

# Identification et lecture de capteurs sans fil par une technique d'imagerie radar polarimétrique

Dominique Henry et Hervé Aubert

GDR Ondes & ERC scatteredID  
Communication par rétrodiffusion et rétro modulation  
30-06-2022  
Laboratoire LCIS, Valence, France

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

**Objectif:** Mesurer des grandeurs physiques dans des conditions ou environnements particuliers

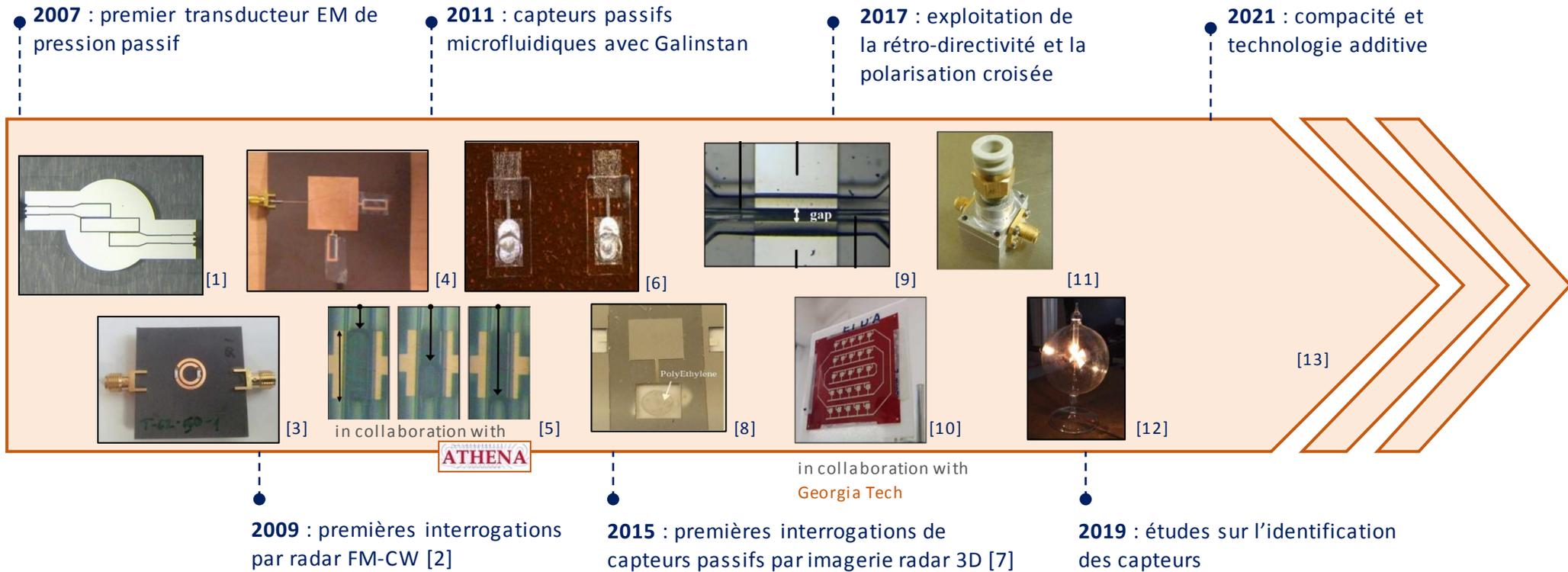
- environnements qualifiés de *complexes ou d'extrêmes*
  - températures extrêmes
  - radioactivité
- capteurs à faibles coût de production
- “*longues distances*” d’interrogation (>10m)
- applications multi-capteurs
- minimiser l’intervention humaine

Solution orientée vers les capteurs passifs.

## Travaux focalisés sur l'utilisation de radars millimétriques FM-CW pour l'interrogation de capteurs passifs [1]

- Radars **FM-CW** (fréquences de 24GHz et plus) aujourd'hui facilement disponibles sur le marché pour les applications ISM.
- Valeurs **SNR** intéressantes ( $\sim 0.25\text{dB}$  to  $0.5\text{dB}$ ) (selon la fréquence porteuse).
- Distances d'interrogation jusqu'à **10 m** (voir plus).
- Conception de capteurs de **faibles dimensions** en ondes millimétriques.
- Des techniques d'imagerie radars utilisées pour **l'interrogation...**
- ... et **l'identification** de capteurs.

[1] H. Aubert et al. "Measurement Device comprising an Electromagnetic Diffuser". WO2010/136388. Accessed on 2019-08-26. 29-05-2009.



[1] M.Jatlaoui *et al.*, EuMC 2007, München, Germany, 8-12 Oct 2007

[2] F.Chebila *et al.*, *IEEE AP-S.*, Toronto, Ontario, Canada, 2010

[3] T.Thai *et al.*, *IEEE Sensor Journal*, Sept 2012

[4] T.Thai *et al.*, *IEEE Transactions on Microwave Theory & Tech.*, March 2013

[5] S.Bouaziz, *et al.*, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* Dec 2012

[6] A.Traille *et al.*, *IEEE sensors 2011*, Limerick, Ireland, October 28-31, 2011

[7] D.Henry *et al.*, *IEEE IMS*, 17-22 May 2015, Phoenix, USA

[8] E.Debourg *et al.*, *IEEE Sensors*, Orlando, Florida, USA, 30 Oct. – 2 Nov. 2016

