

# Conception de tags RFID sans puce, robustes, pour applications capteurs

Florian Requena, Nicolas Barbot,  
Darine Kaddour et Etienne Perret

Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, LCIS, F-26000 Valence, France

30/06/2022 Journée scientifique - « Communication par rétrodiffusion et rétro modulation »

# Sommaire

---

1. Contexte et problématiques liés aux applications capteur en RFID sans puce
2. Mesure de dilatation thermique de métaux
3. Mesure de température et d'humidité
4. Conclusion

# Contexte

L'essor considérable de la RFID s'accompagne actuellement par le développement de nombreuses familles qui cherchent à répondre à de nouvelles problématiques.

## Télépéage



Avec puce  
Avec batterie

## Badge d'accès



Avec puce  
Sans batterie

## Antivol



Sans puce  
Sans batterie

# Contexte

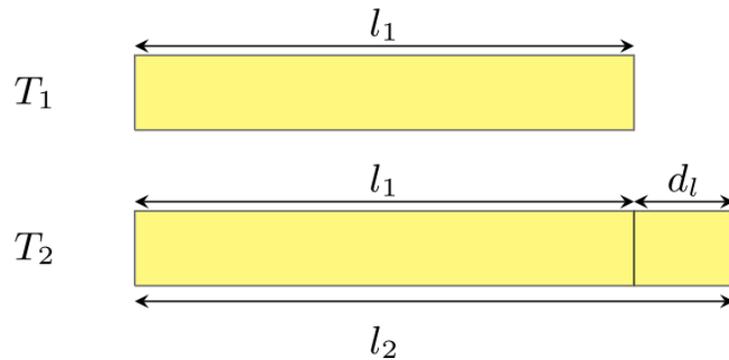
	Code à barres	RFID passif (UHF)	RFID chipless
Portée	30cm	10m	<1m
Nécessité de vision directe	✓	✗	✗
Imprimable	✓	Non (hors TFTC)	✓
Possibilité de capteur	✗	✓	✓
Lire plusieurs ID en même temps	Impossible	Possible	Limité
Coût	0,005 euro	0,20 euro	0,01 euro

# Dilatation thermique

---

# Dilatation thermique

La dilatation thermique est l'augmentation des dimensions d'un objet suite à une augmentation de température, à pression constante

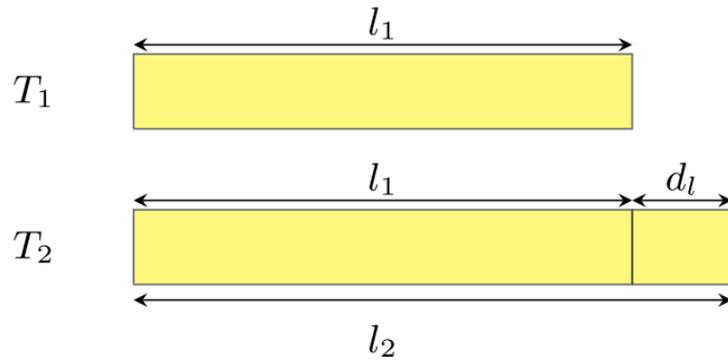


$$l_2 = l_1 + d_l = l_1 (1 + \alpha_{CTE} (T_2 - T_1))$$

Ce phénomène est caractérisé par la valeur de son CTE :  $\alpha_{CTE}$

Pour les métaux, cette expression est valide sur des domaines plus large que  $-20^\circ\text{C} \setminus 100^\circ\text{C}$

# Dilatation thermique



$$l_2 = l_1 + d_l = l_1 (1 + \alpha_{CTE} (T_2 - T_1))$$

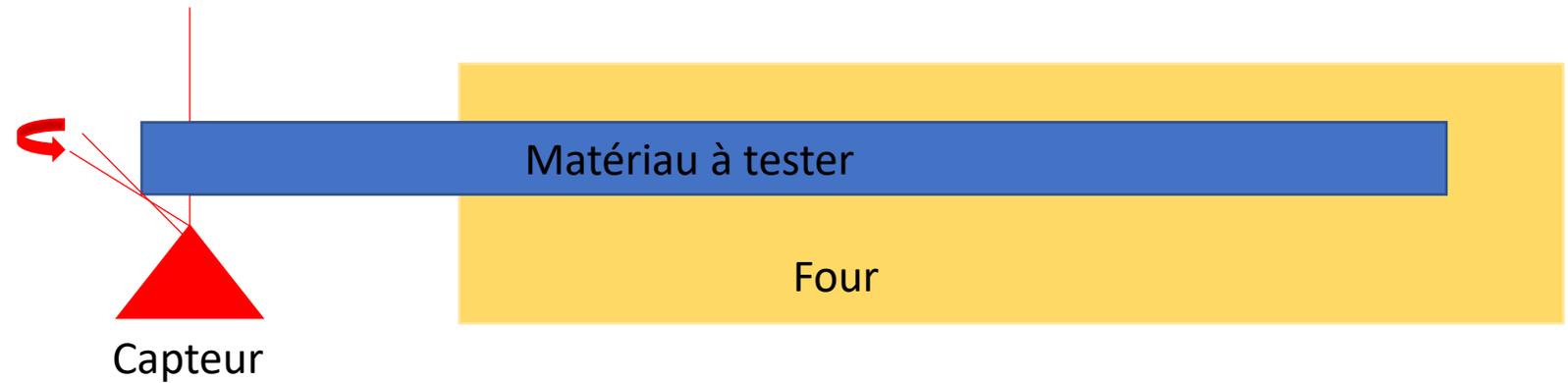
$$\text{AN : } l_1 = 5\text{cm}, \alpha = 31 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, dT = 20^\circ\text{C} \Rightarrow d_l = 30\mu\text{m}$$

Material	Coefficient of thermal expansion [ $^\circ\text{C}^{-1}$ ]
Zinc	$31 \times 10^{-6}$
Copper	$17 \times 10^{-6}$
Titanium	$8.5 \times 10^{-6}$
Nickel	$13 \times 10^{-6}$
Aluminium	$23 \times 10^{-6}$
Bronze	$17 \times 10^{-6}$
Tungsten	$4.5 \times 10^{-6}$

# Etat de l'art

Il existe un grand nombre de bancs de mesure de CTE, basés sur des principes différents : mécaniques, optiques, ...

