

Conception et Mesure d'un Circuit Rectenna en Bande ISM à 2.45 GHz

Application à l'Alimentation d'un Capteur de Température

Hakim TAKHEDMIT, Laurent CIRIO et Odile PICON

Université Paris-Est Marne-la-Vallée
Laboratoire ESYCOM (EA 2552)



1. Introduction
2. Description du circuit de conversion RF-DC
3. Modélisation numérique FDTD-3D de la rectenna
4. Validation expérimentale et résultats
5. Application: Alimentation à distance d'un capteur de température
6. Conclusions et perspectives

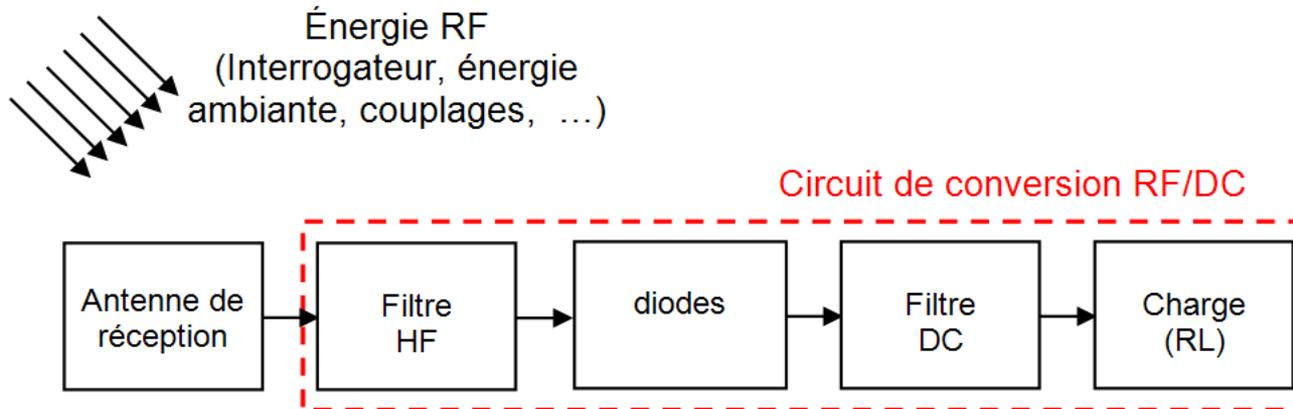
1. Introduction

Problématique et Motivations

- Améliorer l'autonomie des objets communicants et tendre vers l'efficacité énergétique.
- S'affranchir des solutions d'alimentation conventionnelles par pile ou par batterie, non respectueuses de l'environnement.

Solution proposée: *Récupération et conversion d'énergie électromagnétique*

Qu'est ce qu'une rectenna?

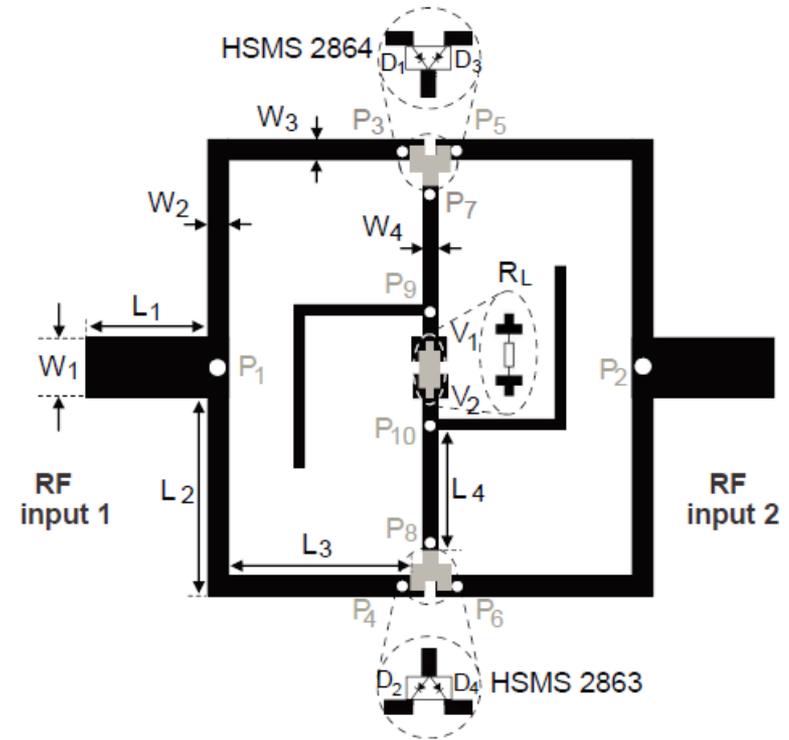


- Bande ISM à 2.45 GHz: libre de licence et dédiée aux applications Industrielles, scientifiques et médicales.