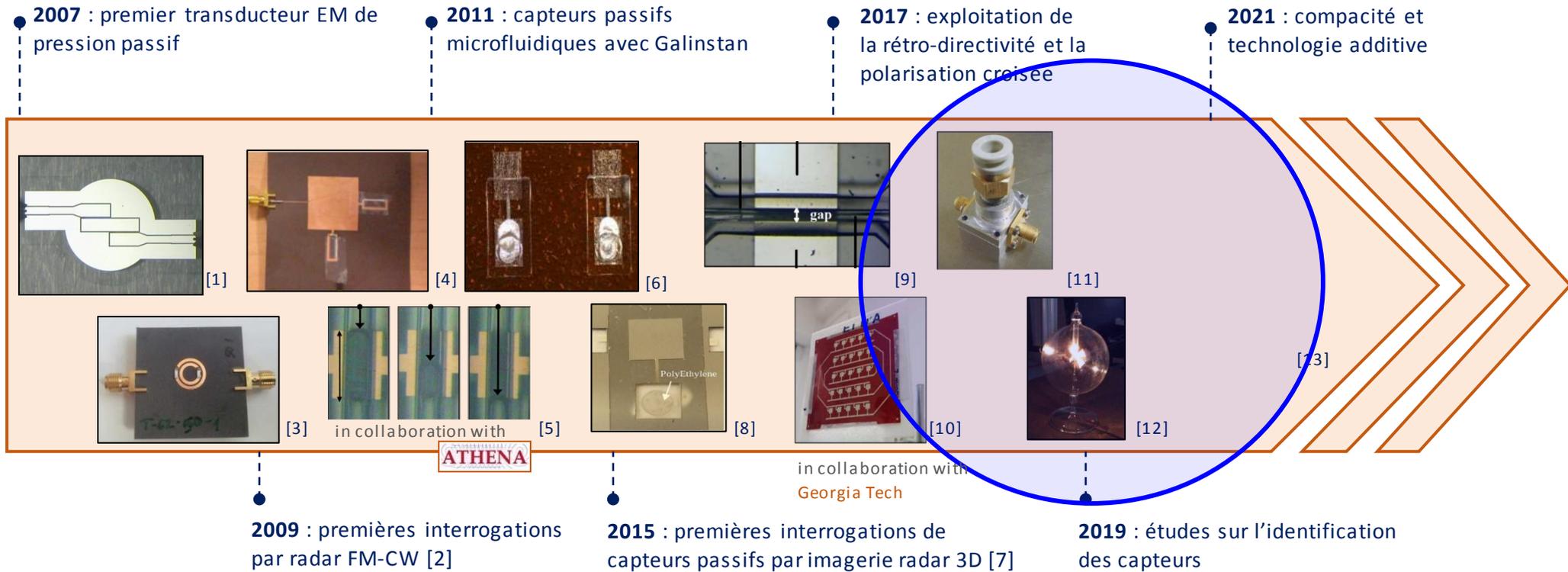
[9] D.Henry *et al.*, *Electronics Letters*, vol. 54, pp. 150–151, February 2018.

[10] D.Henry *et al.*, *IEEE TMTT*, vol. 65, pp. 5345–5354, December 2017.

[11] D.Henry *et al.*, *IEEE TMTT* vol. 69, no. 1, pp. 926-937, Jan. 2021

[12] D.Henry *et al.*, (EuCAP), 2021, pp. 1-5

[13] D.Henry *et al.*, to be published



[1] M.Jatlaoui *et al.*, EuMC 2007, München, Germany, 8-12 Oct 2007

[2] F.Chebila *et al.*, *IEEE AP-S.*, Toronto, Ontario, Canada, 2010

[3] T.Thai *et al.*, *IEEE Sensor Journal*, Sept 2012

[4] T.Thai *et al.*, *IEEE Transactions on Microwave Theory & Tech.*, March 2013

[5] S.Bouaziz, *et al.*, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* Dec 2012

[6] A.Traille *et al.*, *IEEE sensors 2011*, Limerick, Ireland, October 28-31, 2011

[7] D.Henry *et al.*, *IEEE IMS*, 17-22 May 2015, Phoenix, USA

[8] E.Debourg *et al.*, *IEEE Sensors*, Orlando, Florida, USA, 30 Oct. – 2 Nov. 2016

[9] D.Henry *et al.*, *Electronics Letters*, vol. 54, pp. 150–151, February 2018.

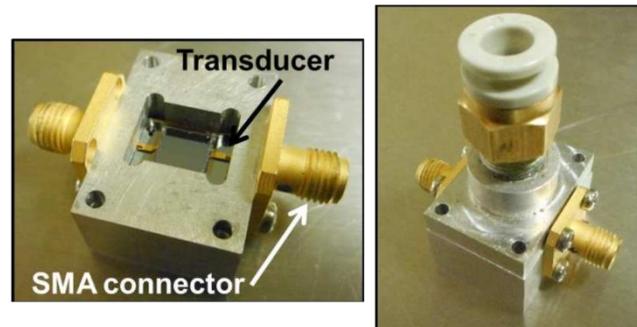
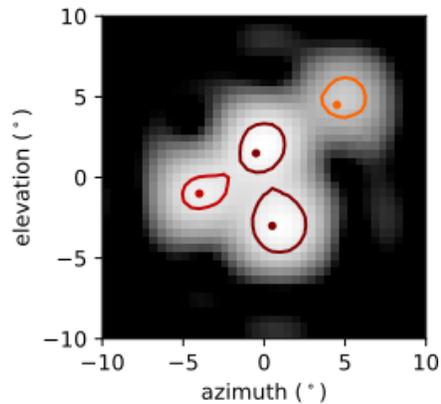
[10] D.Henry *et al.*, *IEEE TMTT*, vol. 65, pp. 5345–5354, December 2017.

[11] D.Henry *et al.*, *IEEE TMTT* vol. 69, no. 1, pp. 926-937, Jan. 2021

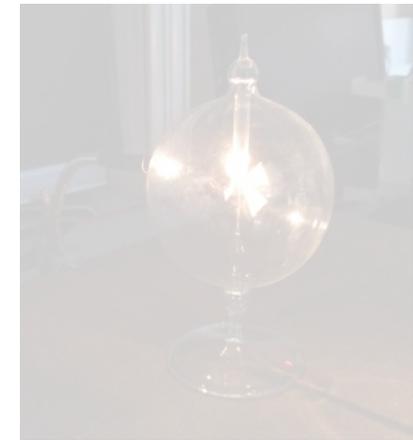
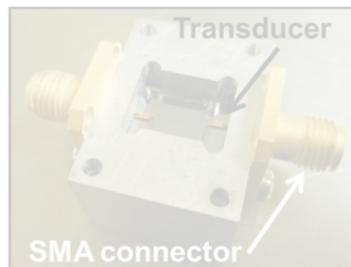
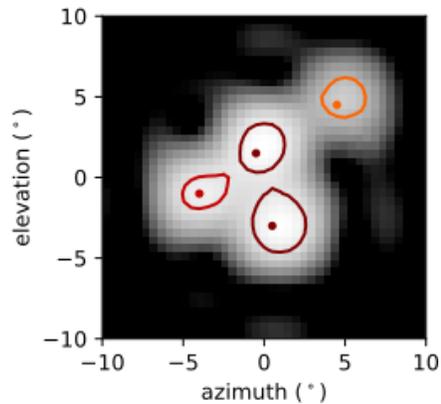
[12] D.Henry *et al.*, (EuCAP), 2021, pp. 1-5