Exemple d'un banc mécanique:



Les premiers bancs de mesure de dilatation se basent sur un contact physique entre le capteur et l'échantillon.

Par transfert thermique, le banc de mesure se dilate aussi et introduit des erreurs => des bancs de mesure sans fil ont commencé à être développés.

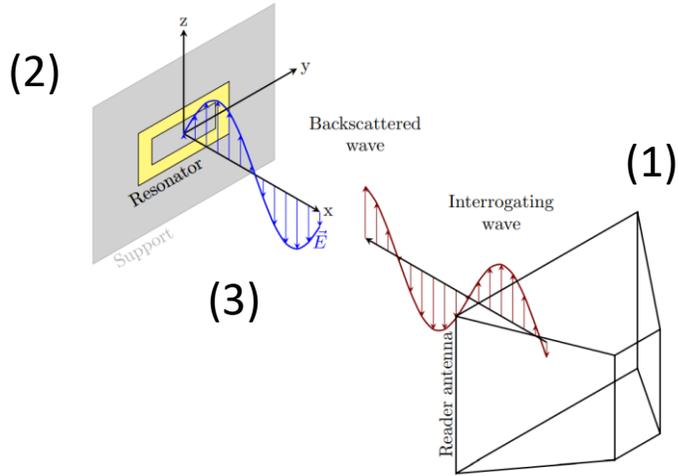
## Etat de l'art

	Mecanical (push-rod)	Optical (microscope)	Optical (interference)	X-ray
Error on CTE	4% [19]	6% [7]	<1% [20]	6% [21]
Materials adaptability	Very good	Good	Good	Only crystals
Contactless	No	Yes	Depend	Yes
Alignment accuracy	Not needed	Needed	Needed	Needed
Sample preparation	Minimal	-	Depend	Extensive
Equipment cost	Low	Medium	High	High
Standardized	[9]	No	[10]	No

Aucun banc RF

J. D. James, J. A. Spittle, S. G. R. Brown and R. W. Evans, "A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. R1-R15, Mar. 2001.

# Principe



Banc de mesure RF - approche radar à courte distance:

Une antenne d'émission va émettre une onde EM en direction de la cible (1).

La cible va capter et réfléchir une partie de cette onde (2).

L'onde réfléchie va alors pouvoir être captée de nouveau par l'antenne d'émission (3).

Aluminium

Nickel

Cuivre

Zinc



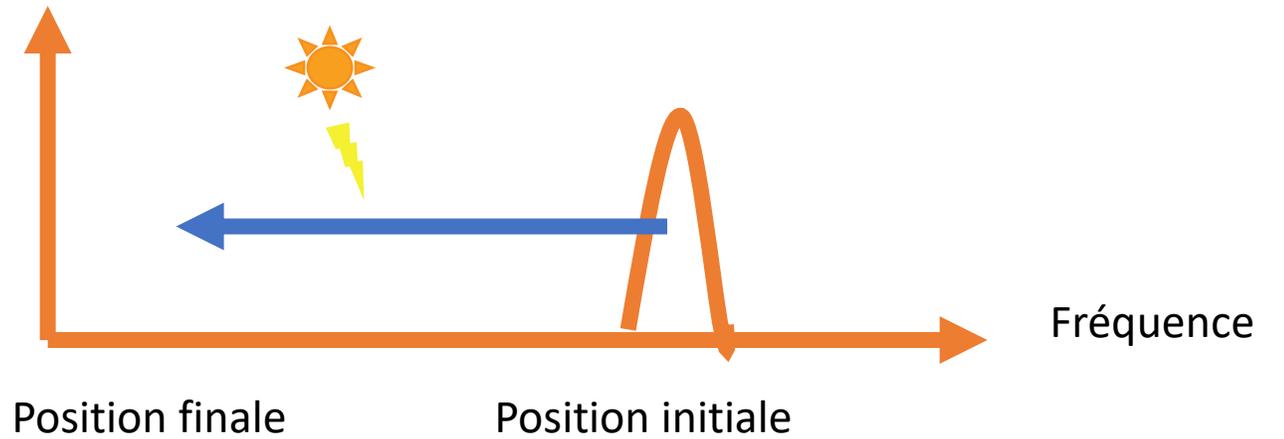
# Principe

$L(T)$  : dilatation thermique



$$L(T) = L(0)(1 + \alpha_{CTE} * T)$$

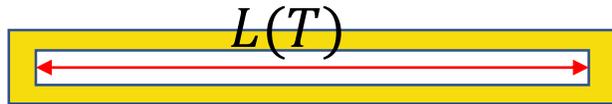
RCS



## Caractérisation de la dilatation

La fréquence de résonance d'un résonateur boucle dans l'air est liée à sa géométrie et donc à la température par la formule suivante :

$$f_r(T) = \frac{c}{2L(T)} \cong \frac{c}{2L} (1 - \beta T)$$



$$\beta = \alpha_{cte} \frac{l + 2K \Delta l}{l + 2\Delta l}, \quad L = l + \Delta l$$

\* Requena, F., Barbot, N., Kaddour, D., & Perret, E. (2020). Contactless characterization of metals' thermal expansion coefficient by a free-space RF measurement. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(2), 1230-1234.