2. Description du circuit de conversion RF-DC

- Substrat Rogers Duroid 5880:
 - $\epsilon_r = 2.2$, $h = 1.575$ mm, $\tan\delta = 0.0009$
- Deux accès symétriques adaptés 50 Ω
- Quatre diodes Schottky HSMS 286X en SOT 23
- Charge optimale (R_L) : 1.2 k Ω à 10 mW
- Impédance série des diodes: 78 – j256 Ω à 10 mW (puissance totale)
- Outil de simulation et d'optimisation : ADS (HB + Momentum)
- Objectif: maximiser le rendement de conversion RF-DC (η)

$$\eta(\%) = 100 \times \frac{P_{DC}}{P_{RF}} = 100 \times \frac{V_{DC}^2}{P_{RF} \times R_L}$$

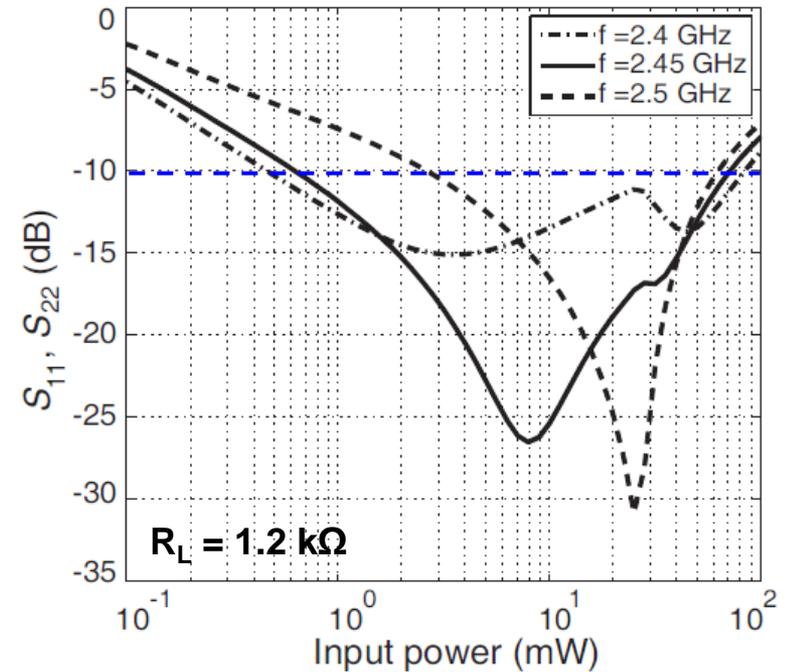
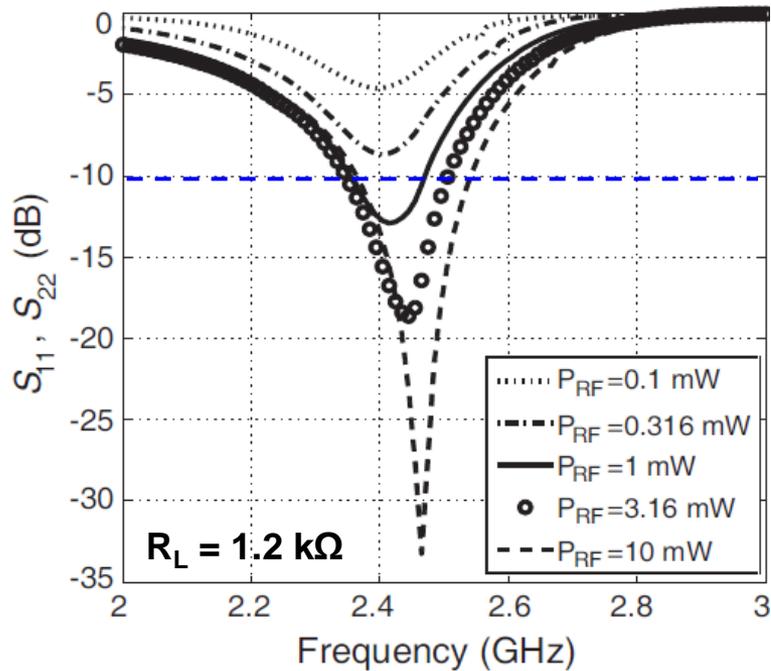


Microstrip-line section	Length (mm)	Width (mm)	Z_c (Ω)
L_1, W_1	10	4.8	50
L_2, W_2	17.6	1.53	95
L_3, W_3	17.9	1.53	95
L_4, W_4	11.5	0.95	117

2. Description du circuit de conversion RF-DC

Résultats de simulation ADS

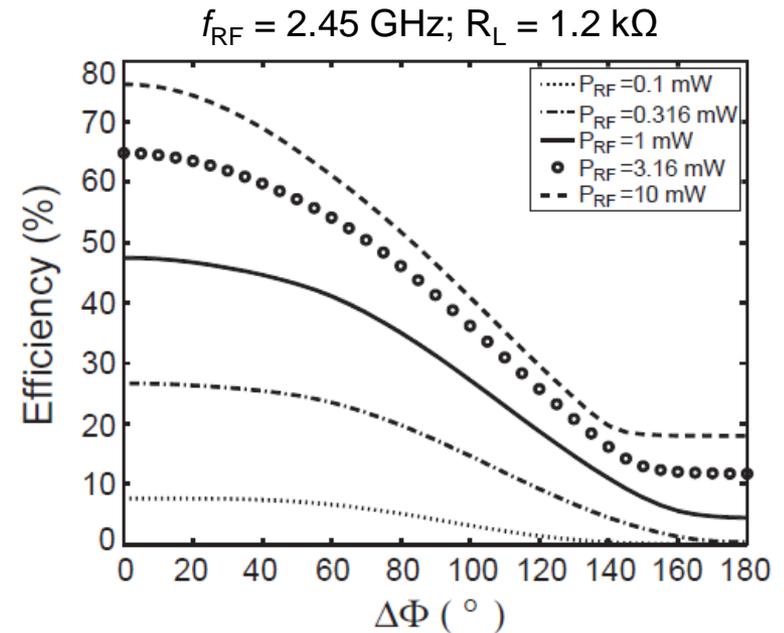
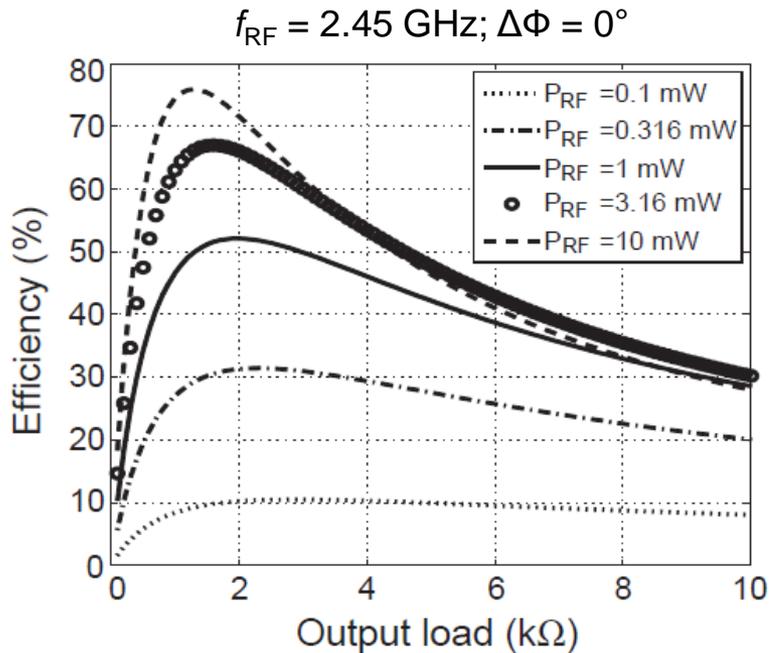
- Bonne adaptation dans la bande ISM à 2.45 GHz pour des puissances RF supérieures à 1 mW.