[13] D.Henry *et al.*, to be published

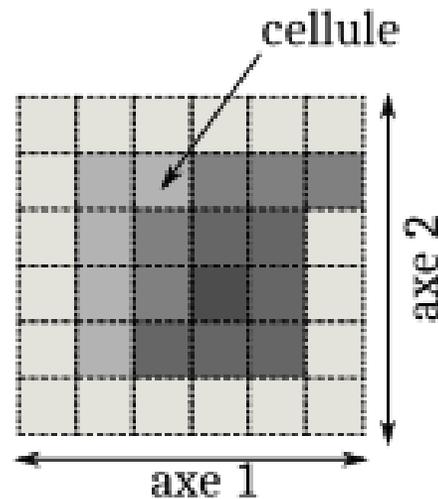
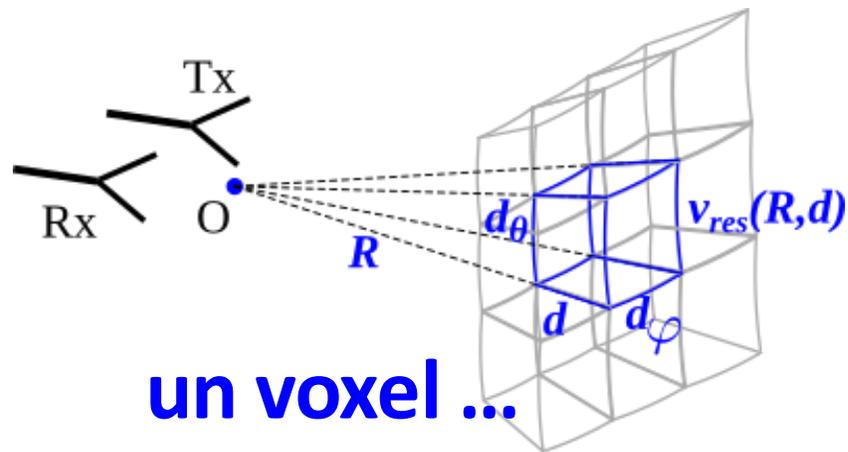
- Segmentation par isolignes
- Interrogation de capteurs de pression passifs sans fil
- Interrogation de capteur passif microfluidique fabriqué en technologie additive
- Interrogation de capteur passif par imagerie range-Doppler



- Segmentation par isolignes
- Interrogation de capteurs de pression passifs sans fil
- Interrogation de capteur passif microfluidique fabriqué en technologie additive
- Interrogation de capteur passif par imagerie range-Doppler



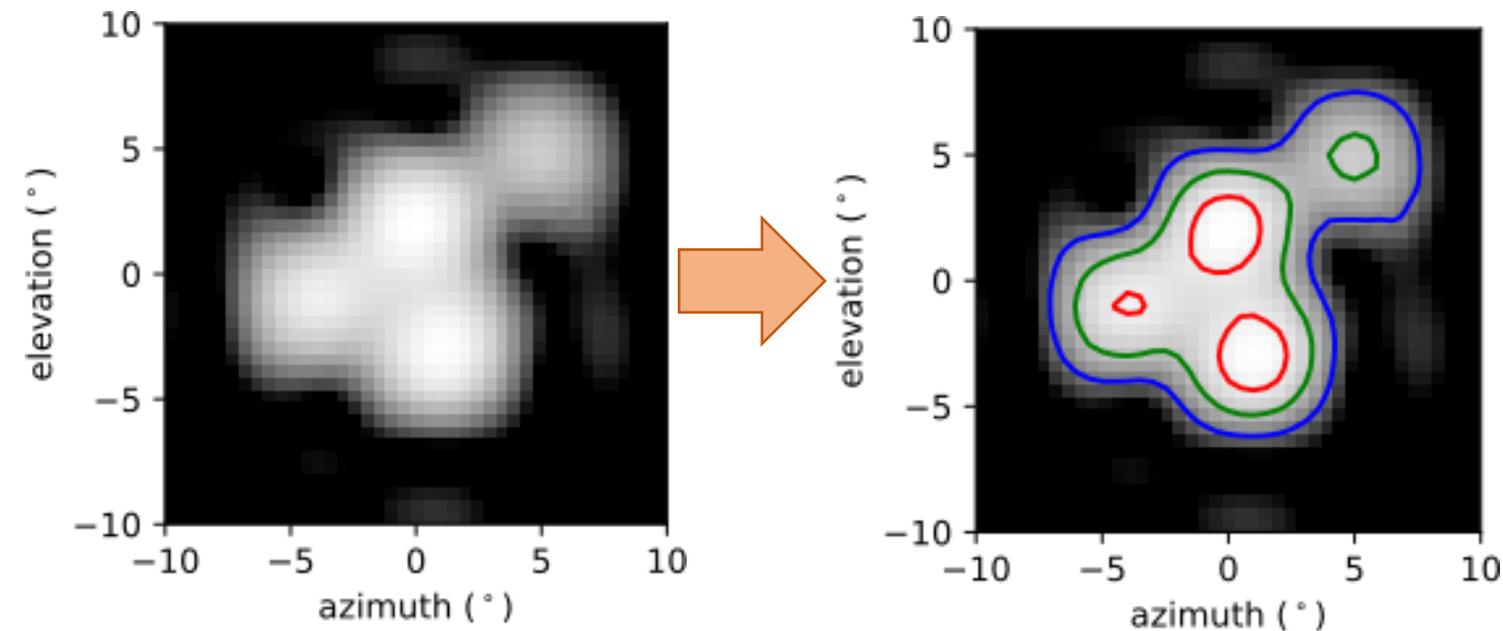
**Objectif:** segmenter les échos radars issus de données en 2 dimensions pour extraire des informations utiles à la lecture / et ou l'identification des capteurs.