# Mesure en chambre climatique

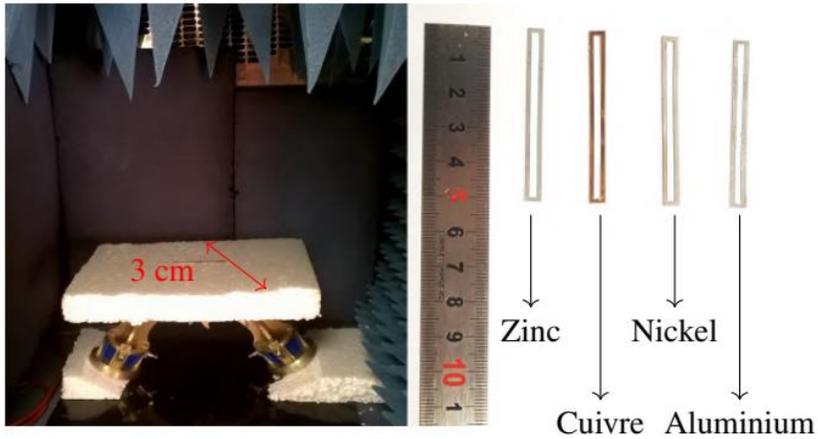
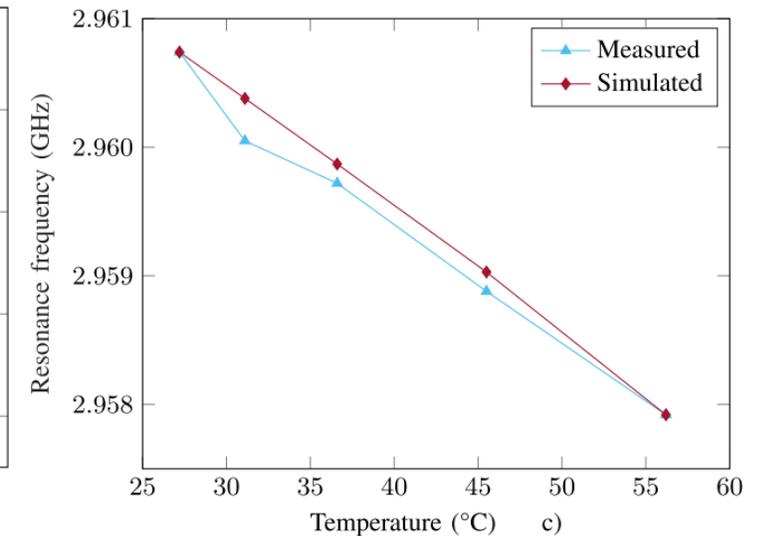
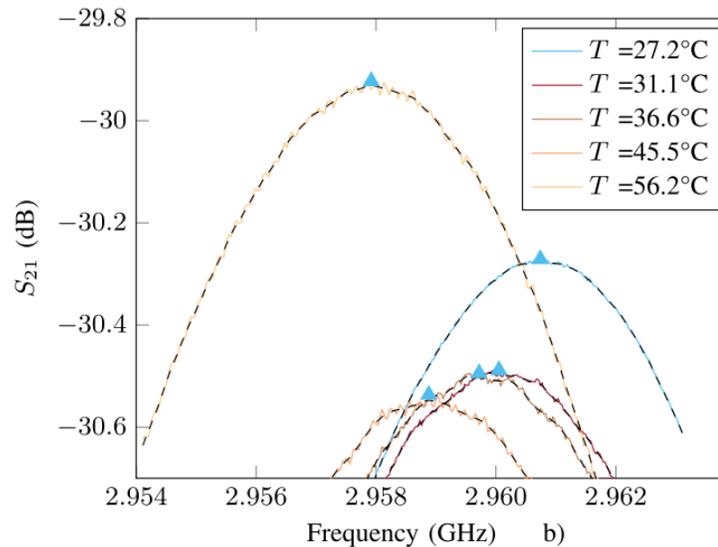
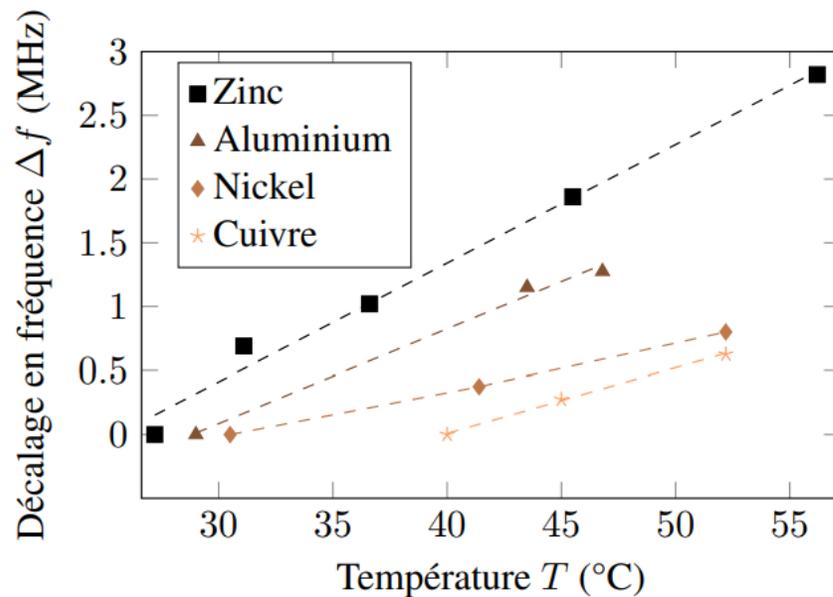


Photo du banc de mesure utilisé (chambre climatique) avec des résonateurs réalisés avec différents métaux (pureté >99%)

Paramètres S et fréquence de résonance de la boucle en Zinc



# Résultats

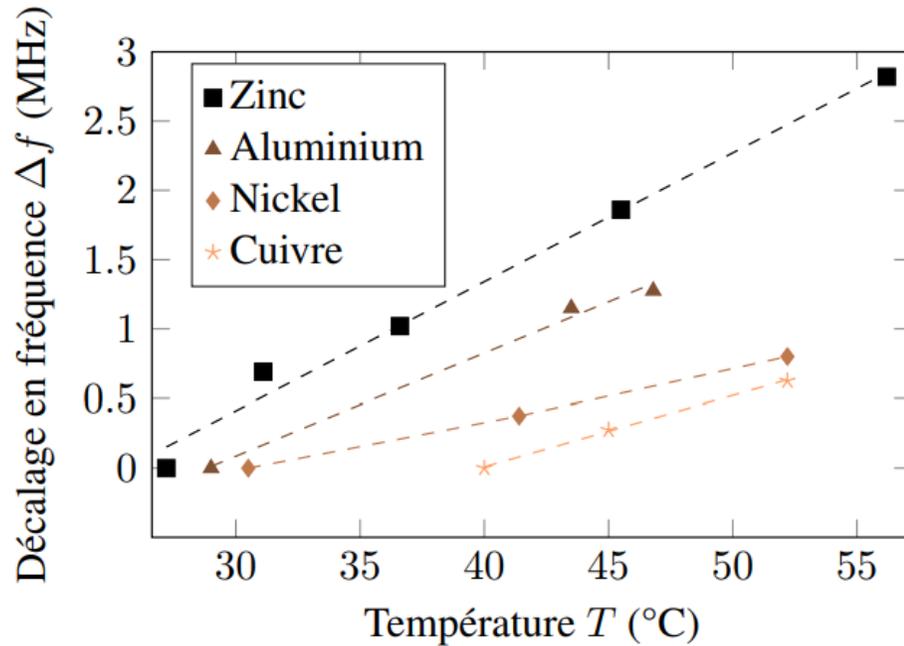


Métal	CTE ( $\times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ )		Différence en %
	Fournisseur	avec (4)	
Zinc	31.0	31.03	0.09
Cuivre	17.0	16.96	0.2
Nickel	13.3	12.43	6
Aluminium	22-25	22.1	-