2. Description du circuit de conversion RF-DC

Résultats de simulation ADS

- Rendement optimum autour de $R_L = 1.2 \text{ k}\Omega$
- Le rendement diminue lorsque $\Delta\Phi$ augmente.



3. Modélisation numérique FDTD-3D

Méthode des différences finies dans le domaine temporel

- Discrétisation spatio-temporelle des équations de Maxwell
- Maillage tridimensionnel (3D)
- Répartition spatiale des champs sur la cellule de Yee
- Maillage non-uniforme
- Insertion d'éléments localisés linéaires et non-linéaires
- Formalisme du champ total/champ diffracté: génération d'une onde plane arbitraire

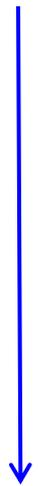
3. Modélisation numérique FDTD-3D

FDTD: Insertion d'éléments localisés linéaires et non-linéaires

Formulation FDTD
Équation de Maxwell Ampère

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J}_c + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

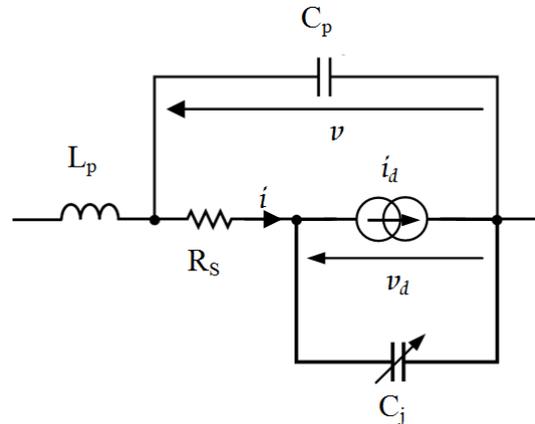
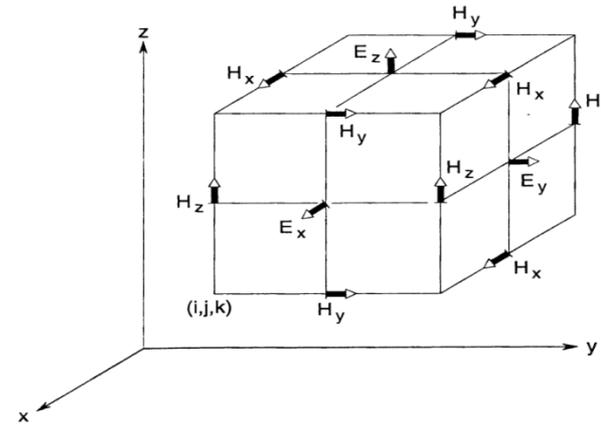
Insertion des
éléments localisés
dans l'algorithme
FDTD



Linéarité des
équations de Maxwell
(Théorème de
superposition)

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J}_c + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_L$$