- Les dimensions de l'image radar (axe 1, axe 2) peuvent correspondre aux axes slow-time et/ou fast-time suivant la méthode de balayage.
- Les niveaux d'échos de chaque cellule radar représentent l'amplitude du spectre de battement.

*Exemple : axe 1 : azimut  
axe 2 : élévation*

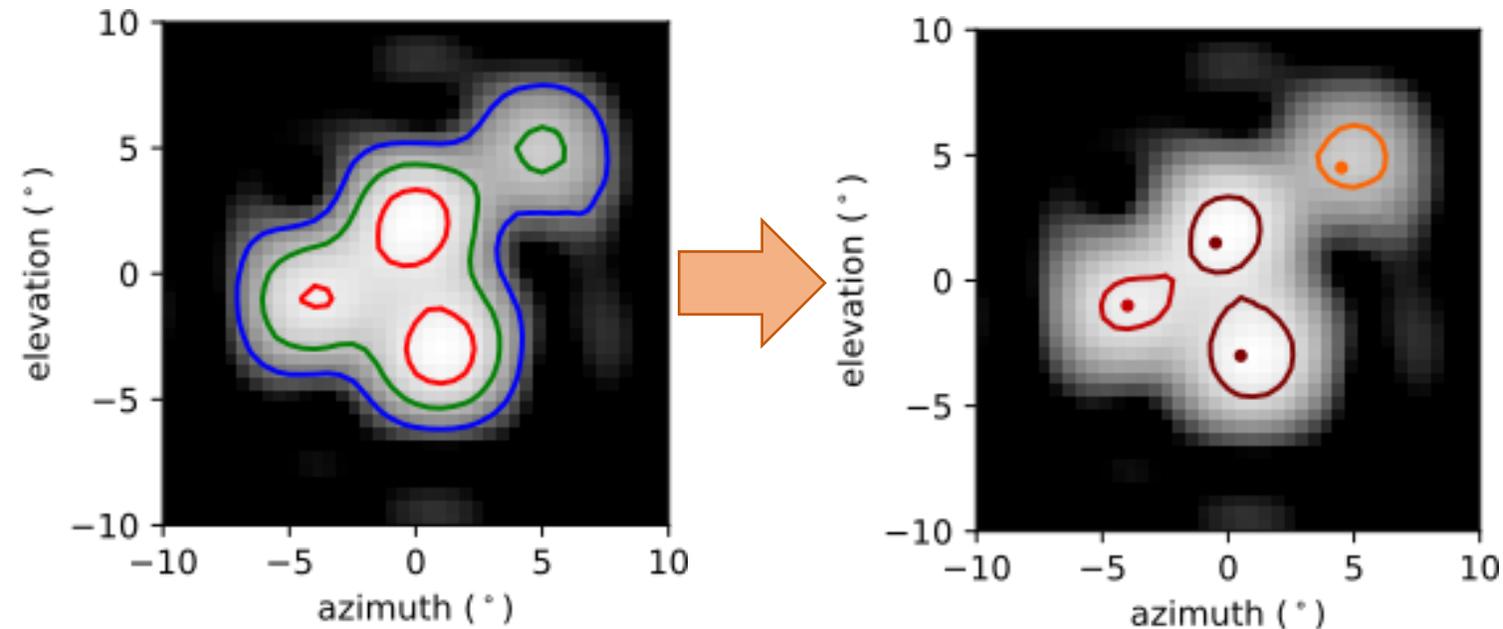
**Objectif:** segmenter les échos radars issus de données en 2 dimensions.



- Exemple avec une simulation de cibles de surfaces équivalentes radar différentes [1].
- Isolignes : lignes représentant des niveaux d'écho identiques.
- Problème : la segmentation dépend du niveau d'écho choisi.

[1] Stéfan van der Walt et al. "scikit-image: image processing in Python". In: PeerJ 2 (June 2014), e453. issn: 2167-8359. doi: 10.7717/peerj.453.  
url: <https://doi.org/10.7717/peerj.453>.

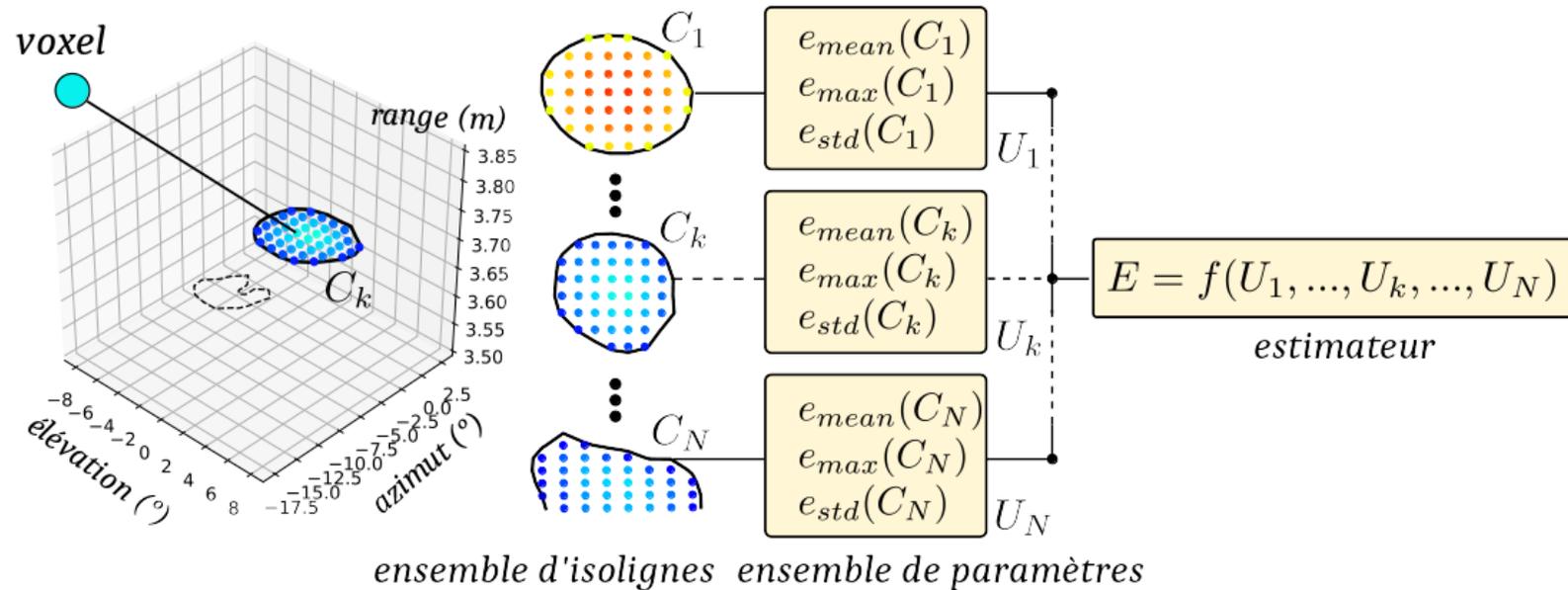
## Méthode: définir des critères de segmentation