$$\Delta f \simeq f_1 \beta (T_2 - T_1).$$

$$\beta = 1.01\alpha.$$

# Résultats



Métal	CTE ( $\times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ )		Différence en %
	Fournisseur	avec (4)	
Zinc	31.0	31.03	0.09
Cuivre	17.0	16.96	0.2
Nickel	13.3	12.43	6
Aluminium	22-25	22.1	-

## Remarque :

- Variation minimale de longueur mesurée :  $l = 3.6 \mu\text{m}$
- Nickel : plus d'erreur  $\Rightarrow$  CTE faible (shifts), conductivité faible (Q-factor)

# Mesure de température

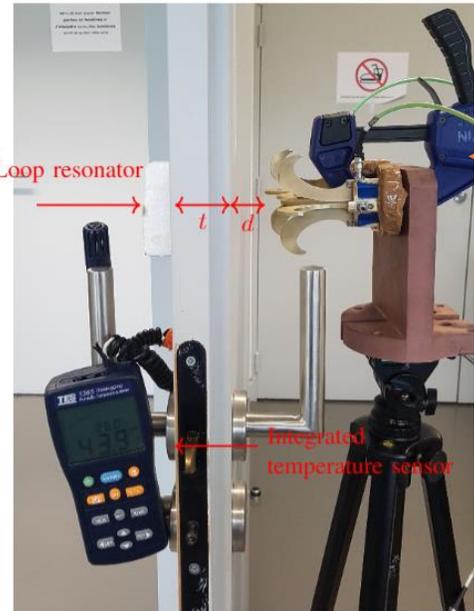
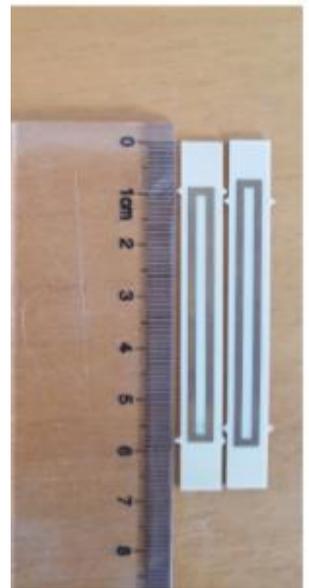
$$f_2 = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{eff}}L_2} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{eff}}L_1(1 + \beta \Delta T)}$$

On peut aussi utiliser un résonateur de métal connu ( $\alpha$ ) et mesurer la température. (Le substrat est pris en compte pour positionner le résonateur mais aussi car il permet d'augmenter la sensibilité du capteur.)

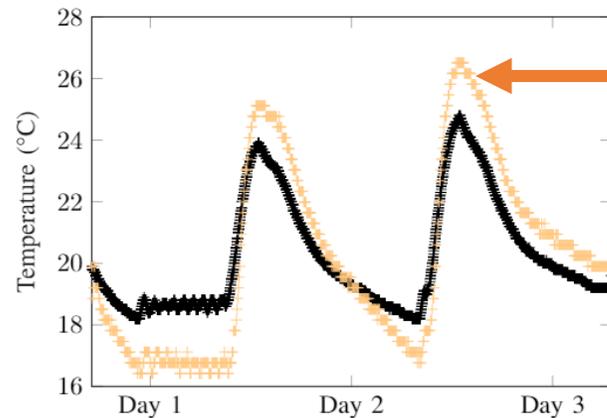


# Capteur RFID sans puce de température

## Mesures préliminaires en environnement réel



Measurement set	Antenna configuration	$d$	$t$	Support type
1	mono-static	0cm	3cm	Polystyrene
2	bi-static	0cm	12cm	Polystyrene
3	bi-static	10cm	4cm	Wooden door
4	bi-static	10cm	5mm	Glass



Erreur de mesure

Compatibilité avec la fonctionnalité d'indentification

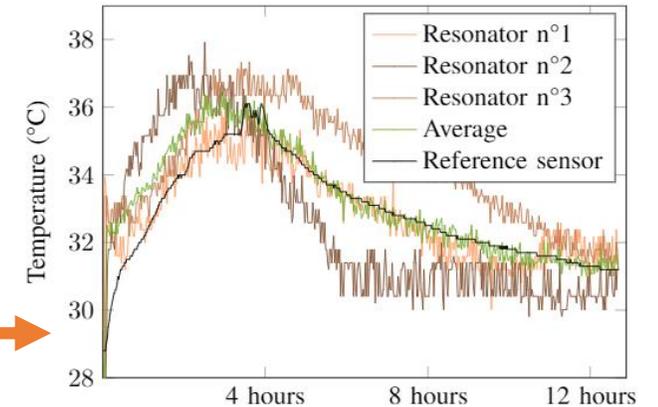
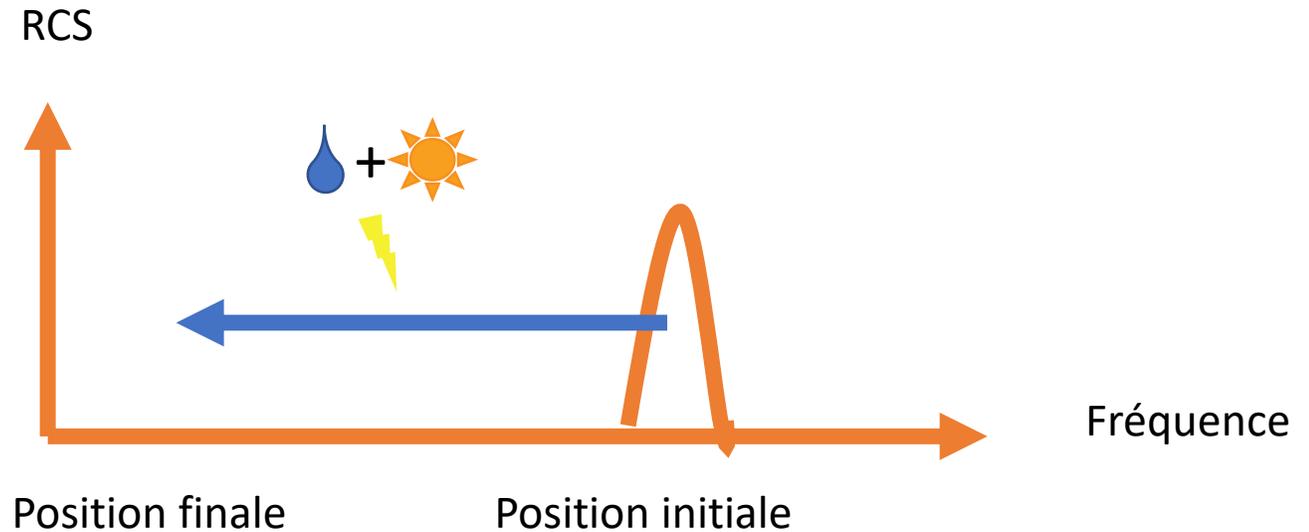