Formulation FDTD généralisée



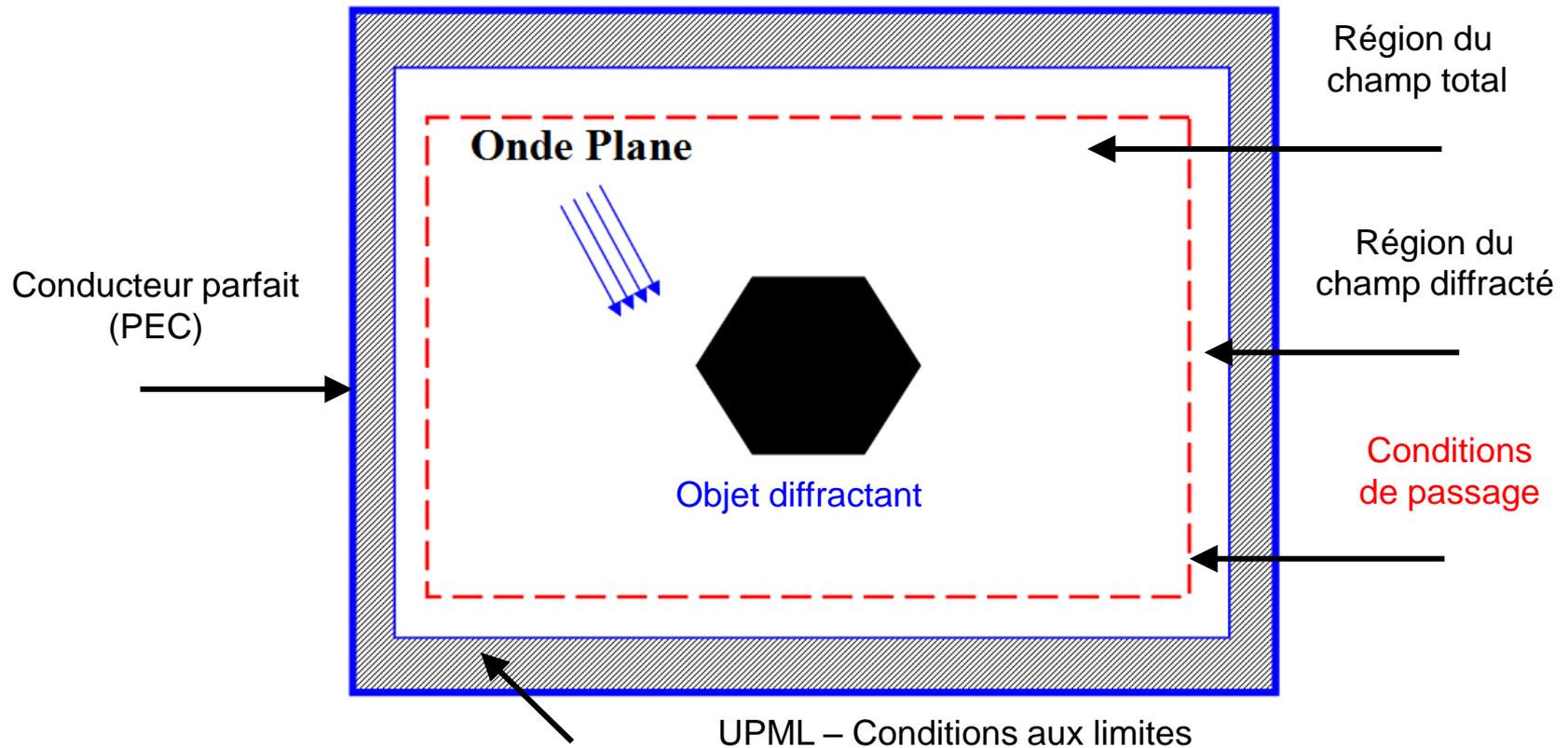
$$\begin{cases} V = V_d + R_s I \\ I = I_d + C_d \frac{\partial V_d}{\partial t} \\ I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{K}\right) - 1 \right) \\ \text{rot}H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + J \end{cases}$$

Modèle diode Schottky

3. Modélisation numérique FDTD-3D

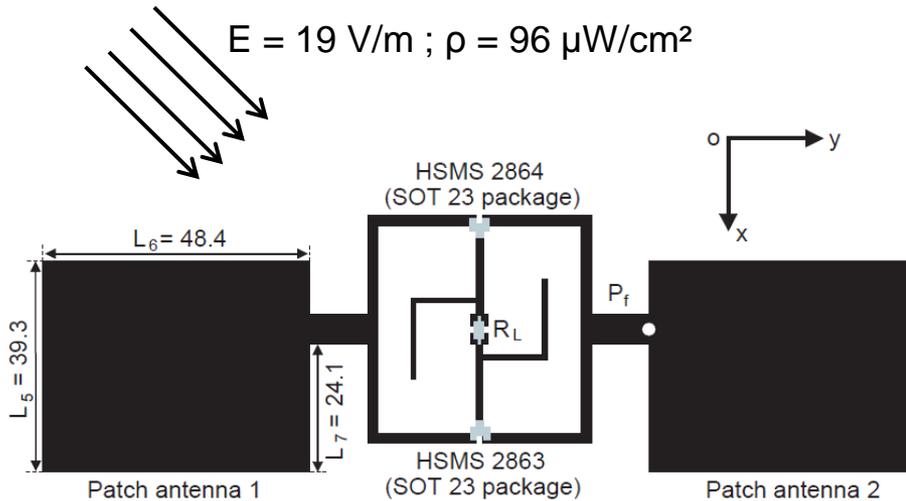
FDTD: Formalisme du champ total / champ diffracté

- ABC de type UPML (Uniaxial Perfectly Matched Layer)
- Formalisme du champ total/champ diffracté pour la génération d'ondes planes arbitraires



3. Modélisation numérique FDTD-3D

Rectenna symétrique à double antenne patch



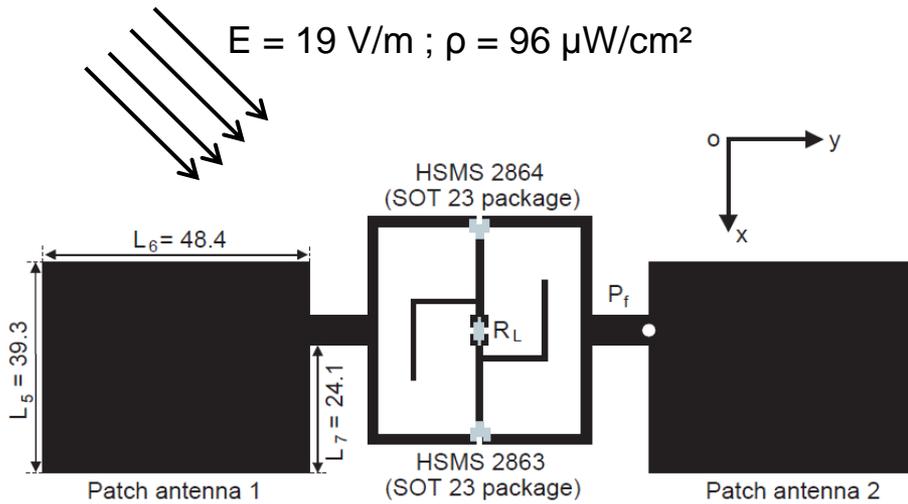
- Substrat Rogers Duroid 5880:
 $\epsilon_r = 2.2$, $h = 1.575$ mm, $\tan\delta = 0.0009$
- Simulation HFSS:
 Gain du patch: 7.14 dBi à $\theta = 0^\circ$
 Surface effective du patch : ~ 60 cm²

