

**INSTITUT D'ÉLECTRONIQUE ET
DE TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE RENNES**



**Matériaux transparents
et conducteurs,
Matériaux composites et
Oxydes ferroélectriques :
des matériaux innovants
pour
de nouvelles applications
en hyperfréquences**

Xavier CASTEL



UNIVERSITÉ DE NANTES

UNIVERSITÉ DE
RENNES I



2002



2004



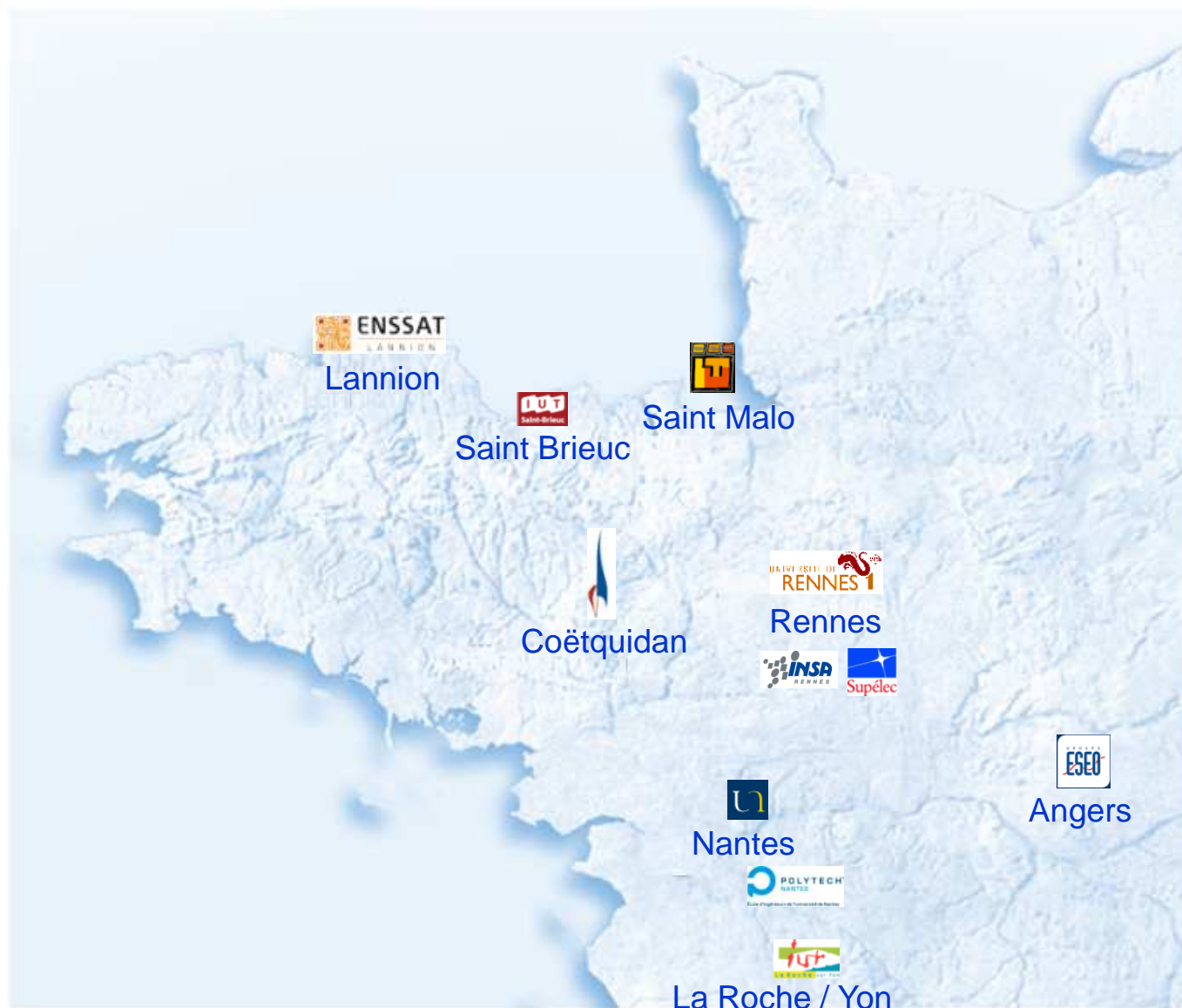
2007



2012



2013



Antennes et dispositifs hyper fréquences

Matériaux fonctionnels > Université Rennes 1
> Université de Nantes
> CNRS

Systèmes rayonnants complexes > Université Rennes 1
> Université de Nantes
> INSA Rennes
> CNRS

5 Départements
10 Equipes de Recherche

IETR : 365 personnes (2014)

Communications

Systèmes de communications numériques > Université de Nantes
> INSA Rennes
> CNRS

Signal, communications et électronique embarquée > Supélec campus de Rennes

Recherche domaine Matériaux : 46

- Chercheurs et E-C : 24
- Biats : 4
- Doctorants et Post-docs : 18

Image et automatique

Image > INSA Rennes
> Université de Nantes

Automatique des systèmes hybrides > Supélec campus de Rennes

Microélectronique et microcapteurs

Dispositifs électroniques > Université Rennes 1
> CNRS

Capteurs Intégrés > Université Rennes 1

Propagation, localisation et télédétection

Propagation, localisation > Université Rennes 1
> Université de Nantes
> INSA Rennes
> CNRS

Télédétection > Université Rennes 1
> Université de Nantes
> CNRS

Antennes & Dispositifs hyperfréquences

(P. Besnier – R. Sauleau)

116 personnes

**Equipe
Systèmes Rayonnants Complexes**

(R. Gillard – A. Sharaiha)

88 personnes

**Equipe
Matériaux Fonctionnels**

(X. Castel – H. Gundel)

22 personnes

**Plates-formes
(L. Le Coq)**

6 personnes

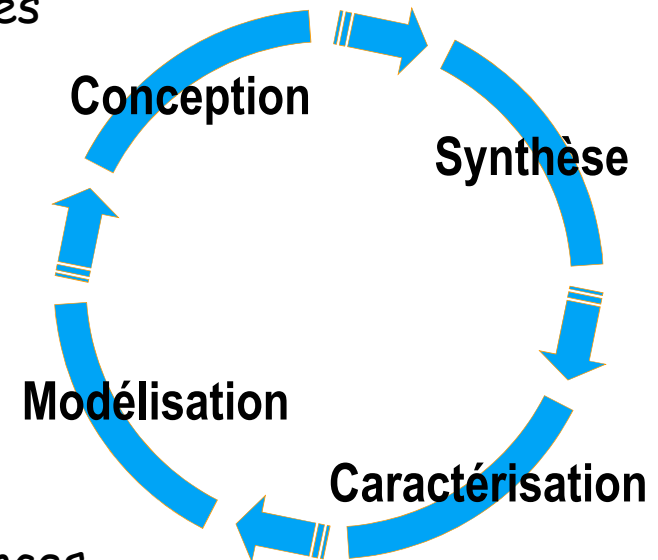
1. Interactions des ondes EM avec les environnements complexes (CEM, bioEM, ...)
2. Du millimétrique au sub-millimétrique et à l'optique
3. Minuaturisation & Reconfigurabilité
4. Surfaces multifonctionnelles (antennes transparentes, structures porteuses composites,...)
5. Procédés innovants et modélisations (synthèse, intégration, structuration 2D & 3D,...)

□ Objectifs

- Développement et étude de matériaux à propriété(s) spécifique(s) pour applications en hyperfréquences
- Modélisation (multi-échelle) de propriétés des matériaux
- Proposition de solution(s) originale(s) pour la fonctionnalisation de dispositifs électroniques
- Réalisation de démonstrateurs

□ Moyens mis en œuvre

- Compétences pluridisciplinaires :
 - Physique des Matériaux (28^{ième})
 - Chimie des matériaux (33^{ième})
 - Électronique (63^{ième})
- Collaboration étroite entre les différents chercheurs en électronique, en hyperfréquences, et en électro-optique



□ Plates-formes “Matériaux” à Saint-Brieuc et à Nantes

Matériaux transparents et conducteurs,
matériaux composites et oxydes ferroélectriques :
des matériaux innovants pour de nouvelles
applications en hyperfréquences



- ❑ Matériaux transparents et conducteurs pour vitrages communicants
- ❑ Matériaux composites pour panneaux structuraux communicants
- ❑ Oxydes ferroélectriques pour dispositifs reconfigurables

Matériaux transparents et conducteurs,
matériaux composites et oxydes ferroélectriques :
des matériaux innovants pour de nouvelles
applications en hyperfréquences



- Matériaux transparents et conducteurs pour vitrages communicants
- Matériaux composites pour panneaux structuraux communicants
- Oxydes ferroélectriques pour dispositifs reconfigurables

Antenne planaire **transparente** fonctionnant dans la bande centimétrique



↗ **conducteur** ↔ $R_{\square} = \rho/e < 10 \Omega/\square$

Antenne réalisée à partir d'un matériau
en couche mince

↘ **transparent** ↔ domaine visible



4 solutions développées :

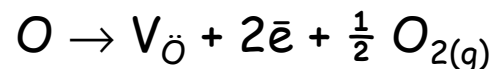
- ↘ Film ITO
- ↘ Film métallique ultramince
- ↘ Hétérostructure ITO/métal/ITO
- ↘ Film métallique maillé

□ Couches minces d'ITO

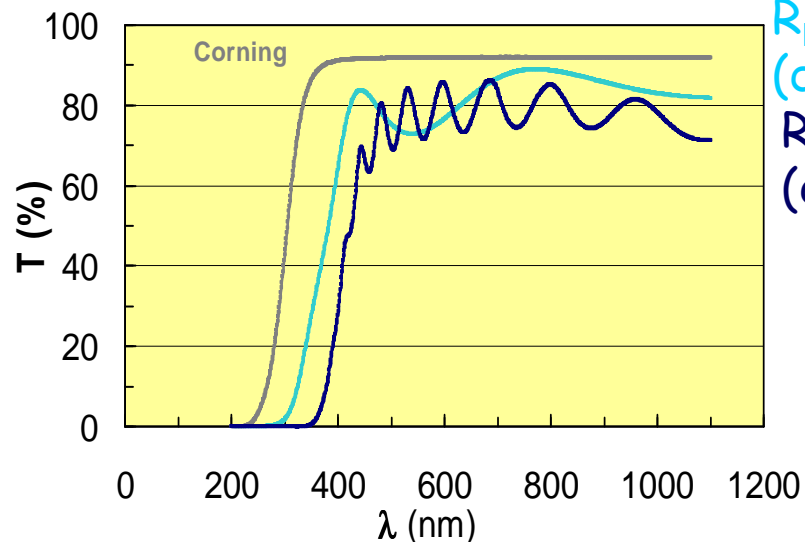
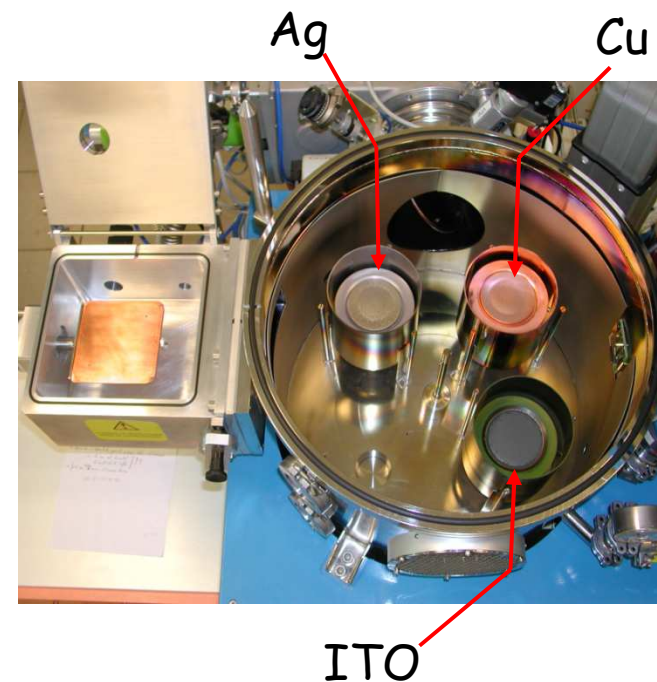
$\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$ matériau semiconducteur