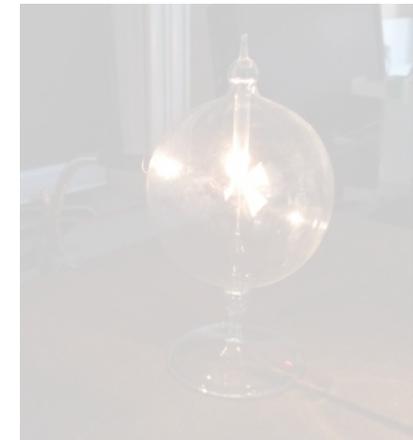
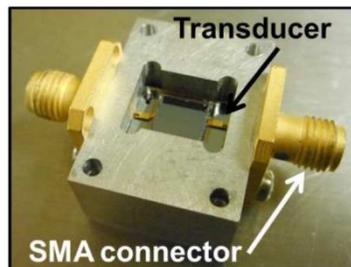
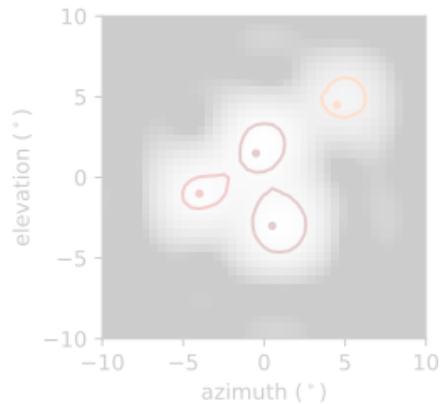
- **(Etape 1)** Générer des isolignes pour différents niveaux d'échos radar
- **(Etape 2)** Etablir un critère de sélection : nombre de maximum locaux à l'intérieur des isolignes.
- **(Etape 3)** Parmi les différents seuils de niveaux d'écho, sélectionner l'isoligne entourant la plus grande surface.

# Extraction de paramètres

- **Caractéristiques d'amplitude**  $e_{\max}$   
 $e_{\text{mean}}$ ,  $e_{\text{std}}$  : niveaux d'écho maximal, moyen, et écart-type à l'intérieur de l'isoligne.
- **Caractéristiques géométriques**  
Surface, nombre de cellules
- **Caractéristiques polarimétriques**



- Segmentation par isolignes
- **Interrogation de capteurs de pression passifs sans fil**
- Interrogation de capteur passif microfluidique fabriqué en technologie additive
- Interrogation de capteur passif par imagerie range-Doppler

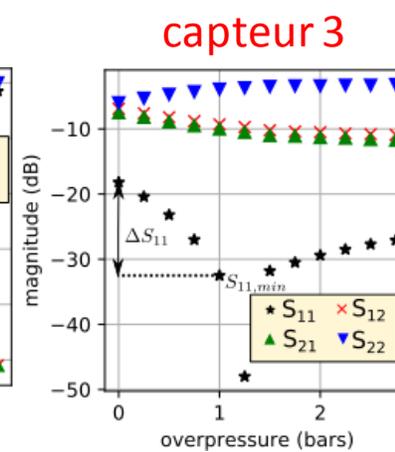
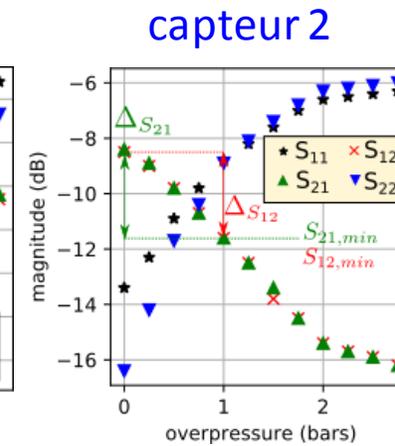
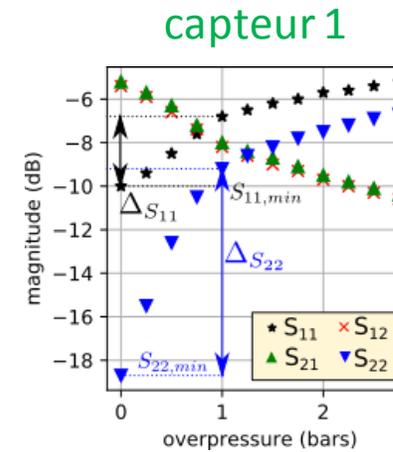
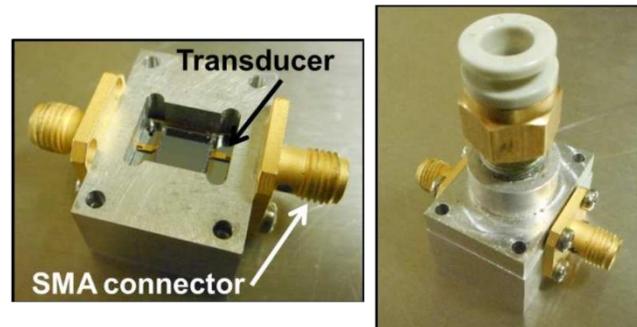
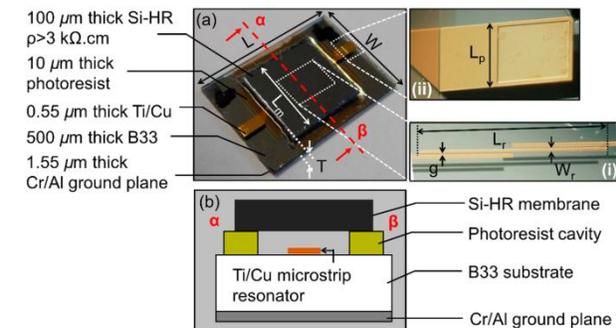


**Objectif:** Interroger et identifier des capteurs de pression passifs et sans fil en environnement contraint (*longues distances d'interrogation et environnement fortement réfléchissant pour les ondes électromagnétiques*)[1]

## Les capteurs

Transducteurs de pression fabriqués en laboratoire [2]

### Trois capteurs testés



paramètres S

[1] D. Henry et al. "Classification of Radar Echoes for Identification and Remote Reading of Chipless Millimeter-Wave Sensors". In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 69.1 (2021), pp. 926–937. doi: 10.1109/TMTT.2020.3028090.

