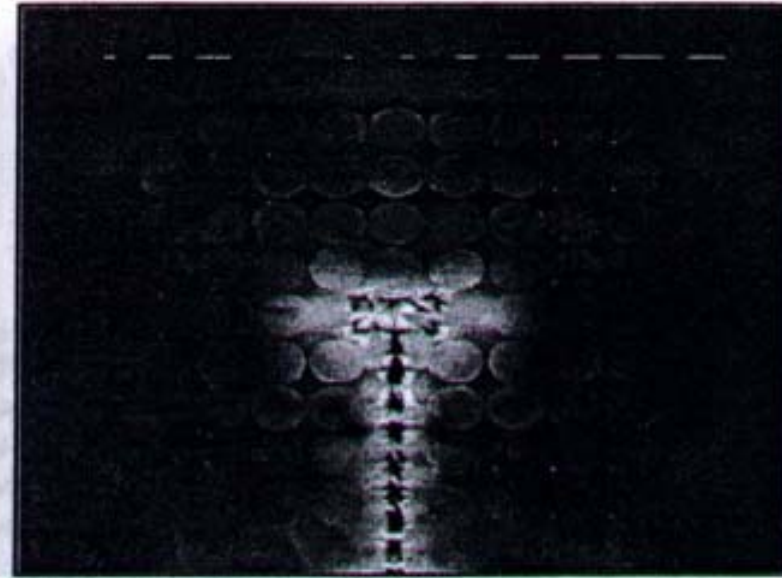
Substrat photonique



Elimination des ondes de surface \rightarrow réduction des lobes secondaires



Substrat classique



Substrat photonique

- Principe
 - BIP à défaut
 - Symétrie \Rightarrow Introduction d'un plan de masse
 - Suppression des lobes arrière et latéraux

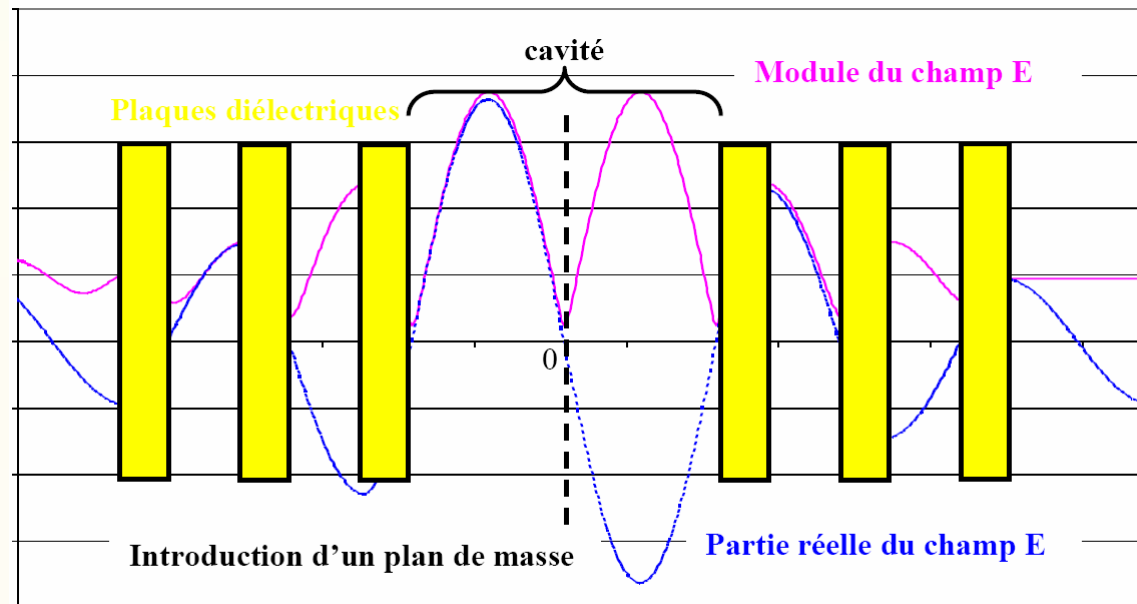


Figure I.15 : Allure du champ dans une structure BIP à défaut

- ❑ Excitation du BIP par un patch
- ❑ Directivité ↗ : 6 dBi → 30 dBi (max)
- ❑ Mais $G = 30$ dBi rarement atteint
- ❑ En millimétrique principalement
- ❑ Bande très étroite ($\sim 1\%$)