↪ par dopage : Sn^{4+} en substitution à In^{3+}

↪ par création de lacunes d'oxygène : V_{O}



Dépôt par pulvérisation RF
à temp. ambiante



Dépôt sur verre Corning 1737
 $\epsilon_r = 5,7 ; \text{tg}\delta = 0,006$

↪ $\rho_{\text{ITO}} \approx 0,5 \text{ m}\Omega.\text{cm}$ ($\rho_{\text{Cu massif}} = 1,7 \mu\Omega.\text{cm} @20^\circ\text{C}$)

↪ Transparent dans le visible ($E_g \approx 3,8 \text{ eV}$)

□ Film ITO (1,01 μm)^[1]



SGM / IUT 1 cm

$R_{\square} = 8,6 \Omega/\square$

$T_{\text{max}} = 86,1\%$

□ Couche Cu ultramine (10 nm)^[1]



SGM / IUT 1 cm

$R_{\square} = 8,3 \Omega/\square$

$T_{\text{max}} = 64,3\%$

□ Multicouche ITO/Cu/ITO (183 nm)^[1]



SGM / IUT 1 cm

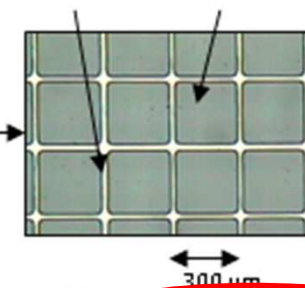
$R_{\square} = 4,7 \Omega/\square$

$T_{\text{max}} = 60,0\%$

□ Film Ag maillé (6 μm)^[2,3]



Silverstrip Glass aperture



$R_{\square} = 0,054 \Omega/\square$

$T_{\text{max}} = 81,3\%$

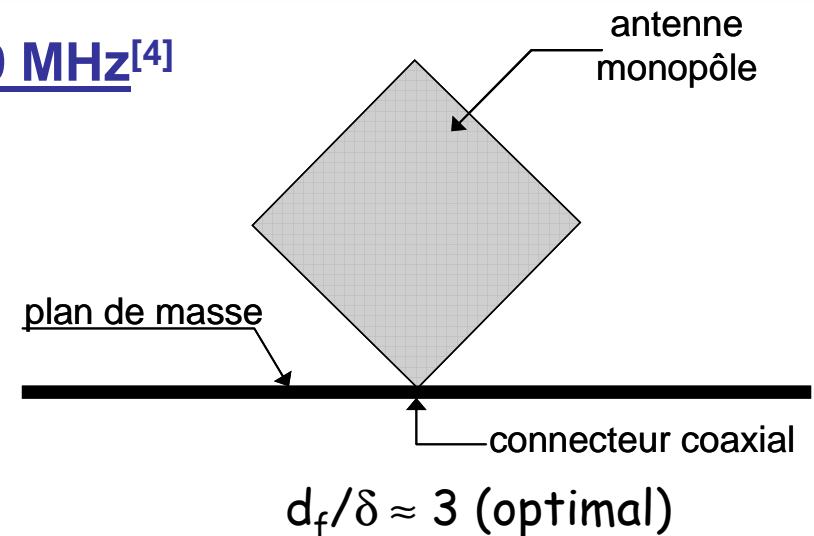
[1] F. Colombel, X. Castel, M. Himdi, G. Legeay, S. Vigneron, E. Motta-Cruz - *IET Sci. Meas. Technol.* Vol.3 (2009) pp.229-234

[2] J. Hautcoeur, X. Castel, F. Colombel, R. Benzerga, M. Himdi, G. Legeay, E. Motta-Cruz - *Thin Solid Films*, Vol.519 (2011) pp.3851-3858

[3] X. Castel, G. Legeay, J. Pinel - *Patent WO2009/000747*

Antennes monopôles losanges à 850 MHz^[4]

Film	Épaisseur	Gain (dBi)
Ag/Ti [référence]	6 μm	2,29
Cu	10 nm	-4,80
ITO	1,01 μm	-4,10
ITO/Cu/ITO	183 nm	-1,96
Ag/Ti maillé	6 μm	2,24



Pertes dans les couches minces :

- Pertes ohmiques

↳ relation de Poynting

$$P_s = \frac{1}{2} R_{\square} H_{hf}^2$$

- Pertes par effet de peau






↳ Profondeur de peau

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma}}$$

d_f / δ	R_{\square} (Ω / \square)
2,84	0,0025
2×10^{-3}	8,3
0,02	8,6
0,01	4,7
2,84	0,054

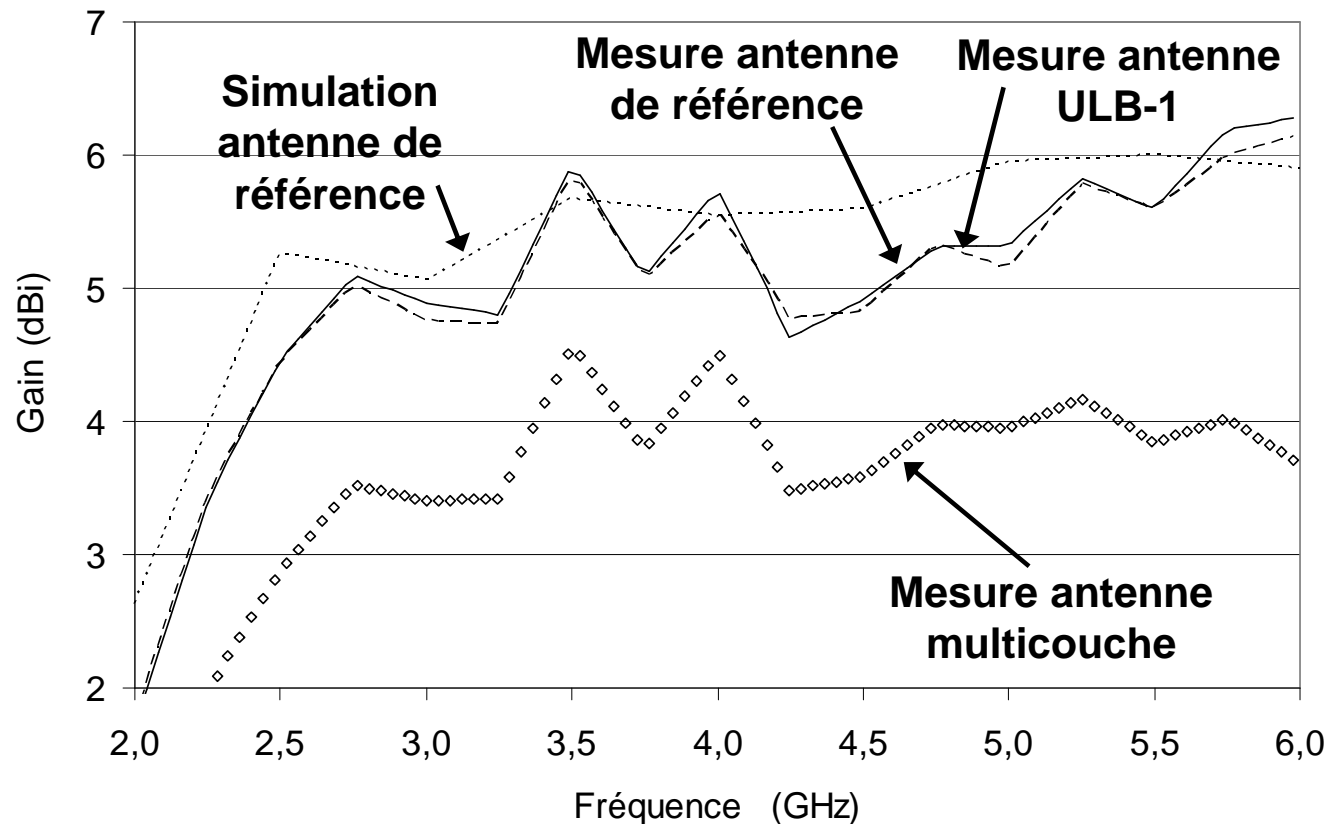
[4] E. Motta-Cruz, J. Hautcoeur, M. Himdi, F. Colombel, X. Castel
Patent EP2011/050828

- Antenne monopôle ultra large bande : 2,5 GHz ↔ 6 GHz^[5]

Référence	ULB-1	ULB-2	ULB-3	Multicouche
				
<u>Ag continu</u>	<u>Maillage 20/80</u>	<u>Maillage 20/180</u>	<u>Maillage 20/280</u>	<u>ITO/Ag/ITO</u>
$R_{\square} = 0,0025 \Omega/\square$	$R_{\square} = 0,018 \Omega/\square$	$R_{\square} = 0,022 \Omega/\square$	$R_{\square} = 0,052 \Omega/\square$	$R_{\square} = 5,0 \Omega/\square$
$T = 0 \%$	$T = 54,5 \%$	$T = 73,4 \%$	$T = 80,3 \%$	$37\% < T < 74\%$
$\acute{E}p_{Ag} = 6 \mu\text{m}$	$\acute{E}p_{Ag} = 6 \mu\text{m}$	$\acute{E}p_{Ag} = 6 \mu\text{m}$	$\acute{E}p_{Ag} = 6 \mu\text{m}$	$\acute{E}p_{Ag} = 201 \text{ nm}$

[5] J. Hautcoeur, F. Colombel, X. Castel, M. Hindi, E. Motta Cruz, *Progress in Electromagnetics Research (PIER) C*, Vol.22 (2011) pp.259-271

□ Gain des antennes entre 2 GHz et 6 GHz^[5]



↪ Accord
Théorie-Mesures

↪ Gain antenne de
référence = Gain
antennes maillées

[5] J. Hautcoeur, F. Colombel, X. Castel, M. Hindi, E. Motta Cruz, *Progress in Electromagnetics Research (PIER) C*, Vol.22 (2011) pp.259-271