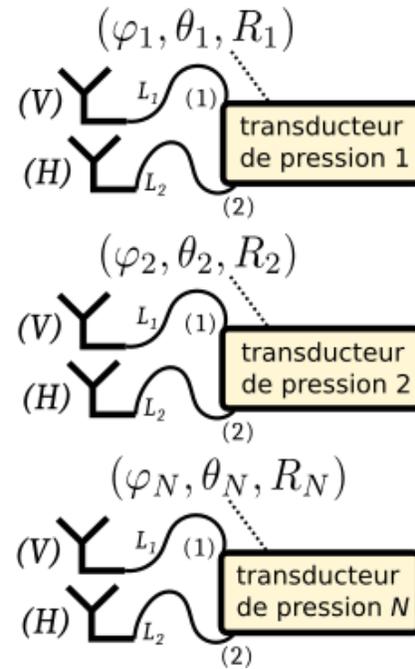
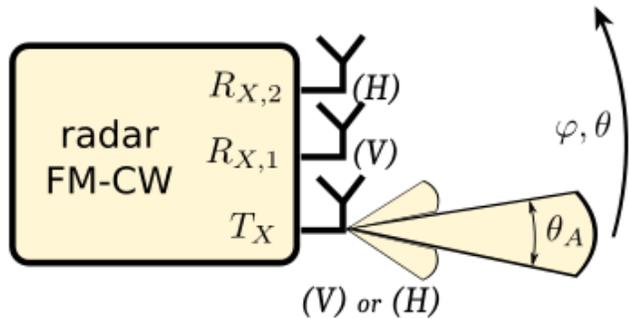
[2] J. Philippe et al. "In-Situ Wireless Pressure Measurement Using Zero-Power Packaged Microwave Sensors", Sensors, 2019

## Le lecteur

Radar FM-CW

Fréquence : 24GHz

Bande de modulation : 2GHz

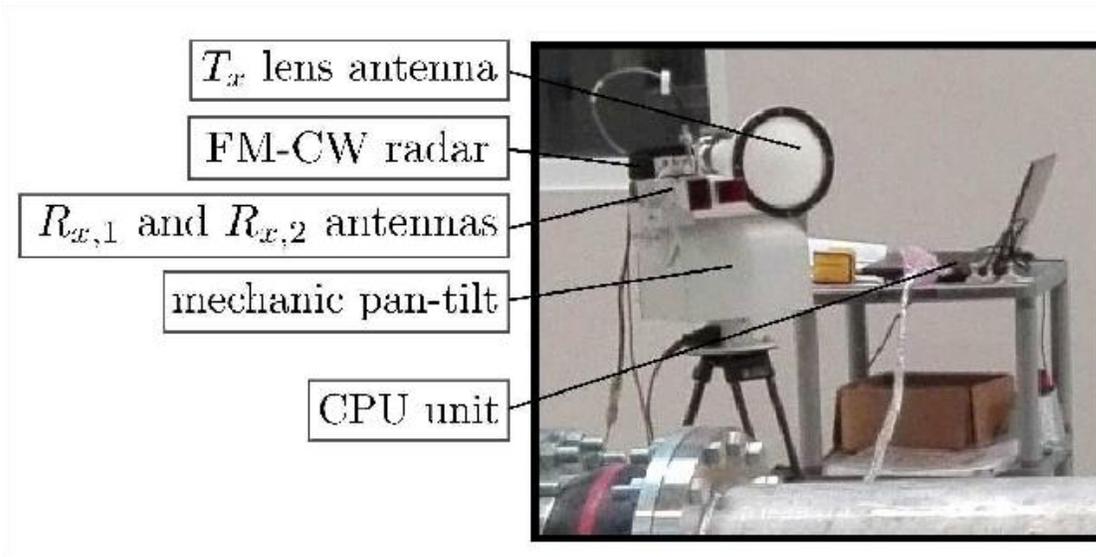


$p$  : configuration de polarisations

Position du mode de détection suivant  $p$

		Radar $T_x$ antenna polarization	
		V-pol	H-pol
Radar $R_x$ antennas polarization	V-pol	$p = VV; R_k + L_1$	$p = VH; R_k + \frac{L_1 + L_2}{2}$
	H-pol	$p = HV; R_k + \frac{L_2 + L_1}{2}$	$p = HH; R_k + L_2$

**Objectif:** Interroger et identifier des capteurs de pression passifs et sans fil en environnement contraint (*longues* distances d'interrogation et environnement fortement réfléchissant pour les ondes électromagnétiques) [1].



- fréquence porteuse : 23.8GHz
- bande de modulation : 2GHz
- résolution en profondeur : 7.5cm
- puissance émise : 10dBm
- balayage mécanique en azimut et élévation
- antenne directive avec angle d'ouverture de  $6^\circ$  et un gain de 28dBi
- différentes configurations de polarisation

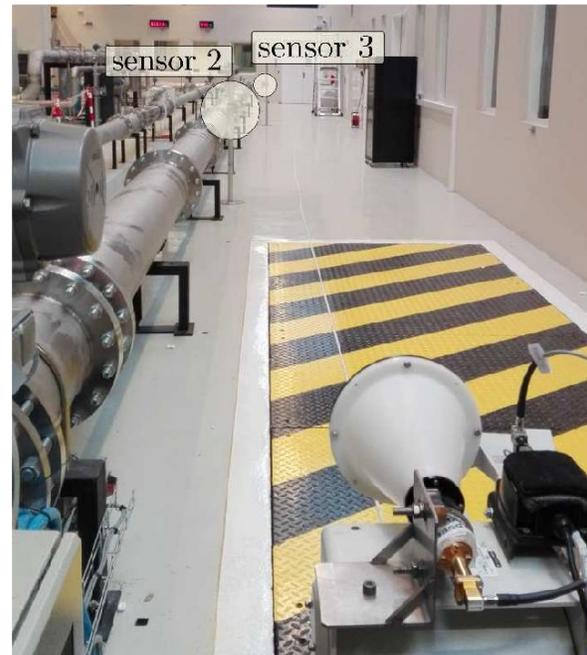
[1] D. Henry et al. "Classification of Radar Echoes for Identification and Remote Reading of Chipless Millimeter-Wave Sensors". In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 69.1 (2021), pp. 926–937. doi: 10.1109/TMTT.2020.3028090.