Pas spatiaux	Δx	mm	0.467
	Δy		0.279
	Δz		0.788
Pas temporel	Δt	ps	0.726
Nombre de mailles	N_x		227
	N_y		137
	N_z		49
Nombre d'itérations			100000
UPML (ABC)	N		10
	m		3

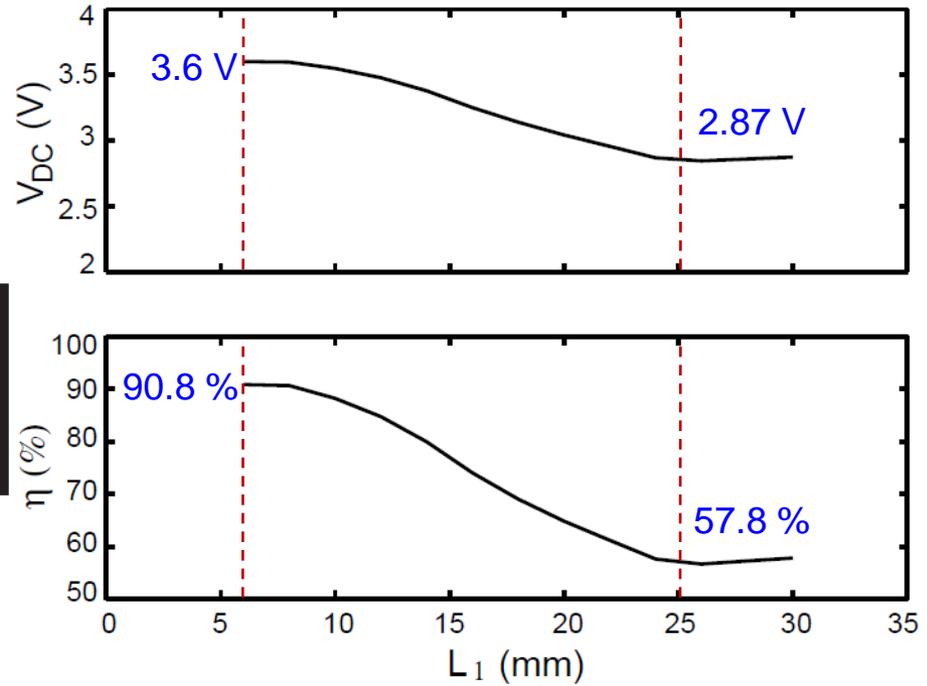
Paramètres de la simulation FDTD-3D

3. Modélisation numérique FDTD-3D

Rectenna symétrique à double antenne patch : résultats



L1: Longueur des lignes d'alimentation



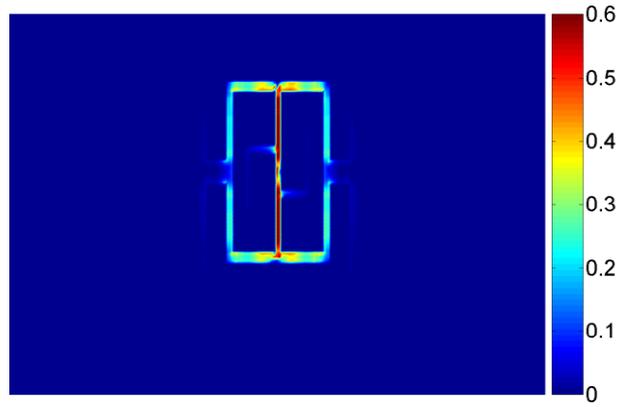
Impédance de l'antenne patch

Frequency	Fundamental (2.45 GHz)	2nd harmonic (4.9 GHz)	3rd harmonic (7.35 GHz)
R_{in} (Ω)	48.9	16	16
X_{in} (Ω)	5.2	-14	30.9

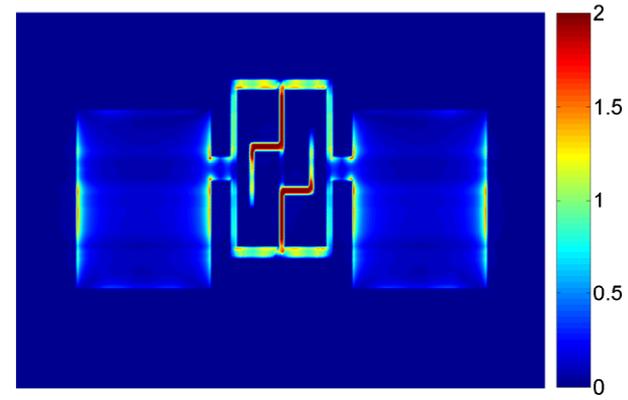
3. Modélisation numérique FDTD-3D

Rectenna symétrique à double antenne patch : cartographies du courant J_s

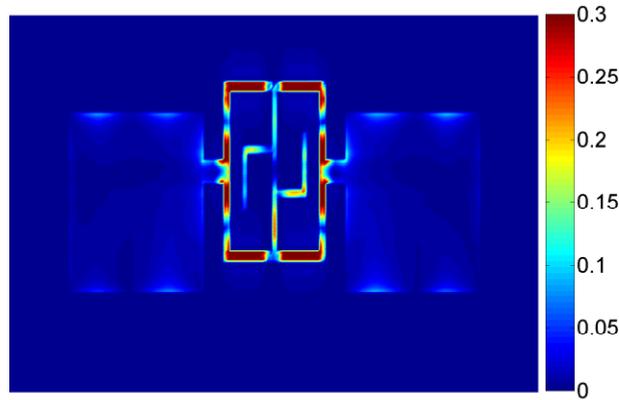
E = 19 V/m ; $\rho = 96 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