Fig. 13. Comparison between the temperature measured with an integrated sensor in black and using the loop resonator in yellow during a weekend for the test-bench n°1.

Fig. 19. Comparison between the temperature measured with an integrated sensor in black and using the different resonators that compose the RFID tag.

# Capteur RFID sans puce de température et d'humidité



Que ce passe t-il lorsque la température ET l'humidité varient (cas réel) ?

- Le capteur de température va interpréter les variations d'humidité comme variations de température => Erreurs
- Le capteur d'humidité va interpréter les variations de température comme variations d'humidité => Erreurs

30/06/2022 Journée scientifique - « Communication par rétrodiffusion et rétro modulation »

# Capteur RFID sans puce de température et d'humidité



Figure 13. Dielectric Constant vs. Relative Humidity, Type HN Film, 25 μm (1 mil)

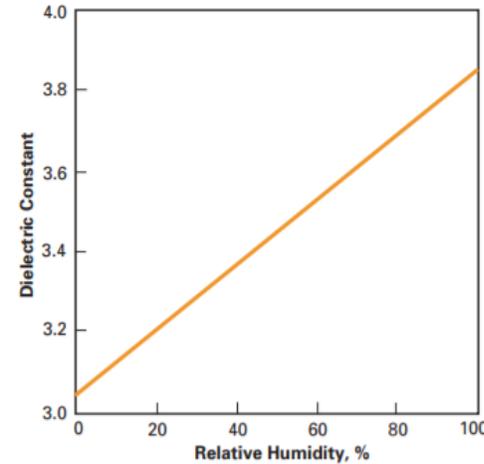
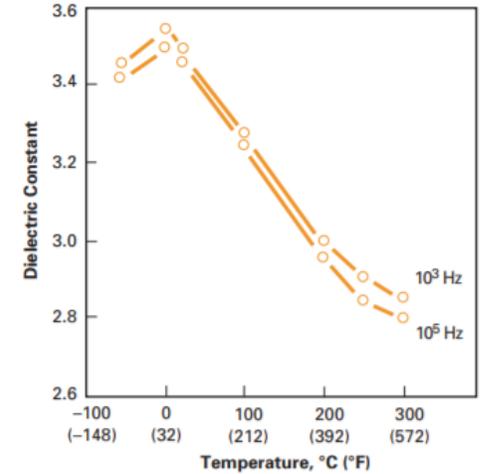


Figure 15. Dielectric Constant vs. Temperature, Type HN Film, 25 μm (1 mil)



Dépendance en humidité

$$a' = -RH_0 \frac{\epsilon'_r(RH_0)}{\epsilon_r(RH_0)} \quad \gamma = \frac{\epsilon'_r(RH_0)}{\epsilon_r(RH_0)}$$

$$f_r(T, RH) = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{eff}(T, RH)L(T)}} \cong \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{eff}L}} (1 - \alpha T - [a' + \gamma RH]) \quad [4]$$

Dépendance en température

$$\alpha = \alpha_c + \frac{\alpha_d}{2} \quad \text{Dépendance thermique sur la permittivité}$$

Dilatation thermique

$$\alpha_c = \alpha_{cte} \frac{l + K \Delta l}{l + \Delta l}$$

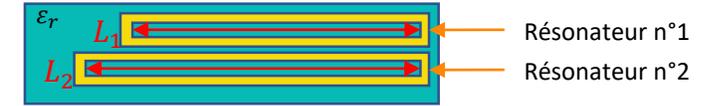
$$\alpha_d = \frac{\beta q \epsilon_r}{2 + q(\epsilon_r - 1)}$$

[4] Requena, F., Gilch, M., Barbot, N., Kaddour, D., Siragusa, R., Costa, F., ... & Perret, E. (2021). Thermal Modeling of Resonant Scatterers and Reflectometry Approach for Remote Temperature Sensing. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69(11), 4720-4734.