## L'environnement : Fortement réfléchissant (centre de recherche EDF – Chatou)

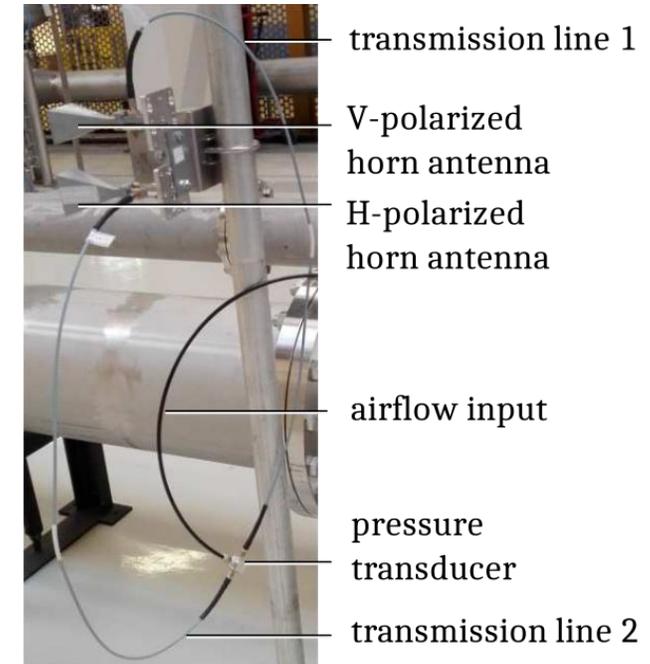
scénario 1  
4.2m et 4.8m



scénario 2  
8.1m et 17.7m



un capteur de pression  
avec antennes



## Comment identifier les échos radars des capteurs de pression parmi le clutter ?

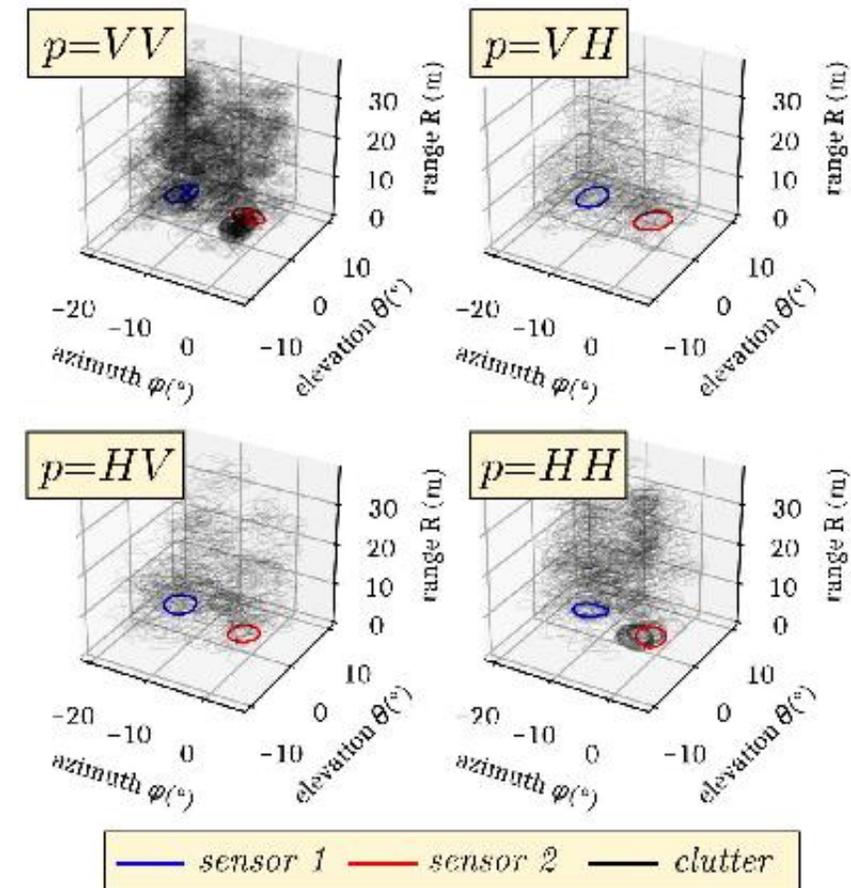
- échos radar segmentés dans chaque plan ( $\theta$ ,  $\varphi$ )
- $p$  : configuration de polarisations (Tx, Rx)
- V : polarisation verticale
- H : polarisation horizontale
- critère :  $\Lambda_p = \frac{N_{sens,p}^o}{N_{sens,p}^o + N_{clut,p}}$

p	scenario 1		scenario 2	
	$\Lambda_p$	$N_{V,c,p}^a$	$\Lambda_p$	$N_{V,c,p}^a$
VV	2.8E-3	2.5E-1	11.6E-3	0.7E-1
VH	4.5E-3	1.5E-1	4.4E-3	2.0E-1
HV	4.3E-3	1.6E-1	4.5E-3	1.9E-1
HH	2.8E-3	2.5E-1	13.2E-3	0.6E-1