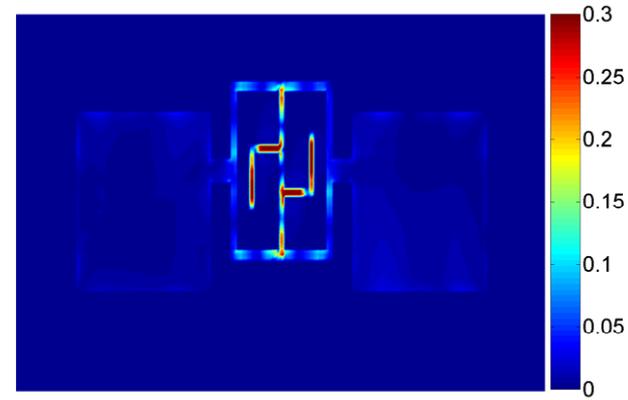
DC



$f_0 = 2.45 \text{ GHz}$



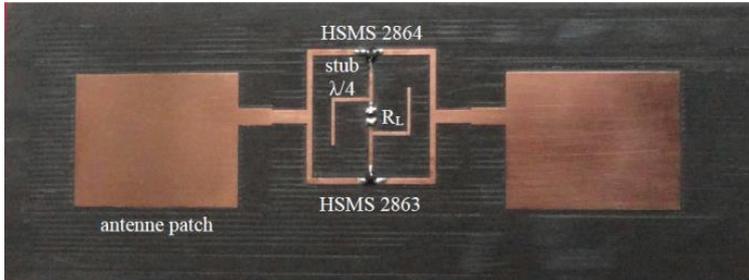
$2.f_0 = 4.9 \text{ GHz}$



$3.f_0 = 7.35 \text{ GHz}$

4. Validation expérimentale et résultats

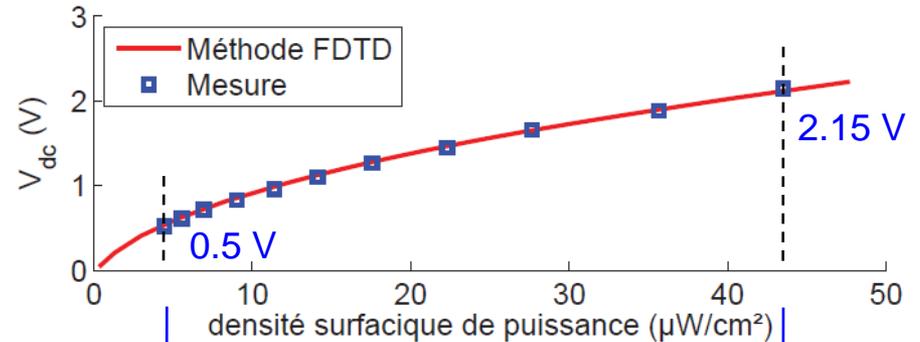
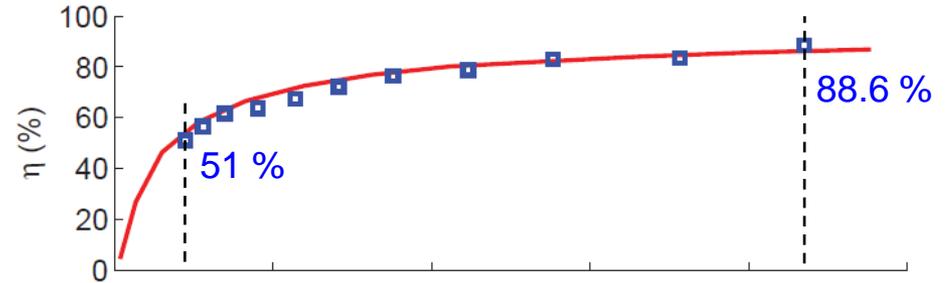
Mesures en fonction de la densité surfacique de puissance (ρ)



○ Mesures :

Gain du patch: 6.2 dBi à $\theta = 0^\circ$

Surface effective du patch : $\sim 50 \text{ cm}^2$

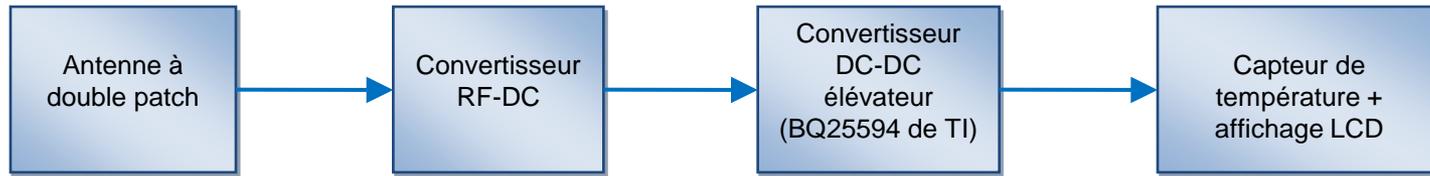


$E = 4.1 \text{ V/m}$
 $\rho = 4.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
 $P_{RF} = 0.45 \text{ mW} (-3.5 \text{ dBm})$