Matériaux transparents et conducteurs,
matériaux composites et oxydes ferroélectriques :
des matériaux innovants pour de nouvelles
applications en hyperfréquences



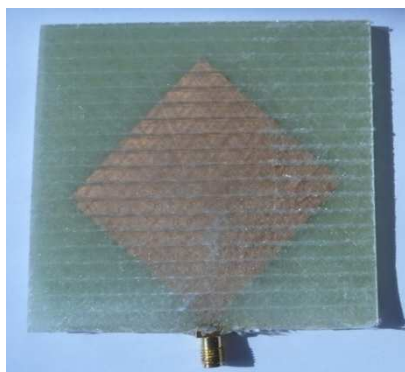
- Matériaux transparents et conducteurs pour vitrages communicants
- Matériaux composites pour panneaux structuraux communicants
- Oxydes ferroélectriques pour dispositifs reconfigurables

□ Problématique

- Antennes fixées à la surface de panneaux en matériaux composites ;
 - Élément rayonnant métallique inséré dans la structure composite ;
- ↳ Impacte les propriétés mécaniques (délaminage)



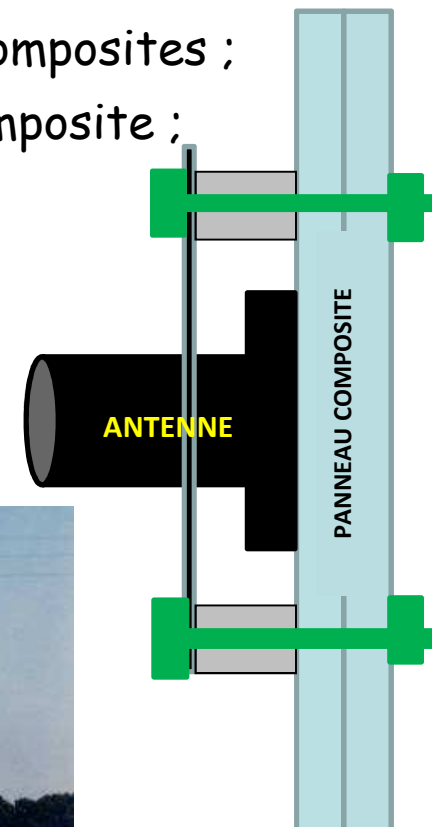
Airbus A350



Antenne monopole losange en cuivre dans composite verre E + polyester



Rushcutter (Australia)

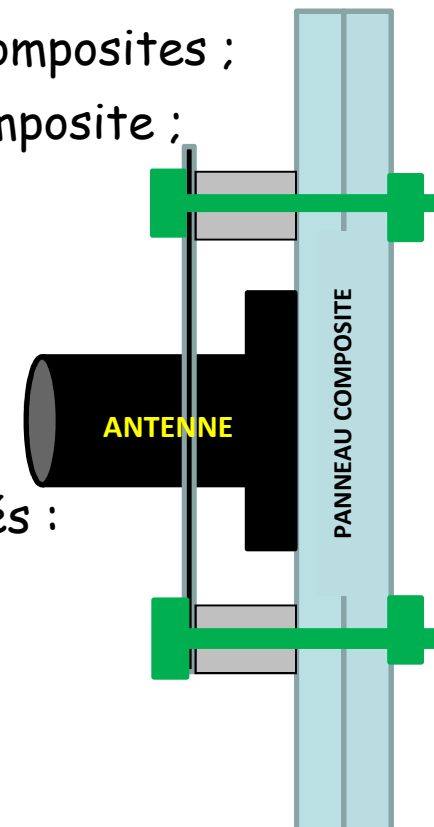


□ Problématique

- Antennes fixées à la surface de panneaux en matériaux composites ;
- Élément rayonnant métallique inséré dans la structure composite ;
- ↳ Impacte les propriétés mécaniques (délaminage)

□ Alternatives :

- Remplacer le métal par des matériaux conducteurs adaptés :
 - ↳ polymères conducteurs [6]
 - ↳ encres conductrices [7]
 - ↳ textiles traités avec nanotubes de carbone [8]



[6] H. Rmili, J.-L. Miane, H. Zangar, T. Olinga, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 48 (2006) pp.655-660

[7] L. Yang, A. Rida, R. Vyas, M.M. Tentzeris, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 55 (2007) pp.2894-2901

[8] Y. Bayram, Y. Zhou, J.L. Volakis, B.-S. Shim, N.A. Kotov, *Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium, San-Diego, USA (2008) pp.1-4*

□ Notre démarche

- Utiliser le tissu de fibres de carbone en substitution au métal :

↳ antennes 'tout composite' [9]

➡ Conservation de l'intégrité mécanique des panneaux composites

- Quelles performances pour de telles antennes ?

➡ antenne de référence



↳ élément rayonnant ↔ clinquant de cuivre

↳ insertion dans une même structure sandwich composite

➡ Comparaison des performances microondes des deux antennes

[9] L. Manac'h, X. Castel, M. Himdi, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, Vol. 35 (2012) pp.115-123

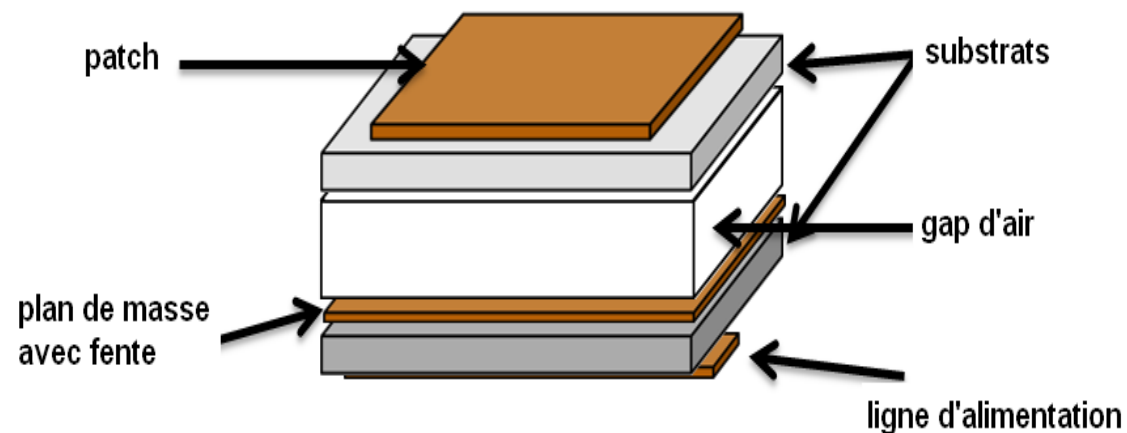
□ Design de l'antenne

- Antenne patch alimentée par fente. Pourquoi ?

- ↳ Élément rayonnant ↔ un simple carré

- ↳ Pas de contact direct entre le système d'alimentation et le carbone de l'élément rayonnant

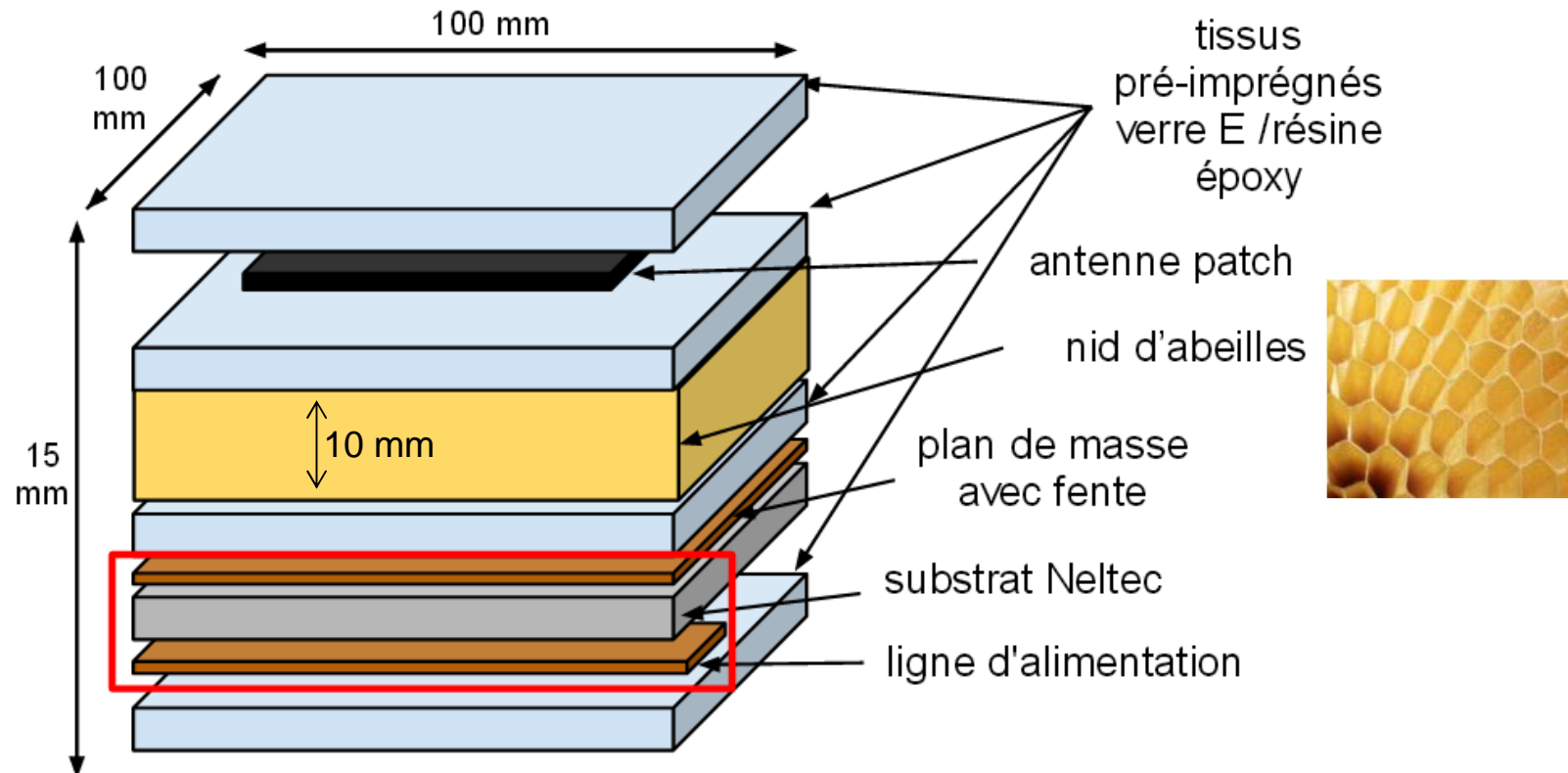
□ Structure de base ^[10] en métal



[10] D. Pozar, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-34 (1986) pp.1439-1446

□ Antenne patch alimentée par fente

- Structure de l'antenne en matériaux composites :