# Capteur RFID sans puce de température et d'humidité

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & 1 \\ \alpha_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ \gamma RH + a' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - f_1 \frac{2L_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \\ 1 - f_2 \frac{2L_2 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \end{pmatrix}$$

$\alpha$  prend en compte les effet thermiques  
 $\gamma$  et  $a'$  prennent en compte l'humidité



La température  $T$  et l'humidité  $RH$  sont estimés avec la mesure de fréquence de résonance  $f_i$  de deux résonateurs

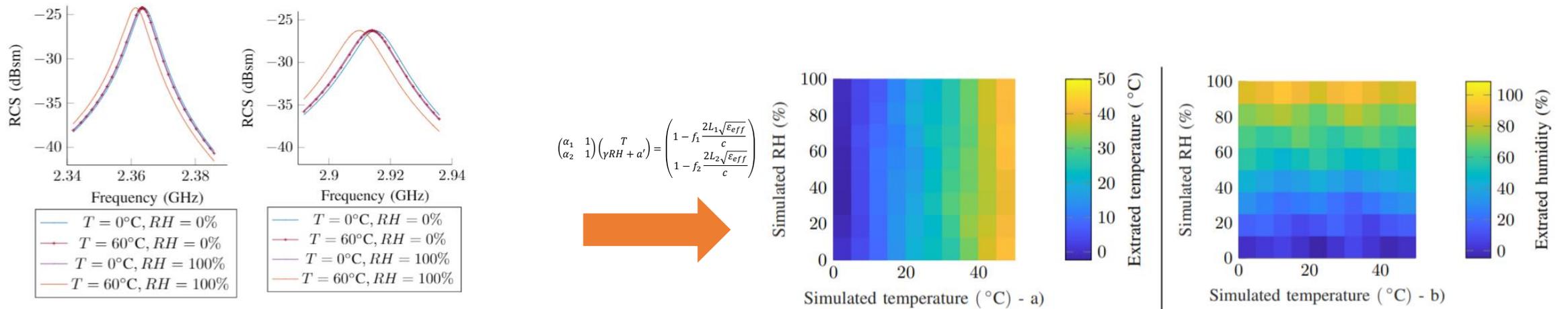
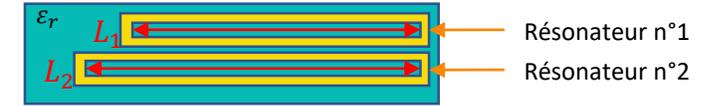


Fig. 3. Simulated RCS response of a sensing tag composed of two scatterers for different temperature and humidity.

# Capteur RFID sans puce de température et d'humidité

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & 1 \\ \alpha_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ \gamma RH + a' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - f_1 \frac{2L_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \\ 1 - f_2 \frac{2L_2 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \end{pmatrix}$$

$\alpha$  prend en compte les effet thermiques  
 $\gamma$  et  $a'$  prennent en compte l'humidité



La température  $T$  et l'humidité  $RH$  sont estimés avec la mesure de fréquence de résonance  $f_i$  de deux résonateurs

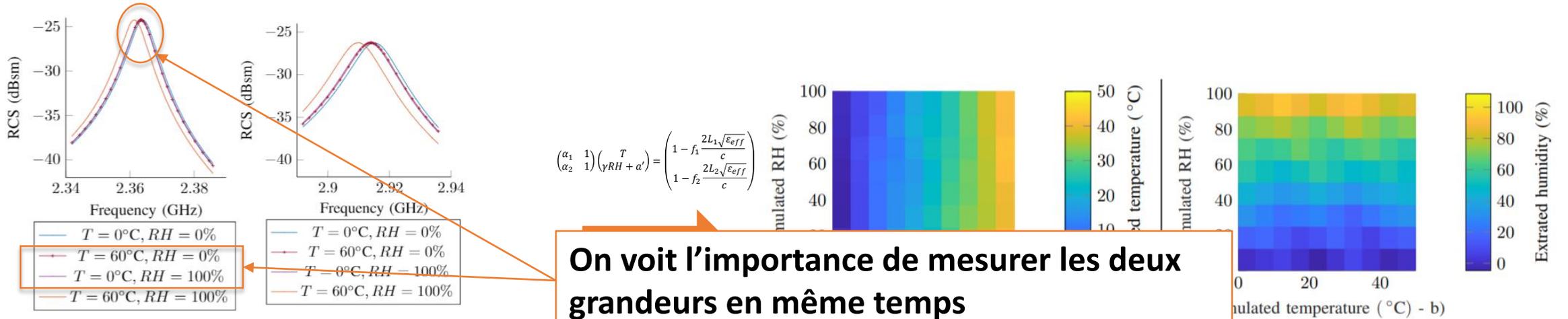
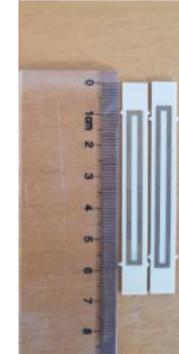


Fig. 3. Simulated RCS response of a sensing tag composed of two scatterers for different temperature and humidity.

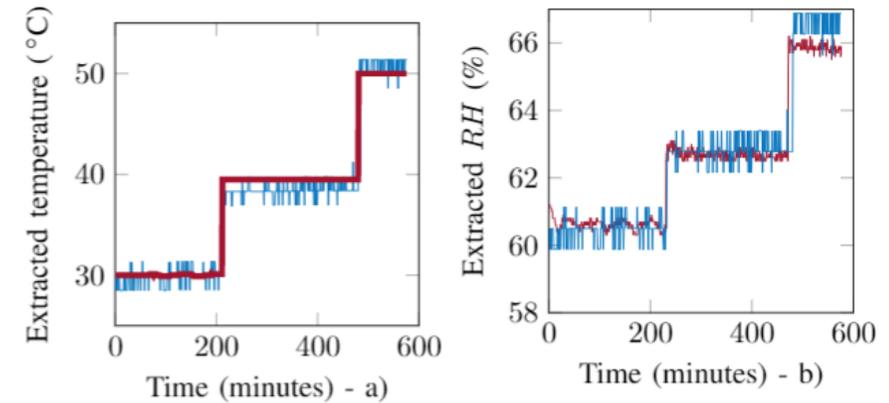
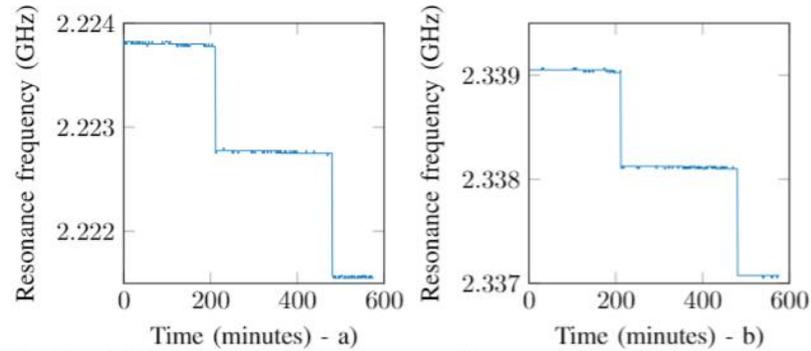
# Mesures en chambre climatique