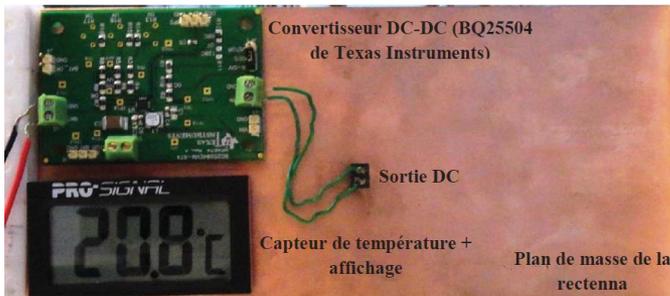
$E = 12.8 \text{ V/m}$
 $\rho = 43.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
 $P_{RF} = 4.5 \text{ mW} (6.5 \text{ dBm})$

5. Application

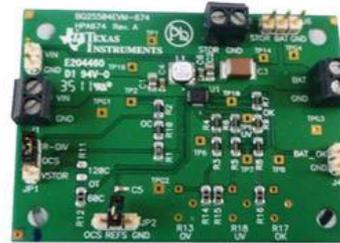
Alimentation à distance d'un capteur de température



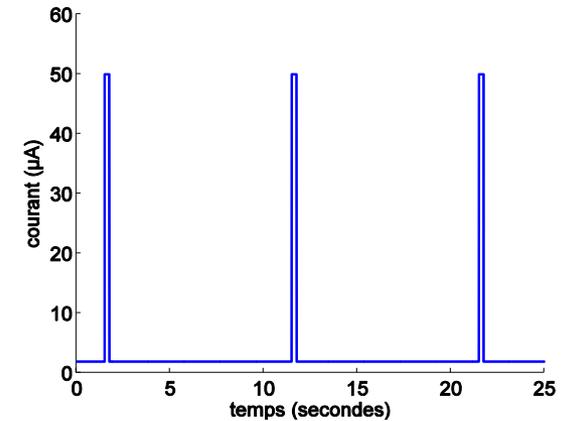
a. schéma bloc du démonstrateur



b. Prototype du capteur autoalimenté



c. Convertisseur DC/DC élévateur (BQ25504 de TI)

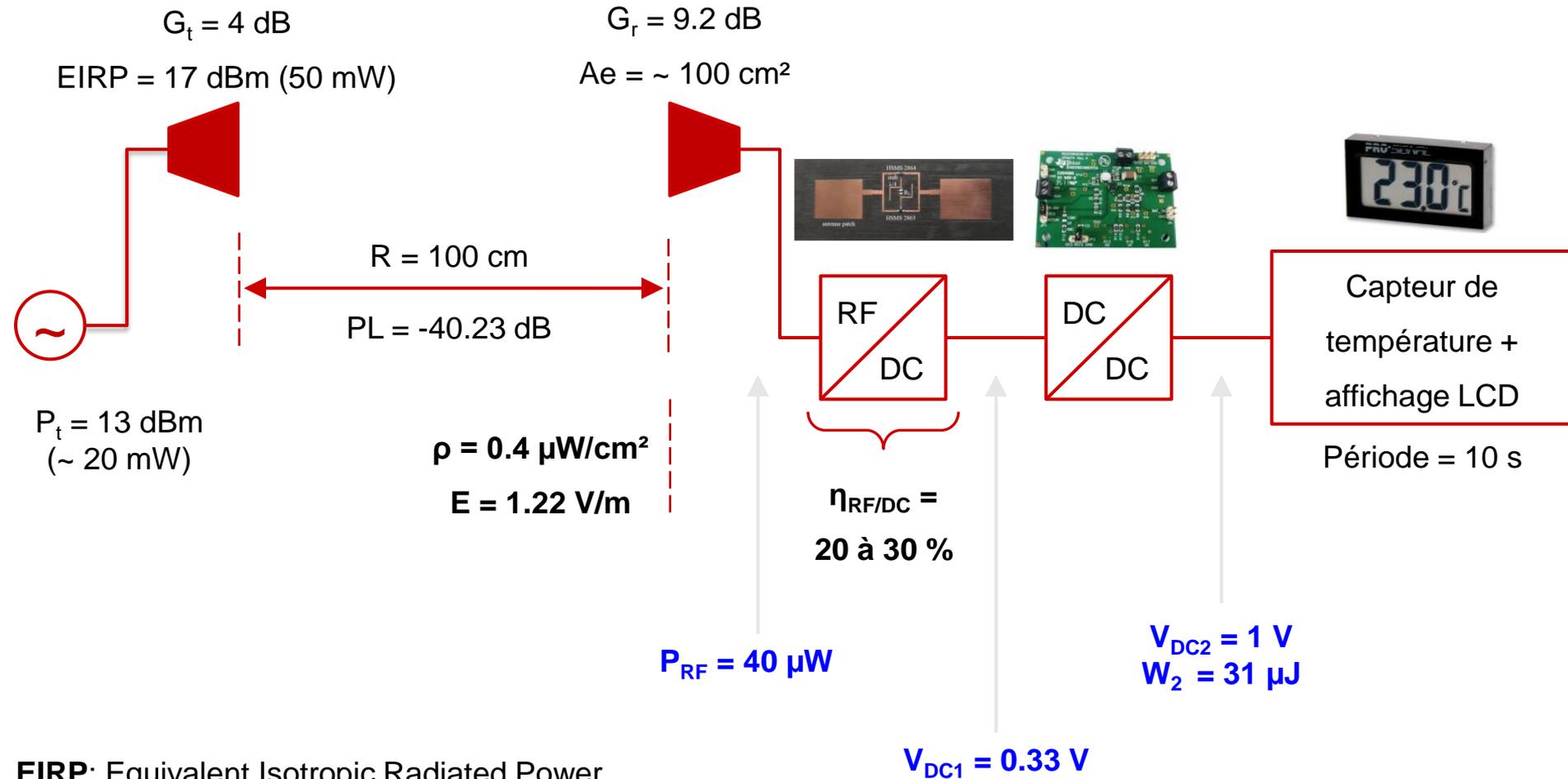


d. profil de consommation du capteur (mesure sous 1V)