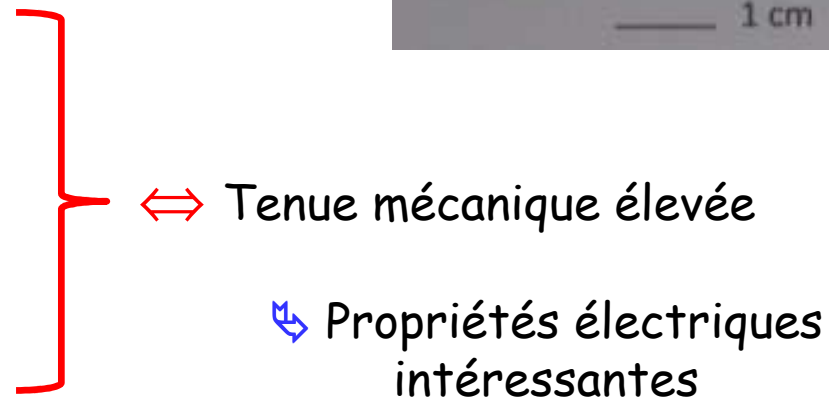
Dimensions du patch rayonnant = 35 mm × 35 mm ⇔ fréquence de travail ~ 2,5 GHz

□ Caractéristiques électriques du tissu de carbone dépendent de :

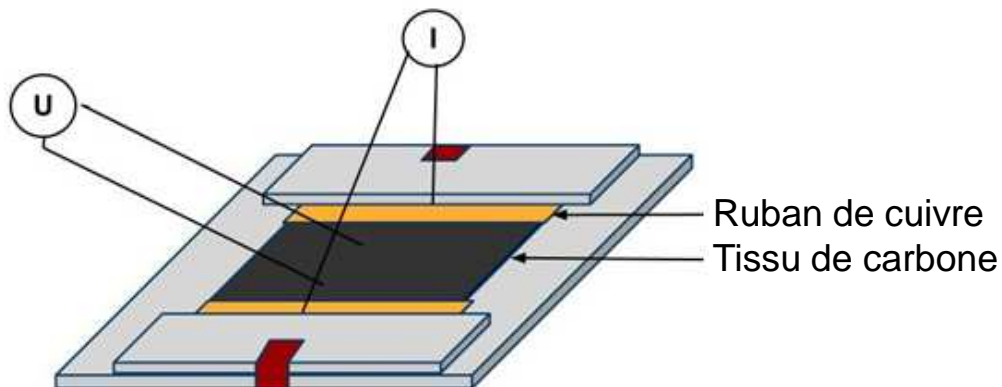
- ↪ Qualité de la fibre de carbone (HR, HM)
- ↪ Nombre de fibres par mèche (nombre de K)
(1000 fibres = 1 K)
- ↪ Type de tissage (armure)
- ↪ Grammage (g/m^2)

□ Tissu de carbone sélectionné

- ↪ Carbone Haut Module (HM)
- ↪ 12 K (ou 12 000 fibres/mèche)
- ↪ Sergé 2/2
- ↪ Grammage = 385 g/m^2



❑ Méthode 4 pointes



$$R_{\square} = \frac{1}{t \times \sigma_{DC}}$$

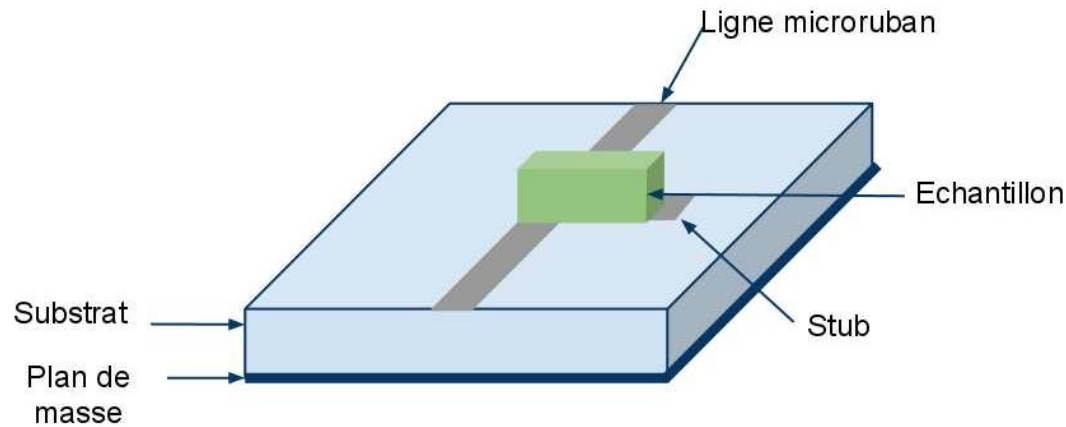
Valeurs mesurées	Tissu de carbone	Clinquant de cuivre
Résistance par carré, R_{\square}	0,15 Ω/\square	$2,5 \times 10^{-4} \Omega/\square$
Epaisseur, t	370 μm	68 μm
Conductivité électrique, σ_{DC}	$1,8 \times 10^4 \text{ S/m}$	$5,9 \times 10^7 \text{ S/m}$

Patch carré :



$$R_{ohmique} = R_{\square}$$

□ Méthode résonante

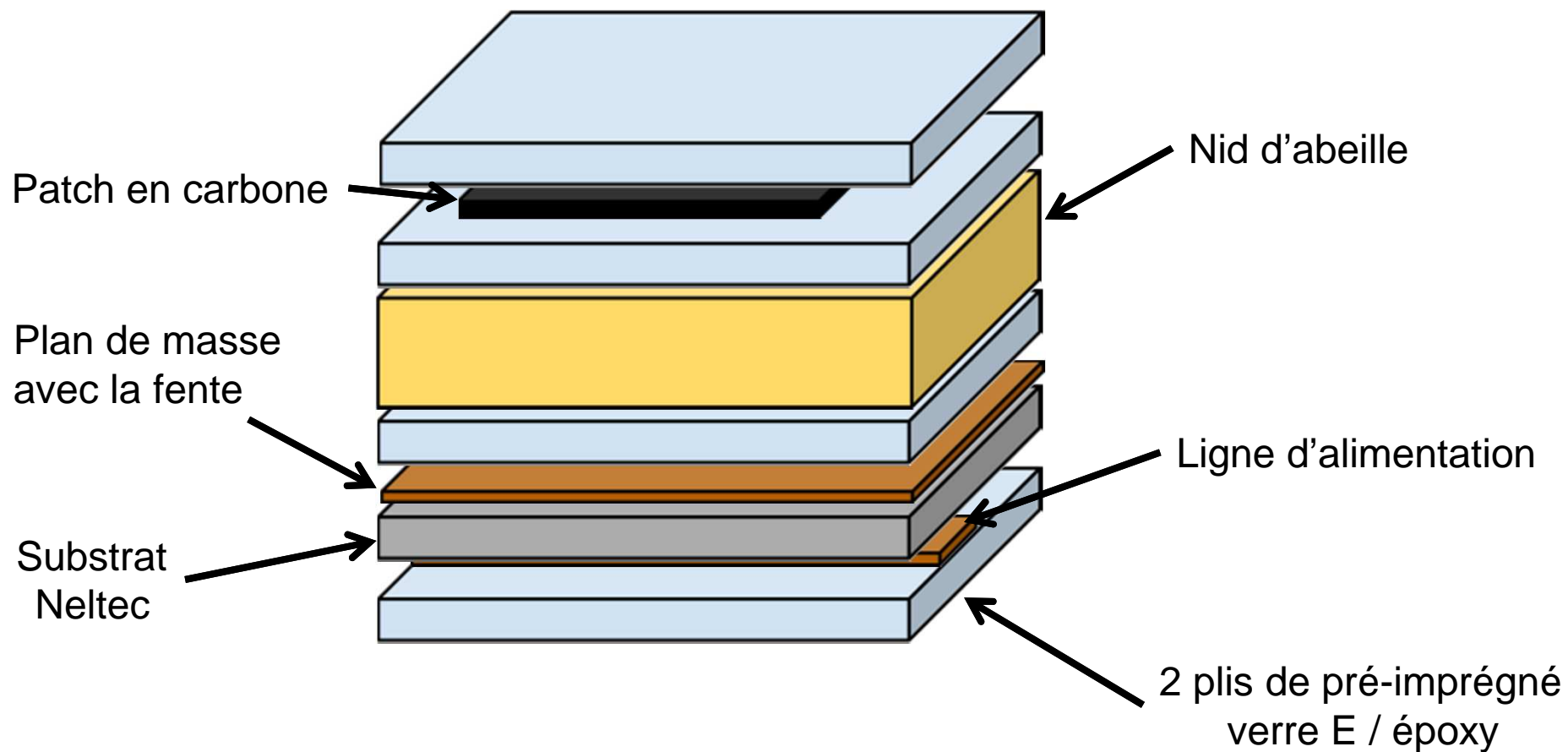


Méthode résonante à stub [11]