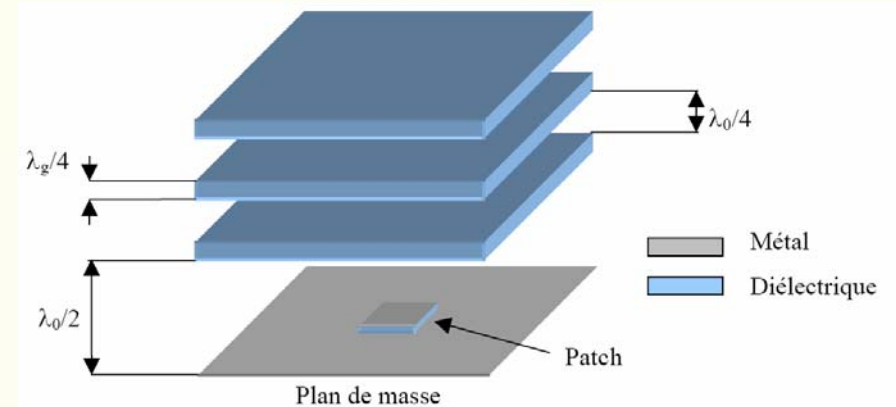
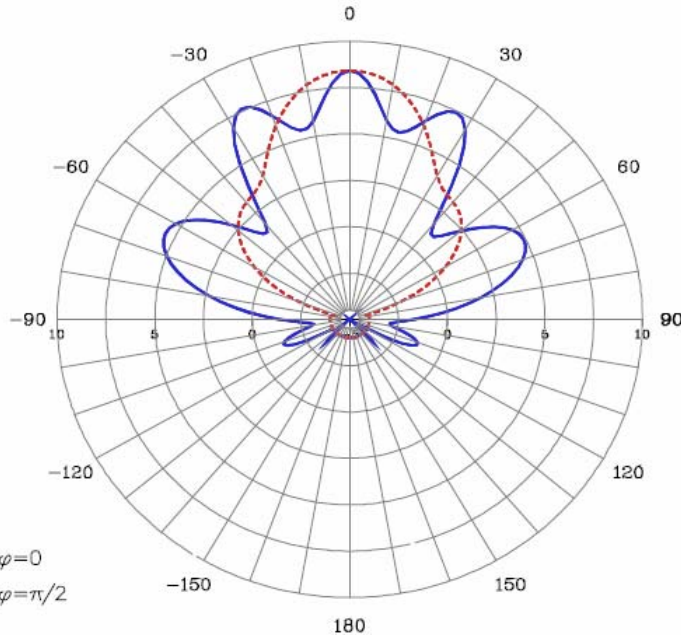
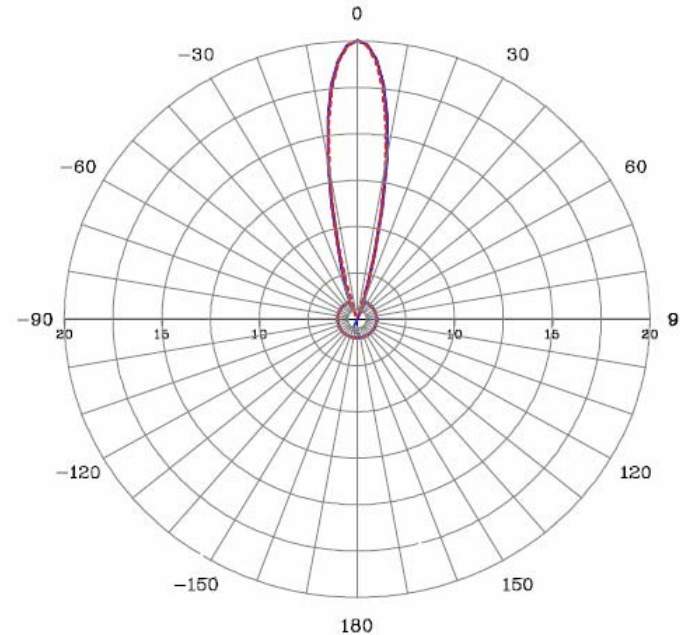