Photo du banc de mesure à l'intérieur d'une chambre climatique

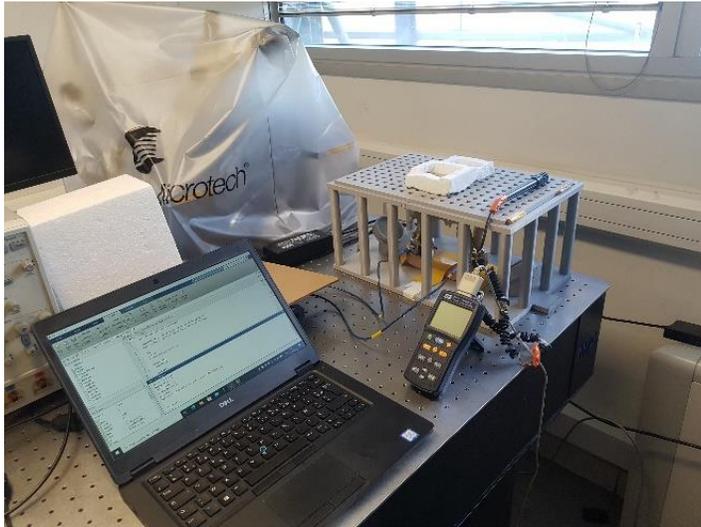


Les deux boucles utilisées pour la mesure (cuivre sur Rogers RO4003C)

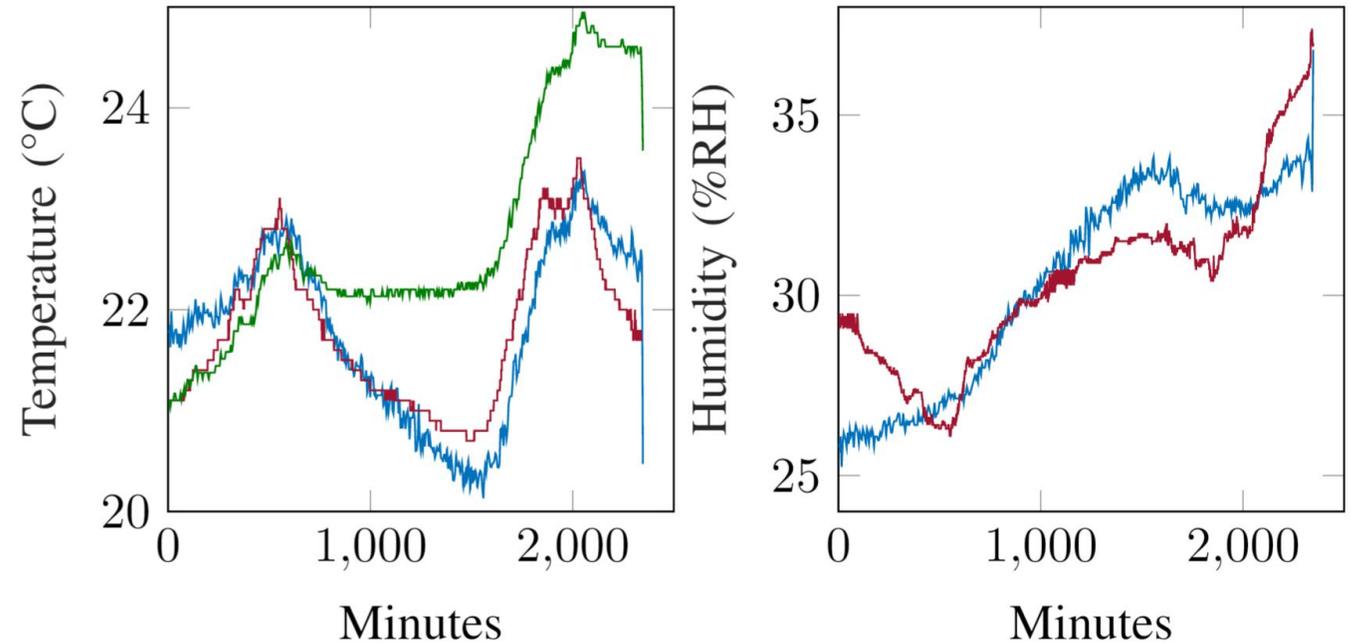


Température et humidité estimées avec l'approche RF en bleu comparées à un capteur électronique en rouge. En moyenne, les erreurs sont  $<0,7^{\circ}\text{C}$  et  $1,3\%RH$

# Mesures en environnement réel



Mesures en environnement réel



Température et humidité estimées avec l'approche RF en bleu comparées à un capteur électronique en rouge.

En vert, un capteur de temperature RF de l'état de l'art.

# Caractérisation de diélectrique

Précédemment,  $T$  et  $RH$  étaient inconnus dans :

$$f_r(T, RH) \cong \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{eff}L}} (1 - \alpha T - [a' + \gamma RH])$$

En mesurant  $T$  et  $RH$ , il est possible de déterminer les coefficients  $\alpha$ ,  $\gamma$

Figure 13. Dielectric Constant vs. Relative Humidity, Type HN Film, 25  $\mu\text{m}$  (1 mil)