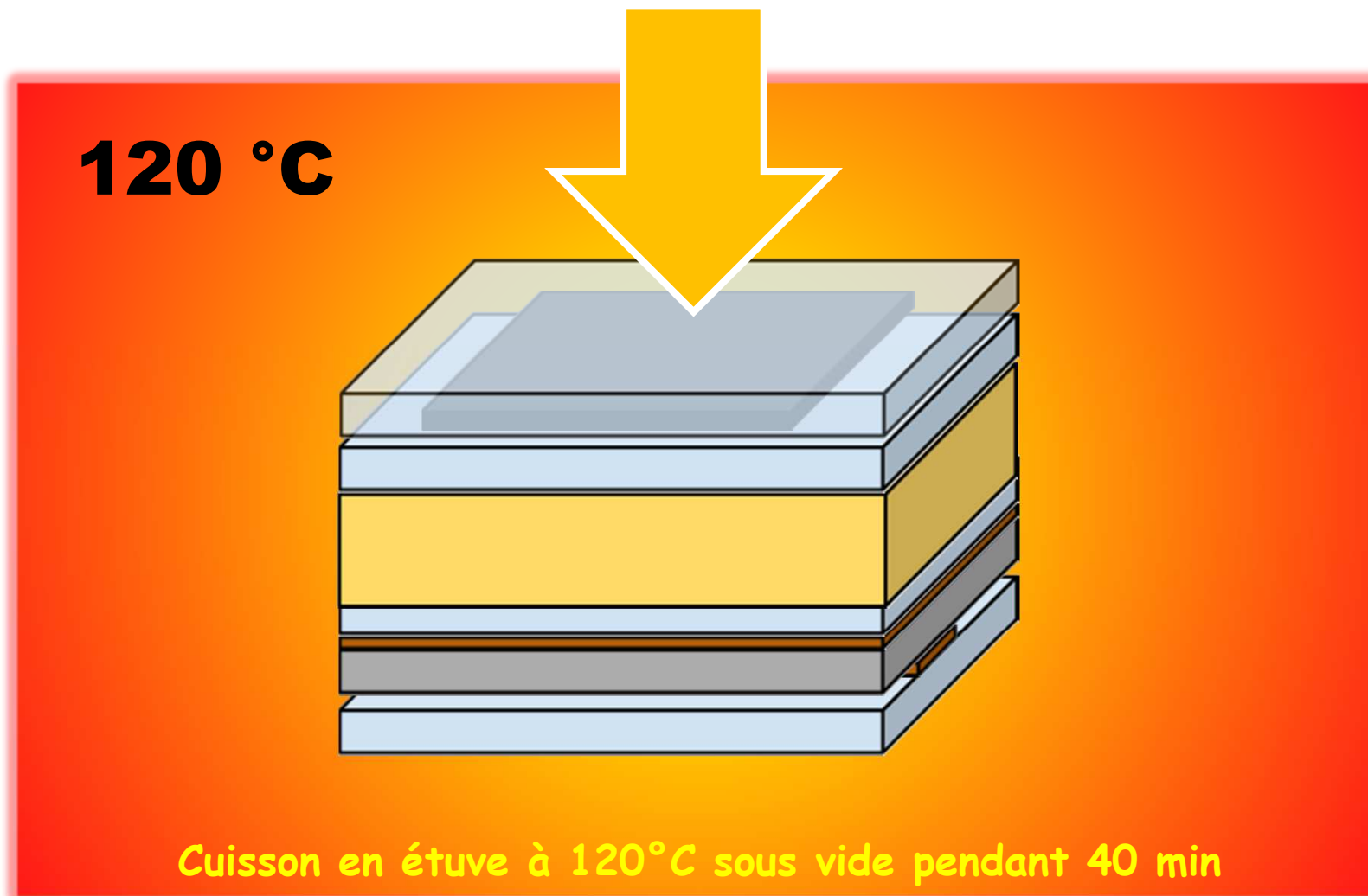
Caractéristiques diélectriques	Pré-imprégné verre E-époxy	Nid d'abeille papier aramide	Substrat Neltec <i>(données fournisseur)</i>
Permittivité relative ϵ_r @1 GHz	$5,0 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	3,0
Tangente de pertes $\tan\delta$ @1 GHz	$0,010 \pm 0,005$	~ 0	0,0023

[11] D. Liu, U. Pfeiffer, J. Gizyb, B. Gaucher, "Advanced millimeter-wave technologies", Wiley Ed., Chap. 5 (2009) pp.163-170

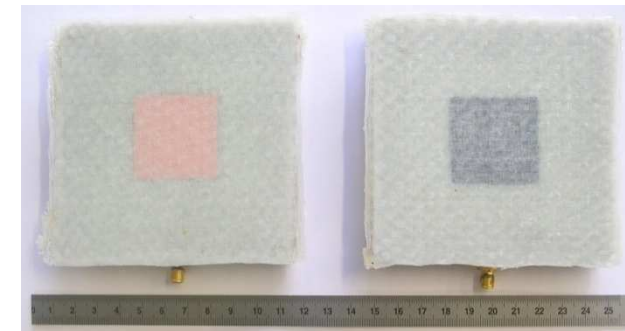
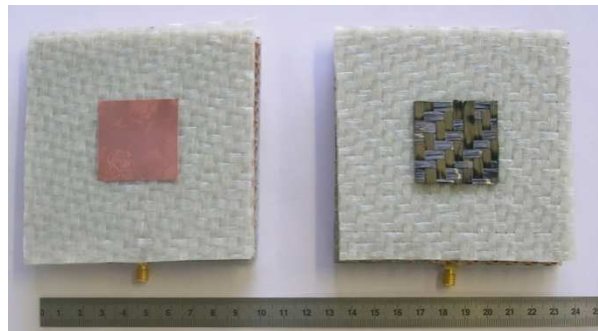
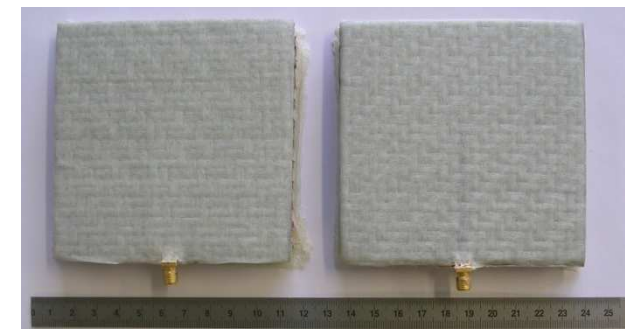
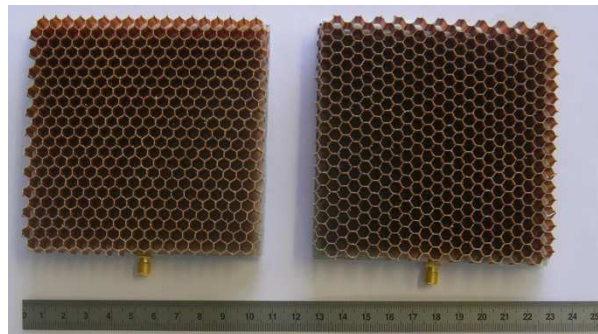
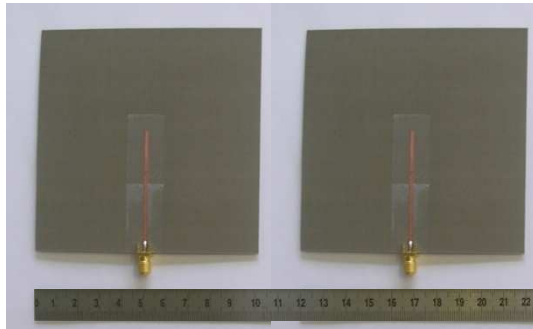
❑ Fabrication par moulage de tissus pré-imprégnés



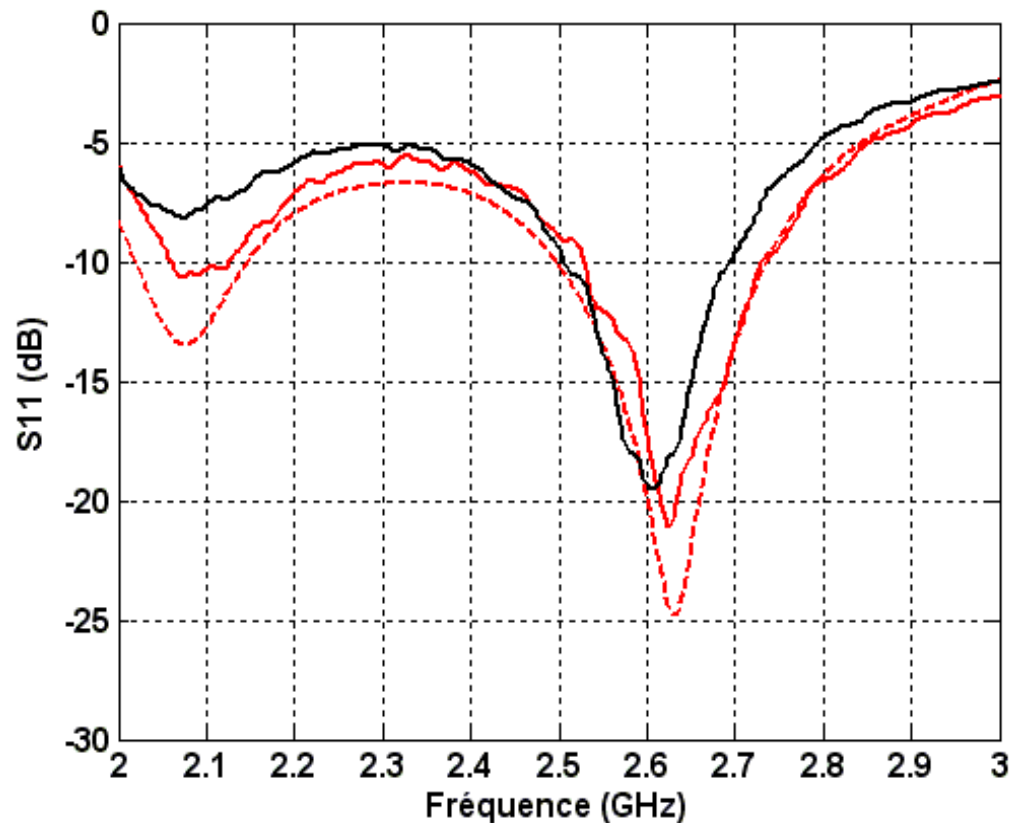
- ❑ Fabrication par moulage de tissus pré-impregnés



❑ Fabrication par moulage de tissus pré-impregnés



□ Coefficient de réflexion

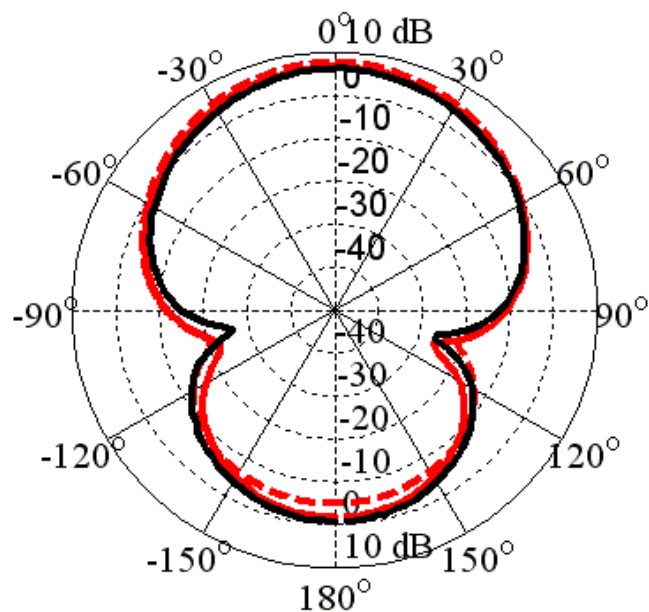


↪ Fréquence de résonance identique pour les deux maquettes (~ 2,6 GHz)

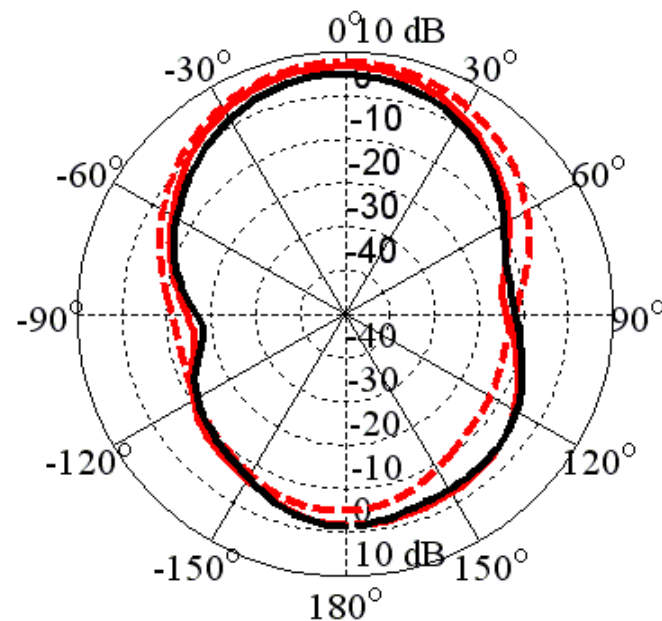
↪ Adaptation à -10 dB entre 2,5 GHz et ~ 2,7 GHz