Figure I.16 : Structure de base d'une antenne BIP planaire à air

sans
BIP

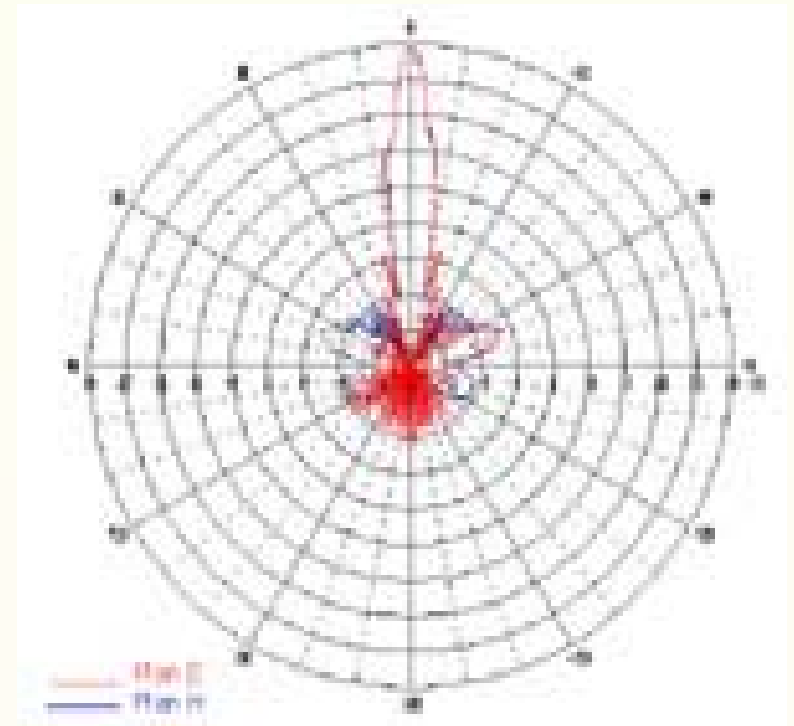
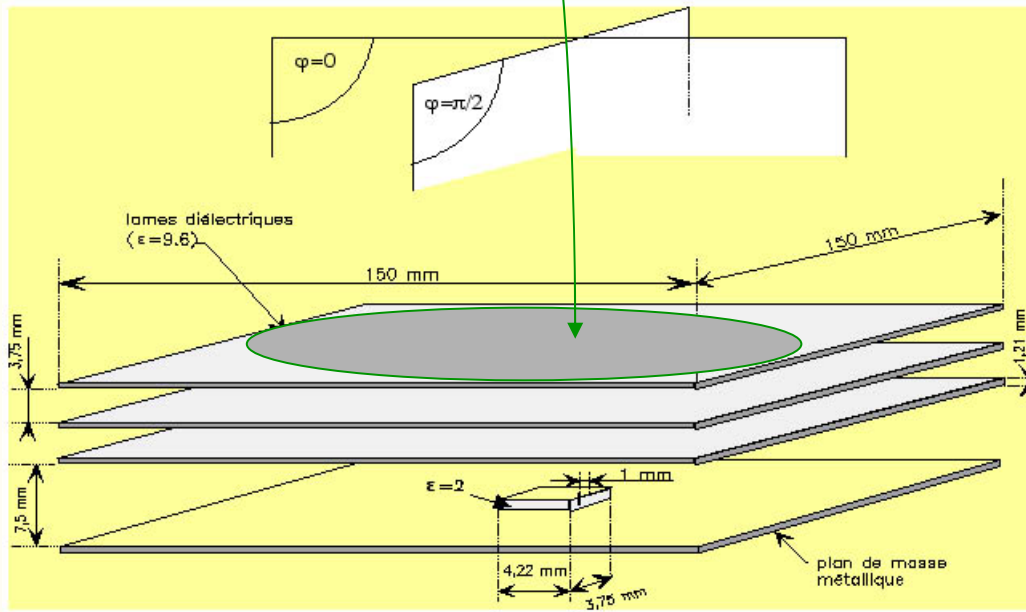