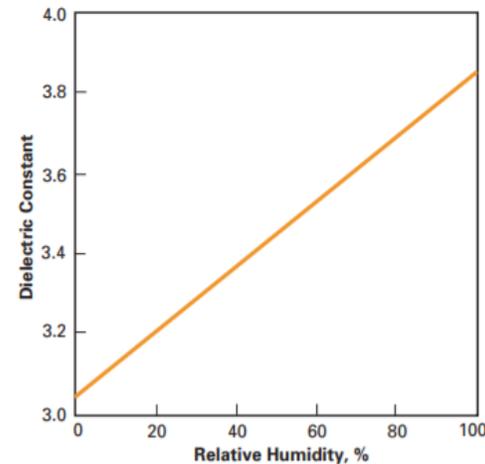
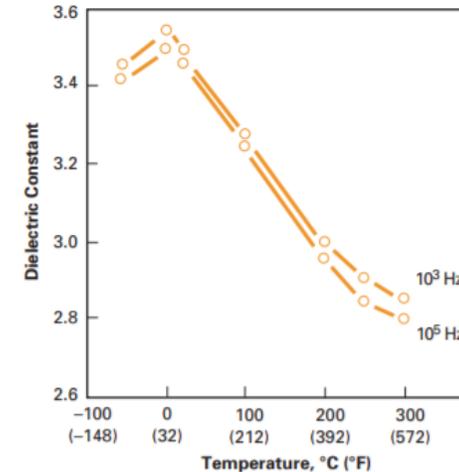
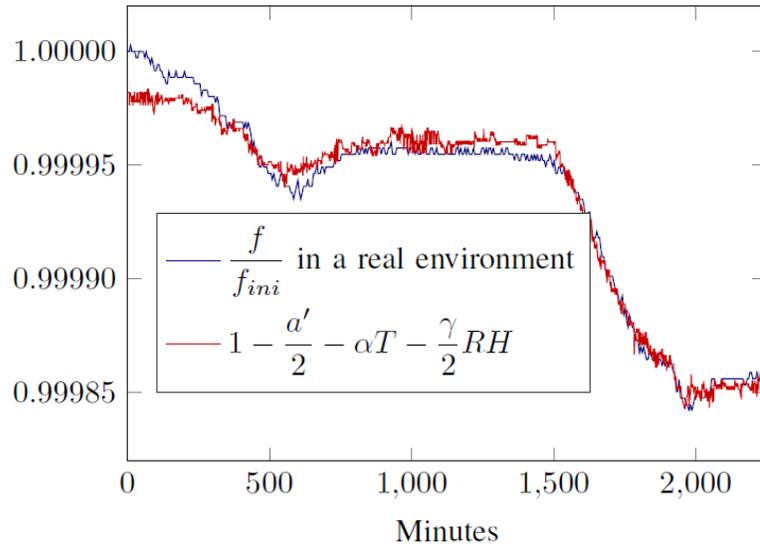


Figure 15. Dielectric Constant vs. Temperature, Type HN Film, 25  $\mu\text{m}$  (1 mil)



# Caractérisation de diélectrique

$$\frac{f}{f_{ini}} \simeq 1 - \frac{a'}{2} - \alpha T - \frac{\gamma}{2} RH$$



## Extraction des paramètres et répétabilité

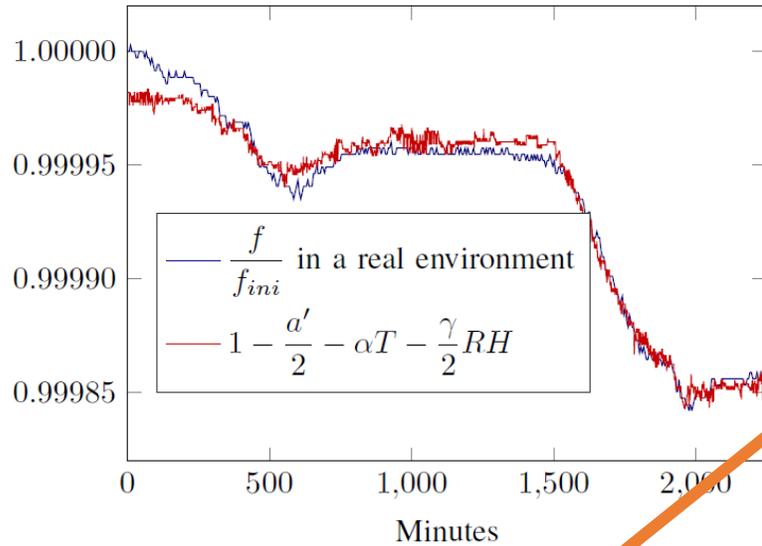
	Measure 1	Measure 2	Measure 3	Real environment
$\alpha$	$3.852 \times 10^{-5}$	$4.624 \times 10^{-5}$	$4.165 \times 10^{-5}$	$4.131 \times 10^{-5}$
$\gamma$	$2.658 \times 10^{-5}$	$3.108 \times 10^{-5}$	$2.926 \times 10^{-5}$	$2.836 \times 10^{-5}$
$a'$	0.004	0.006	0.006	0.004

## Détermination des « limites »

	Relative humidity range	Estimated $\gamma$ by fitting
Measure n°1	25-40 %	$2.836 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°2	60-70 %	$2.926 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	60-70 %	$2.934 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	70-75 %	$2.876 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	75-80 %	$2.808 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	80-85 %	$7.524 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	85-90 %	$13.754 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	90-95 %	$33.5 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$

# Caractérisation de diélectrique

$$\frac{f}{f_{ini}} \simeq 1 - \frac{a'}{2} - \alpha T - \frac{\gamma}{2} RH$$



$\alpha_{RO4003C} = 40,6 * 10^{-6}$  avec données fournisseur  
 $\gamma_{RO4003C}$ : non caractérisée par le fournisseur

## Extraction des paramètres et répétabilité

	Measure 1	Measure 2	Measure 3	Real environment
$\alpha$	$3.852 \times 10^{-5}$	$4.624 \times 10^{-5}$	$4.165 \times 10^{-5}$	$4.131 \times 10^{-5}$
$\gamma$	$2.658 \times 10^{-5}$	$3.108 \times 10^{-5}$	$2.926 \times 10^{-5}$	$2.836 \times 10^{-5}$
$a'$	0.004	0.006	0.006	0.004

## Détermination des « limites »

	Relative humidity range	Estimated $\gamma$ by fitting
Measure n°1	25-40 %	$2.836 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°2	60-70 %	$2.926 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	60-70 %	$2.934 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	70-75 %	$2.876 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	75-80 %	$2.808 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	80-85 %	$7.524 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	85-90 %	$13.754 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$
Measure n°3	90-95 %	$33.5 \times 10^{-5} \%RH^{-1}$

# Conclusion



Approche sans-puce: Faible coût, sans batterie, sans-fil, durée de vie infinie

Capteur : Isolation des paramètres physiques, erreurs  $<1^{\circ}\text{C}$  et 5%RH en environnement réel, compatible avec l'identification

Exemple d'applications :

- Température : surveillance de la chaîne du froid
- Humidité : surveillance de l'électroménager
- Banc de caractérisation de diélectrique, dilatation de métaux

# Questions

---

Merci pour votre attention