- Patch carbone : — (mesure)
- Patch cuivre (référence) :
 -- (simulation) et — (mesure)

□ Diagrammes de rayonnement



Plan E

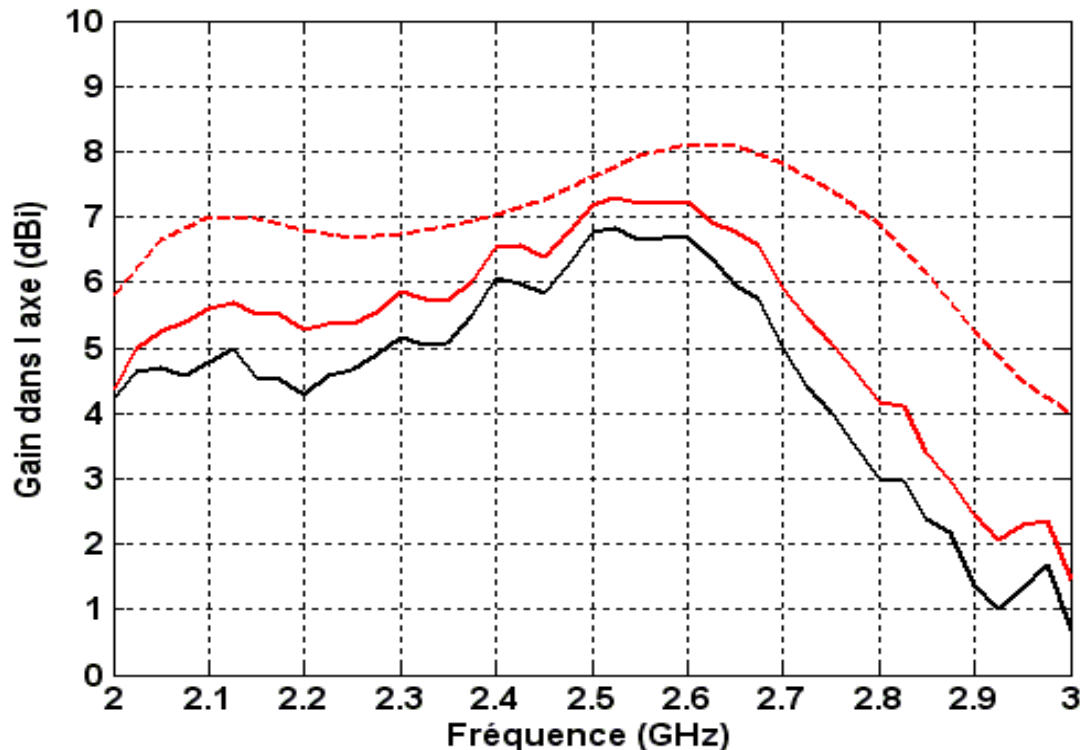


Plan H

- Patch carbone : — (mesure)
- Patch cuivre (référence) :
 -- (simulation) et - (mesure)

Mesures @ 2,5 GHz
 en chambre anéchoïde SATIMO SG32

□ Gain [12]



↪ Gain simulation ↗

rayonnement arrière de la fente ↗

↪ @ 2,5 GHz :

$\Delta G \approx 0,5$ dB entre

patch carbone et patch cuivre

- Patch carbone : — (mesure)
- Patch cuivre (référence) :
-- (simulation) et — (mesure)

Mesures
en chambre anéchoïde SATIMO SG32

[12] Thèse L. Manac'h, Université de Rennes 1 (2013)

Matériaux transparents et conducteurs,
matériaux composites et oxydes ferroélectriques :
des matériaux innovants pour de nouvelles
applications en hyperfréquences



- Matériaux transparents et conducteurs pour vitrages communicants
- Matériaux composites pour panneaux structuraux communicants
- Oxydes ferroélectriques pour dispositifs reconfigurables

Reconfigurabilité par :

- ↪ MEMS
- ↪ Diodes PIN
- ↪ Varicaps
- ↪ **Matériaux Ferroélectriques**



Dispositifs reconfigurables et miniatures

Différentes familles de matériaux ferroélectriques :

- ↪ $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN)
- ↪ $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (PZT)
- ↪ $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ (BST)
- ↪ $\text{LaTiO}_{3,5}$ - LaTiO_2N (LTON)

Caractéristiques diélectriques
(ϵ_r , $\tan\delta$)
agiles sous champ de polarisation [13-16]

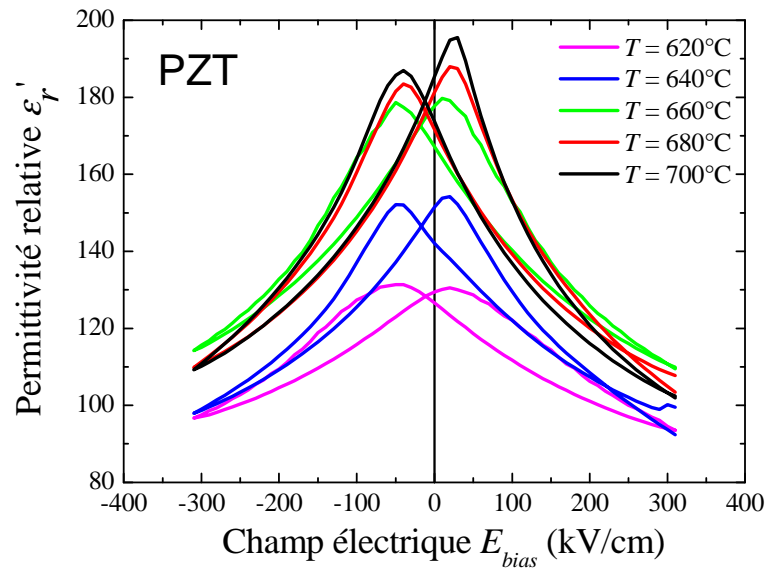
[13] A. Perrin, A. Rousseau, D. Fasquelle, V. Laur, V. Bouquet, S. Députier, P. Laurent, G. Tanné, F. Huret, J.-C. Carru, M. Guilloux-Viry, *Phase transition*, Vol. 81 (2008) pp. 643-665

[14] R. Seveno, H.W. Gundel, J. *Sol-Gel Sci. Technol.* Vol. 44 (2007) pp. 7-14

[15] C. Borderon, D. Averty, R. Seveno, H.W. Gundel, *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 97 (2008) pp. 12-19

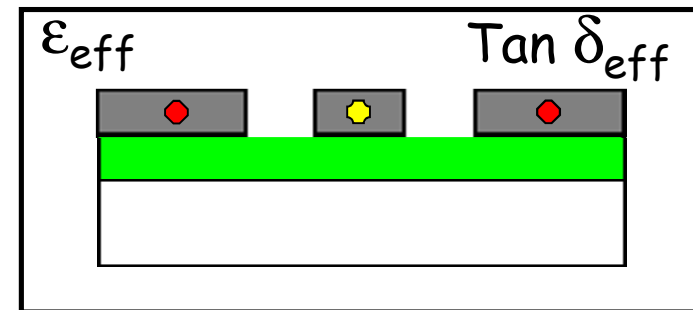
[16] A. Ziani, C. Le Paven-Thivet, D. Fasquelle, L. Le Gendre, R. Benzerga, F. Tessier, F. Cheviré, J.C. Carru, A. Sharaiha, *Thin Solid Films* Vol. 520 (2012) pp. 4536-4540

□ Dépôt de couches minces et technologie coplanaire [17]



◆ 2 Plans de masse semi-infinis

◆ 1 Conducteur central



■ Métal □ Substrat ■ Ferro

Fabrication aisée

ϵ_{Ferro} ajustable $\rightarrow \epsilon_{eff}$ varie

Reconfigurabilité

+

ϵ_{Ferro} élevée $\rightarrow \epsilon_{eff}$ augmente

Miniaturisation

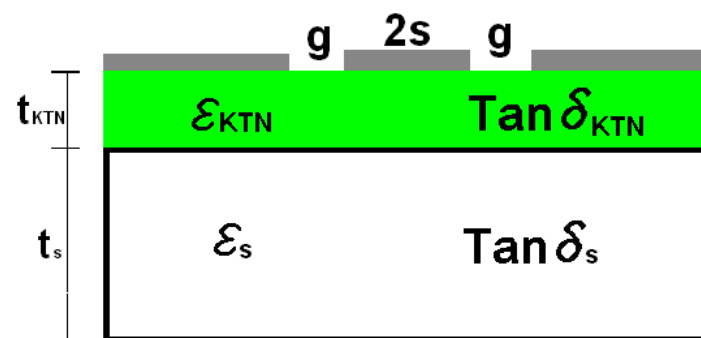
[17] R. Simons, *Coplanar waveguide circuits, components, and systems*, Wiley-Interscience (2001) pp.1-4

□ Méthode par transformation conforme^[18] & Constante de propagation γ ^[19]

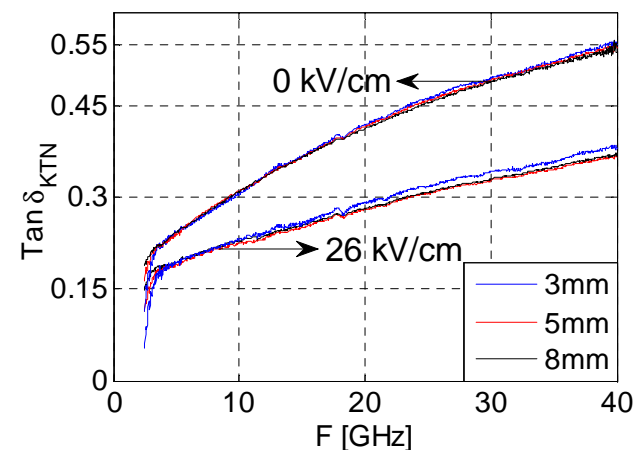
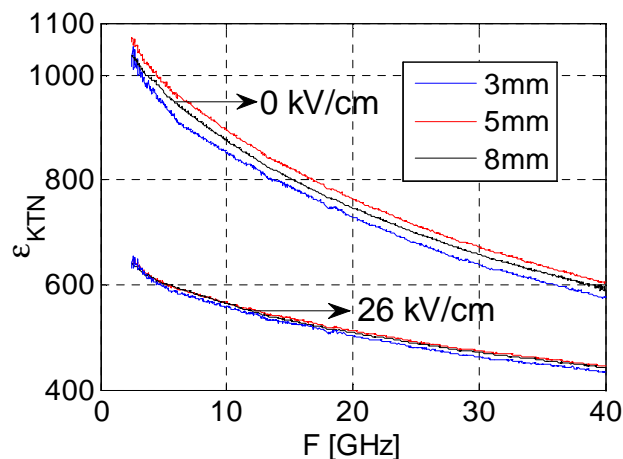
$$e^{-\gamma L} = \frac{2S_{21}}{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2 \pm \sqrt{(1 + S_{11}^2 - S_{21}^2)^2 - 4S_{11}^2}}$$