avec
BIP



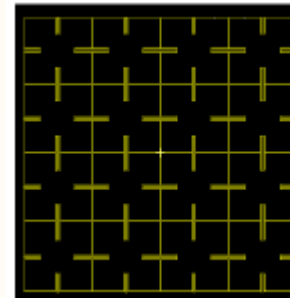
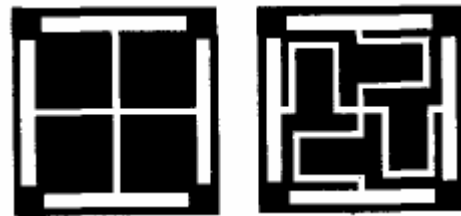
Obtention d'un grand gain avec une antenne patch (jusqu'à 30 dBi)

$$G \cong 10 \log \left(\frac{4\pi S}{\lambda^2} \right)$$

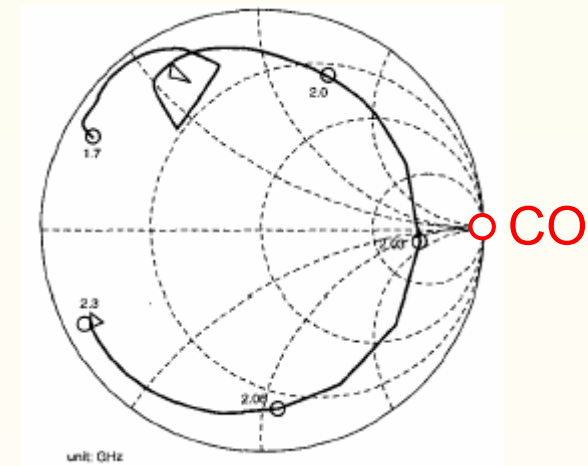
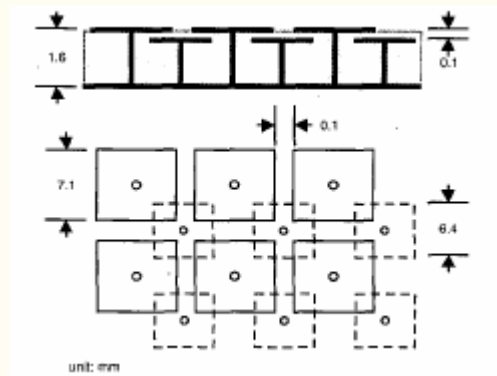
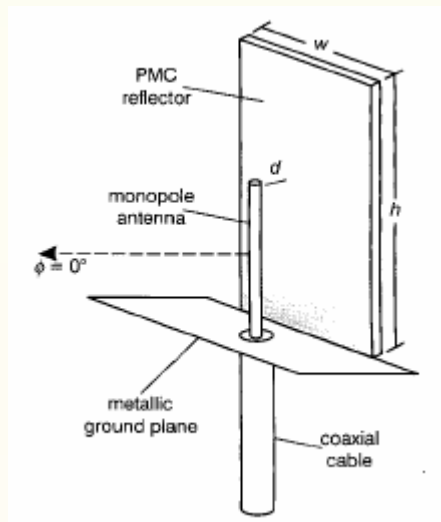


IRCOM (Limoges)

- ❑ Classe particulière de BIP
- ❑ Structures à forte impédance développées pour améliorer les performances des circuits passifs & actifs et de certaines antennes sans modifier les processus de fabrication
- ❑ Fondés sur des motifs élémentaires réalisant un pavage LC à fort couplage
- ❑ Utilisable comme plan de masse pour les lignes planaires (et les fonctions associées – filtres, coupleurs, jonctions, coudes...) et les guides d'onde.