Tension (V)	Courant en veille (µA)	Courant en mode actif (µA)	Durée de la mesure (ms)	énergie (µJ)	Période (s)
1.5	4.3	80	124	79	10
1.4	3.8	75	144	68	10
1.3	3.3	70	156	56	10
1.2	2.9	60	172	47	10
1.1	2.4	55	200	38	10
1	1.9	50	248	31	10

5. Application

Alimentation à distance d'un capteur de température



EIRP: Equivalent Isotropic Radiated Power
PL: Path Loss

6. Conclusions et perspectives

- Rectenna efficace en bande ISM à 2.45 GHz avec un rendement de 88%.
- Outil de simulation basé sur la méthode FDTD: Analyse fine et meilleure compréhension du fonctionnement.
- Bonne concordance entre FDTD et mesures ($\Delta\eta < 3\%$).
- Alimentation d'un capteur de température, consommant 31 μJ toutes les 10 secondes, à partir de $\rho = 0.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ($E = 1.22 \text{ V}/\text{m}$).
- Opter pour des rectennas miniatures et à polarisation circulaire.
- Étendre l'application à un capteur communicant doté de fonctionnalités de traitement avancées.
- Effectuer des mesures en ambient : TNT, GSM 900/1800, UMTS, LTE, WiFi ...

Conception et Mesure d'un Circuit Rectenna en Bande ISM à 2.45 GHz

Application à l'Alimentation d'un Capteur de Température

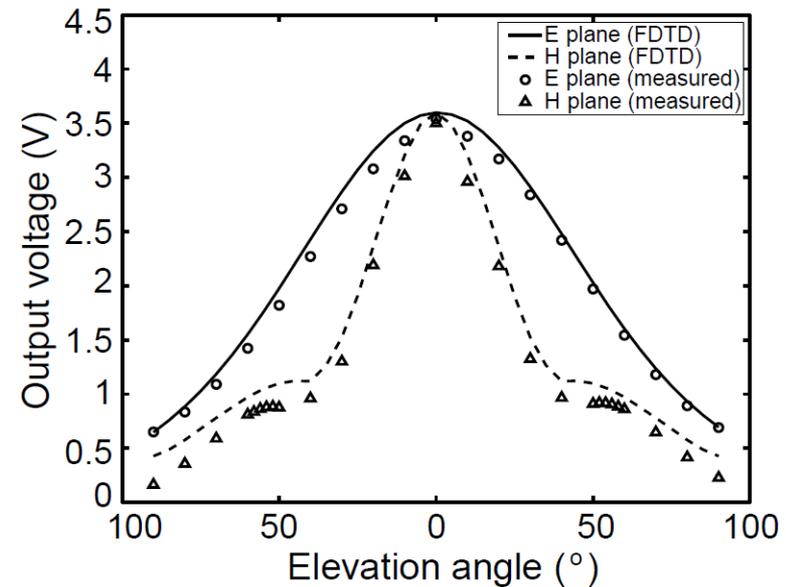
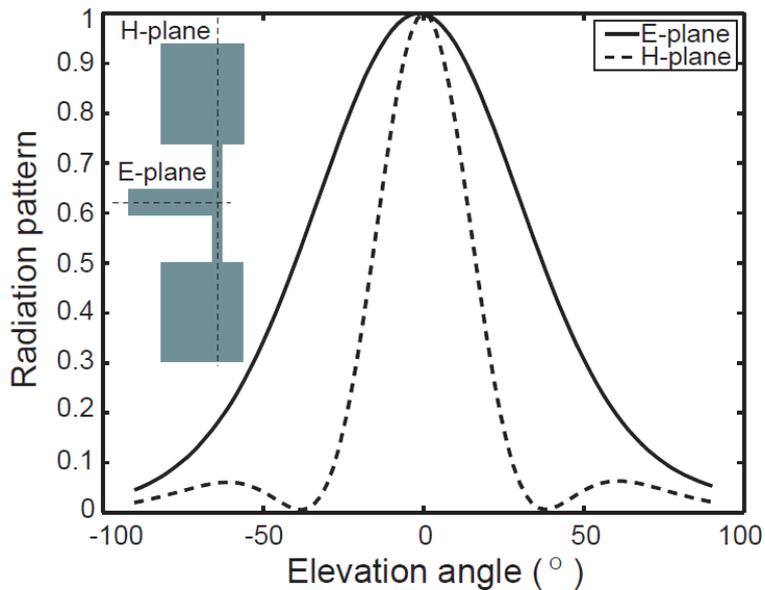
Hakim TAKHEDMIT, Laurent CIRIO et Odile PICON

Université Paris-Est Marne-la-Vallée
Laboratoire ESYCOM (EA 2552)



4. Validation expérimentale et résultats

Mesures en fonction de l'angle d'élévation (θ)



4. Validation expérimentale et résultats

Mesures en fonction de la densité surfacique de puissance (ρ)