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad \varepsilon_{eff}^* = -\left(\frac{c\gamma}{2\pi f}\right)^2$$

$$\varepsilon_{eff} = 1 + q_1(\varepsilon_s - 1) + q_2(\varepsilon_{KTN} - \varepsilon_s)$$



$$\tan \delta_{eff} = k_1 \tan \delta_s + k_2 \tan \delta_{KTN}$$



[18] E. Carlsson and S. Gevorgian, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47 (1999) pp.1544-1552

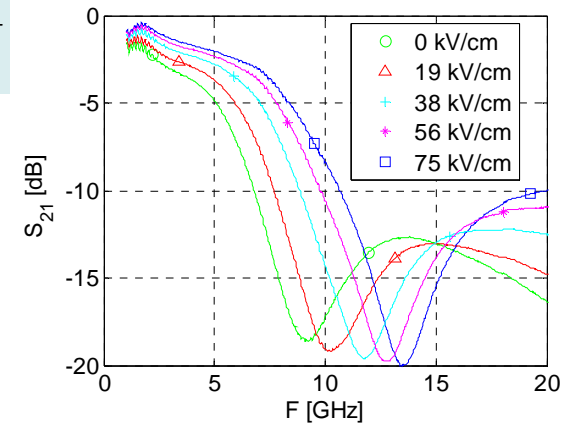
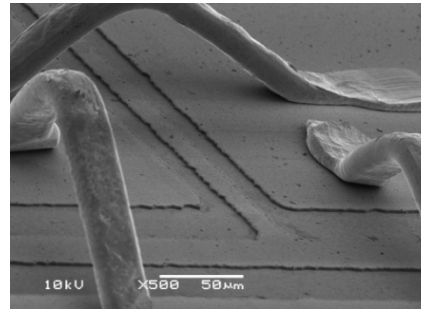
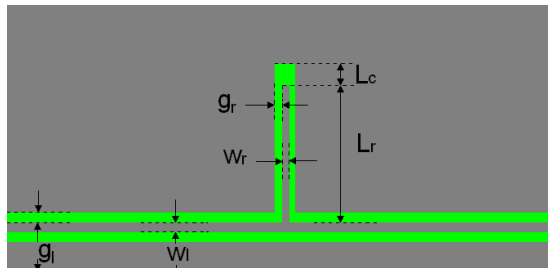
[19] J. Zhang and T.Y. Hsiang, *Piers Online*, Vol. 3 (2007) pp.1102-1106

□ Résonateur à stub (KTN)^[20]

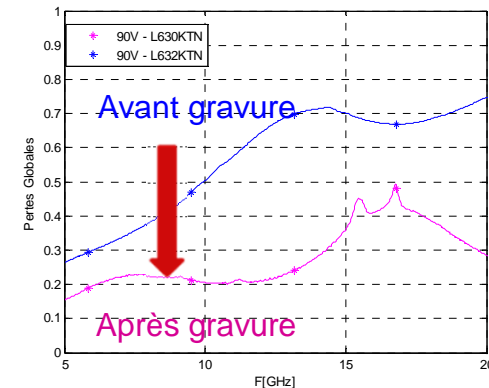
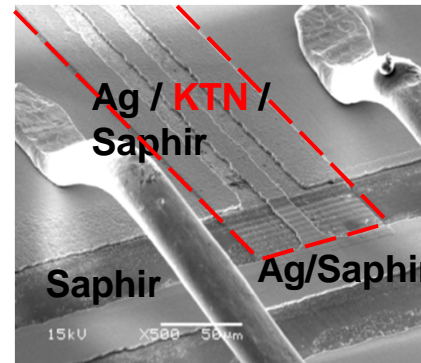
Fréquence de travail : 10 GHz

Agilité : 54 % sous 75 kV.cm⁻¹

$$F_r \sim \frac{\lambda_g}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{c}{4L_r\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$



□ Microgravure laser KrF, λ=248 nm (KTN)



$$PG = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$$

Agilité : 54% → 47%

Pertes globales divisées par 3 !

Films KTN élaborés par ISCR (Equipe Pr. M. Guilloux-Viry)

[20] Q. Simon et al. Applied Physics Letters, Vol.99 (2011) pp.092904

□ PZT

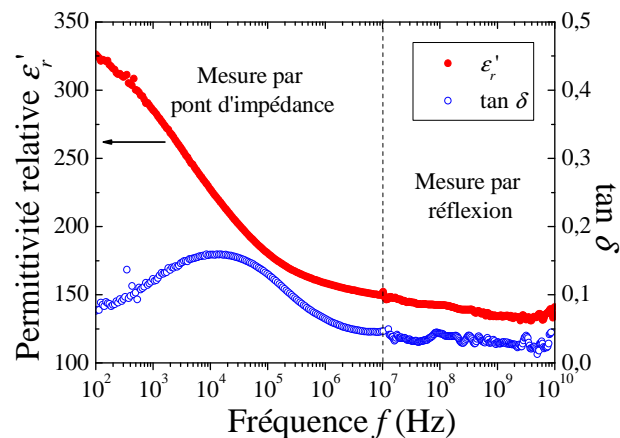
Matériau : $\text{Pb}_{1,3}\text{Zr}_{0,57}\text{Ti}_{0,43}\text{O}_3$

Elaboration : Sol/gel par spin-coating

Epaisseur : 200 nm à 5 μm

Substrats : Acier, silicium, alumine, verre Corning (cristallisation à 620°C)

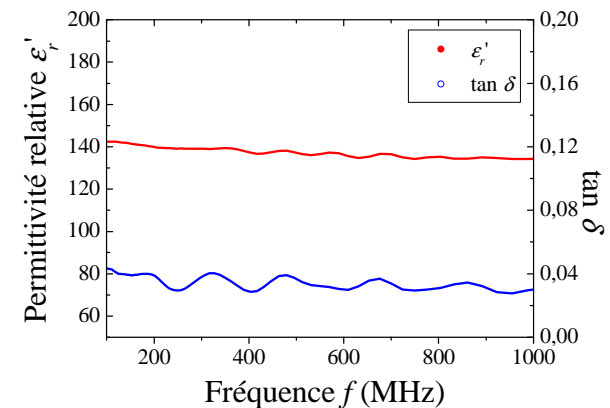
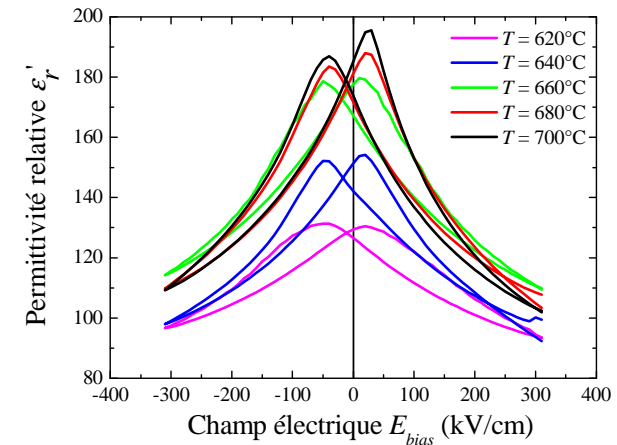
Dimensions : $\leq 3''$



Permittivité : $\epsilon_r \approx 140 @ \text{UHF}$

Pertes diélectriques : $\tan\delta \approx 3 \times 10^{-2} @ \text{UHF}$

Agilité : $\sim 45 \% @ 1 \text{ MHz}, 300 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ (MIM sur acier)



□ BST

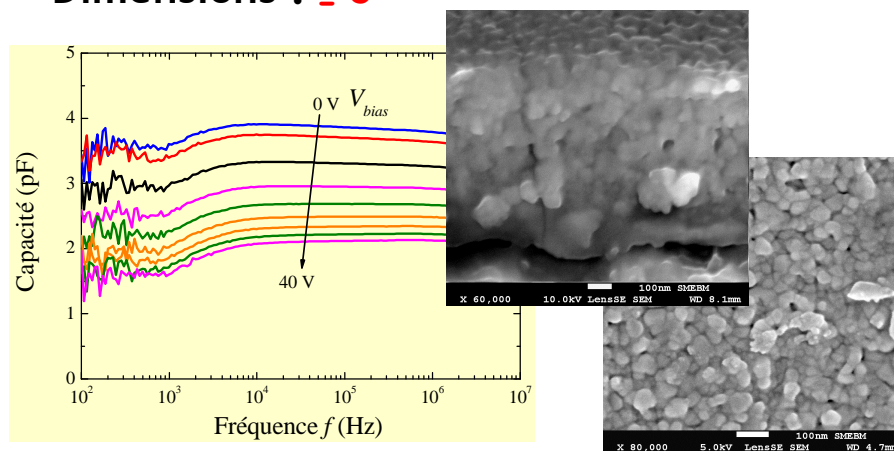
Matériau : $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ dopé manganèse

Élaboration : par voie chimique et spin-coating

Épaisseur : 200 nm à 1 μm

Substrats: alumine (silicium, verre Corning, acier)
(cristallisation à 750°C)

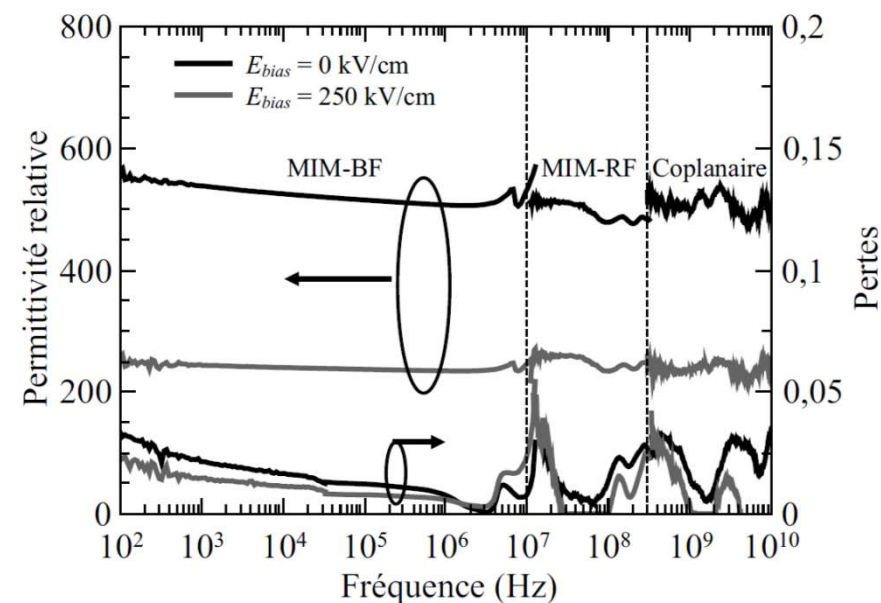
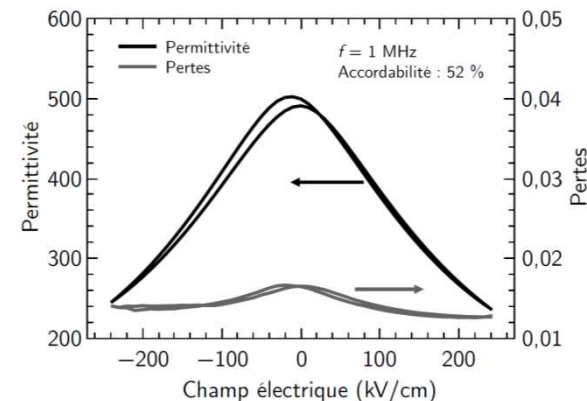
Dimensions : $\leq 3''$