- ❑ Les HIS : un cas particulier de BIP-UC
- ❑ Le BIP-UC doit être associé à un vrai plan de masse pour présenter le comportement HIS
- ❑ Exemple : utilisation comme réflecteur magnétique



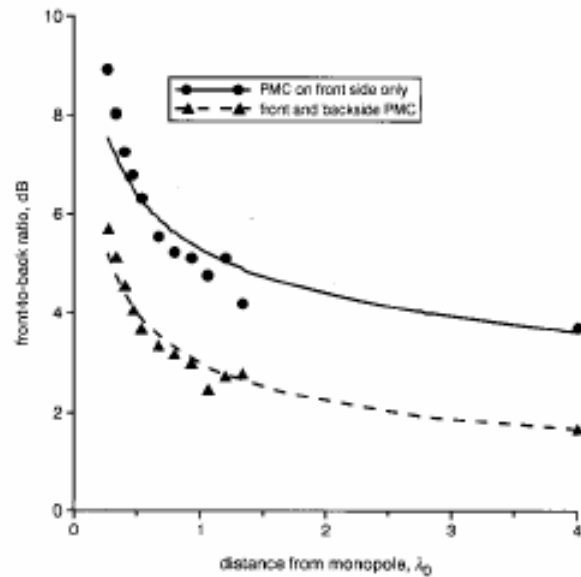


Fig. 2 FBR calculated from HFSS simulations at different positions away from transmitting antenna

Court-circuit

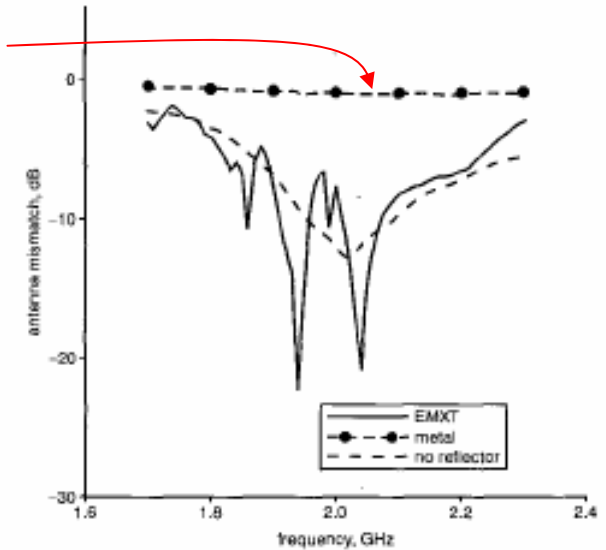


Fig. 4 Measured antenna return loss with different types of reflectors

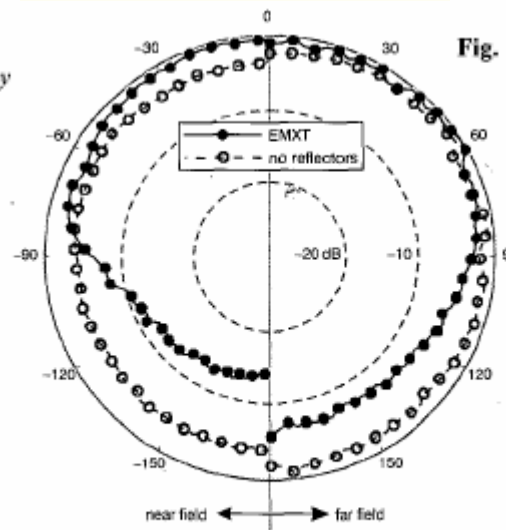


Fig. 5 Co-polarised H-plane pattern measured at 0.25 and $13\lambda_0$ away from monopole at 2 GHz