Permittivité : $\epsilon_r \approx 500$ @ UHF

Pertes diélectriques : $\tan\delta \approx 1 \times 10^{-2}$ @ UHF

Agilité : $\geq 50\%$ @ 10 GHz, 250 $kV \cdot cm^{-1}$ (sur Al_2O_3)



□ LTON

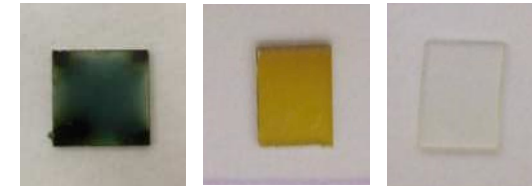
Matériau : $\text{LaTiO}_{3,5}$ - LaTiO_2N

Elaboration : Pulvérisation cathodique RF

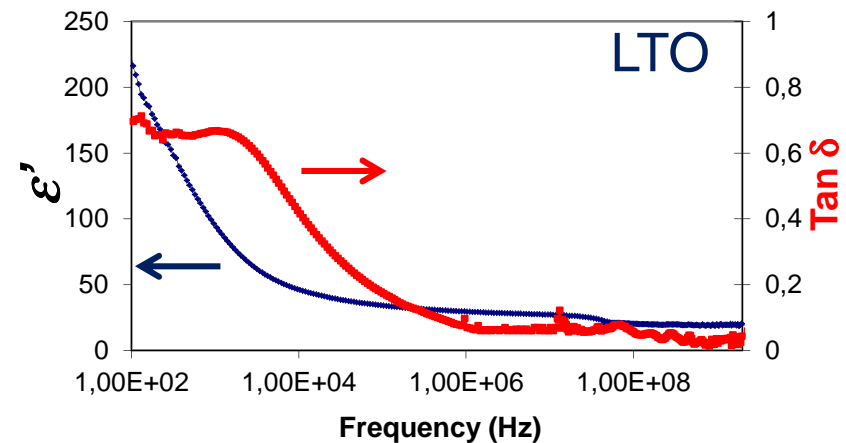
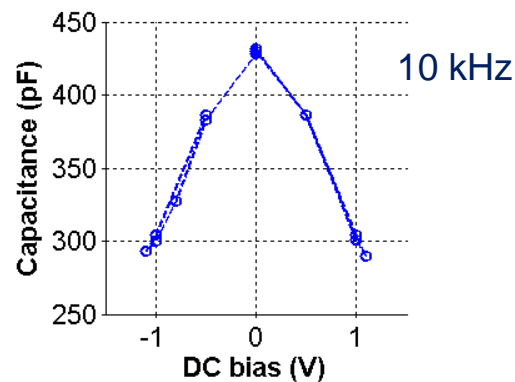
Epaisseur : 200 nm à 500 nm

Substrats: Pt/ Si, MgO, SrTiO_3
(cristallisation à 800°C)

Dimensions : $\leq 10 \times 10 \text{ mm}^2$



← Conducteur Semiconducteur Isolant →
 LaTiO_3 LaTiO_2N $\text{LaTiO}_{3,5}$



Permittivité : $\epsilon_r \approx 60-120 @ \text{UHF}$

Pertes diélectriques : $\text{tan } \delta \approx 1,2 \times 10^{-2} @ \text{UHF}$

Agilité : $\sim 10 \% @ 100 \text{ kHz}$, $20 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ (MIM LaTiO_2N sur SrTiO_3)

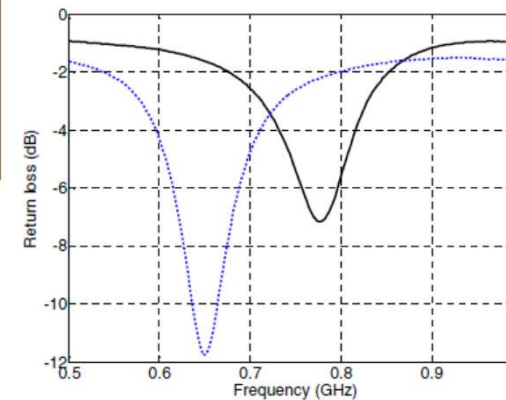
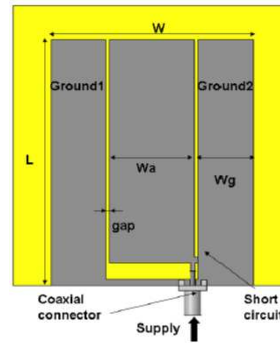
□ Antenne patch miniature [21]

Matériau : **PZT sur Al_2O_3**

Fréquence de travail : **UHF**

Miniaturisation : **~ 30%**

[21] D. Averty, C. Borderon, Y. Mahe, R. Renoud, R. Séveno, S. Toutain, P. Derval, G. Lirzin, S. Pavy, H. Gundel, A. Sharahia, S. Boucher, C. Delaveaud, C. Le Fur, Rapport ANR NAOMI SP3, février 2011



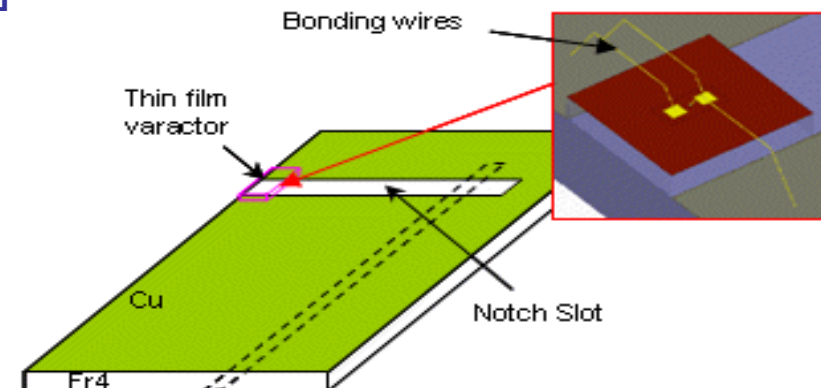
□ Antenne fente miniature (LTON) [22]

Composant localisé : **varactor en LTON**

Fréquence de travail : **300 MHz**

Miniaturisation : **~ 65%**

[22] H. Nguyen, R. Benzerga, C. Delaveaud, A. Sharaiha, Y. Lu, C. Le Paven-Thivet, L. Le Gendre, X. Castel, IEEE EUCAP (2012) pp.3595-3598



□ Antenne à fente chargée [23]

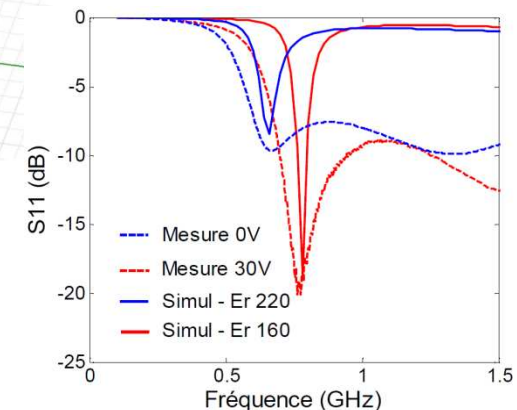
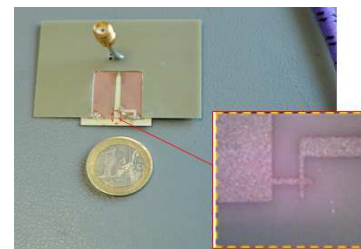
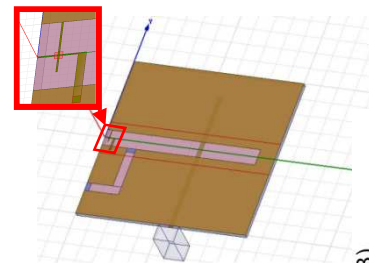
Composant : **varactor en couche mince de BST**

Fréquence de travail : **800 MHz**

Agilité du varactor : **~ 35 % à 30 V**

Agilité de l'antenne : **~ 14,5 % sous 30V**

[23] H. Gundel, R. Renoud, C. Borderon, S. Pavy, A. Sharaiha, H. Nguyen, R. Benzerga, C. Delaveaud, *proc. ISAF/ECAPD/PFM, Aveiro 2012*, DOI: 10.1109/ISAF.2012.629782



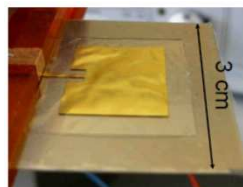
□ Antenne patch [24]

Matériau : **polyuréthane (PU)**

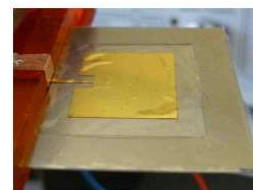
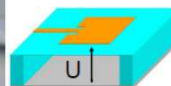
Fréquence de travail : **10 GHz**

Agilité de l'antenne : **5,2 % sous 145 V**

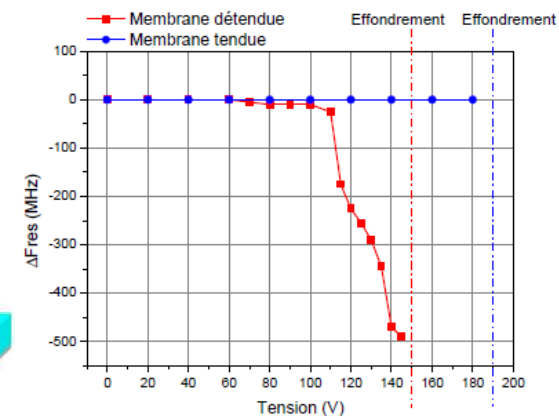
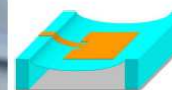
Figure de mérite : **sup. à l'état de l'art**



U = 0 V (position initiale)



U ≈ 145 V : gap d'air diminué



[24] S. Baron, B. Guiffard, A. Sharaiha, *proc. JCMM2014, Nantes 24-25 mars 2014*

Merci de votre
attention



18 rue Henri Wallon
22004 SAINT BRIEUC cedex 1,
France
xavier.castel@univ-rennes1.fr
www.ietr.fr