$N_{s,p} = 2$

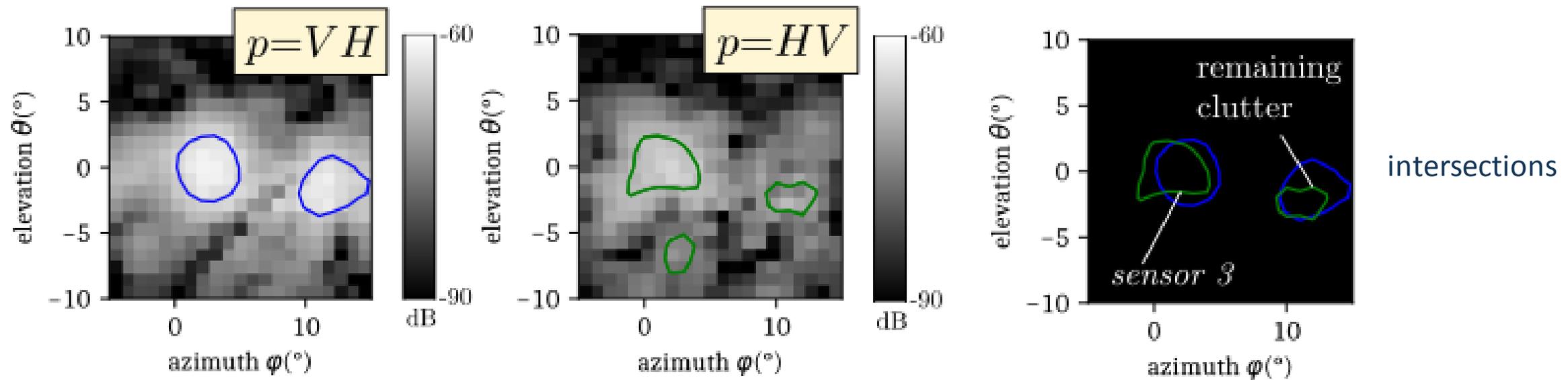
<sup>a</sup>unit in radar echoes per  $m^3$

(nombre d'échos radar du clutter par unité volume)



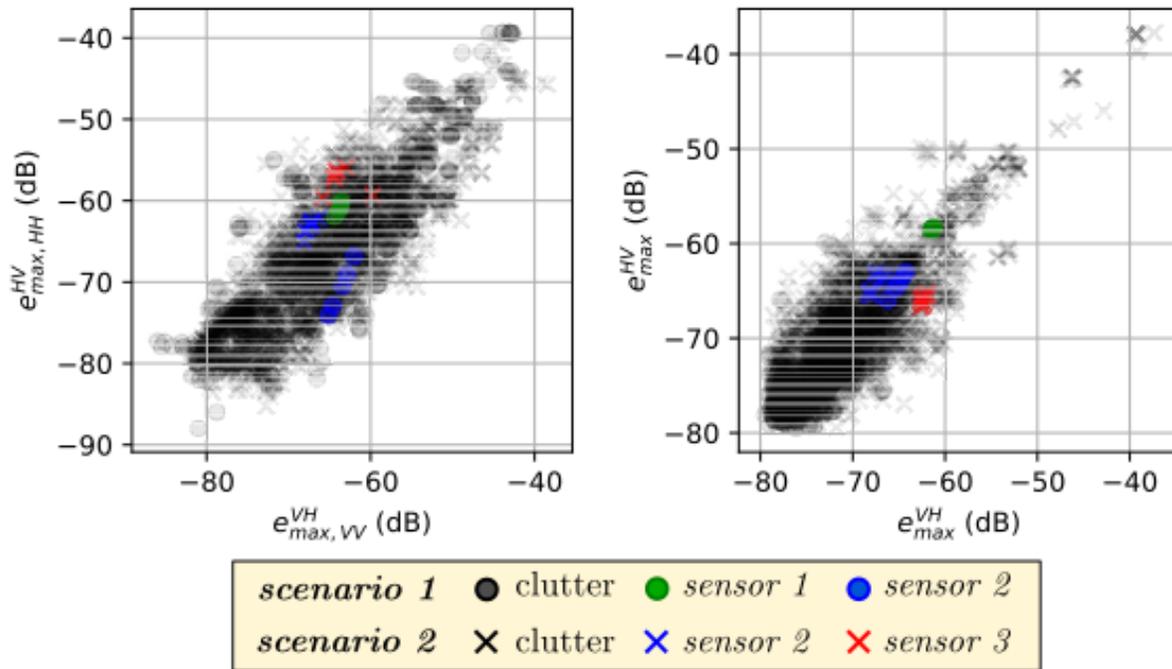
## Comment identifier les échos radars des capteurs de pression parmi le clutter ?

- Première sélection d'écho radar en polarisations croisées pour  $p=VH$  et  $p=HV$ .
- Les échos radars des modes de détection sont à la même position  $(R, \theta, \varphi)$
- Exemple : écho radar du mode de détection du capteur 3 (à 18.0m)



- sélection d'isolignes qui s'entrecroisent pour  $p=VH$  et  $p=HV$ .
- critère :  $\Lambda_p$  augmenté de 100%

## Classification à partir des caractéristiques des échos radars segmentés.



- caractéristiques :  $e_{\max,VV}^{VH}$ ,  $e_{\max,HH}^{HV}$ ,  $e_{\max}^{HV}$  et  $e_{\max}^{VH}$
- classificateur : K plus proches voisins.
- classe 0 : clutter.
- classes 1, 2 et 3 : capteurs de pression 1, 2 et 3
- la lecture du capteur de pression s'effectue en estimant  $e_{p,\max}$  dans les isolignes des capteurs identifiés.

		trained predicted				tested predicted			
		0	1	2	3	0	1	2	3
actual	0	3190	1	2	0	3507	0	4	2
	1	0	5	0	0	0	5	0	0
	2	1	0	12	0	1	0	12	0
	3	1	0	0	6	0	0	0	8
total: 26 beamscannings									

## Lecture de la pression

Dynamique maximale atteignable pour chaque position de capteur  
(rapport circuit ouvert – impédance adaptée)

p	sensor 1			sensor 2		
	o	-	$\Delta_{max}^p$	o	-	$\Delta_{max}^p$
VV	-52.1	-61.6	9.6	-54.0	-64.5	10.5
VH	-73.3	-53.1	20.2	-72.4	-53.5	18.9
HV	-76.2	-52.6	23.6	-73.6	-53.5	20.2
HH	-52.4	-58.1	5.6	-54.2	-70.9	16.7

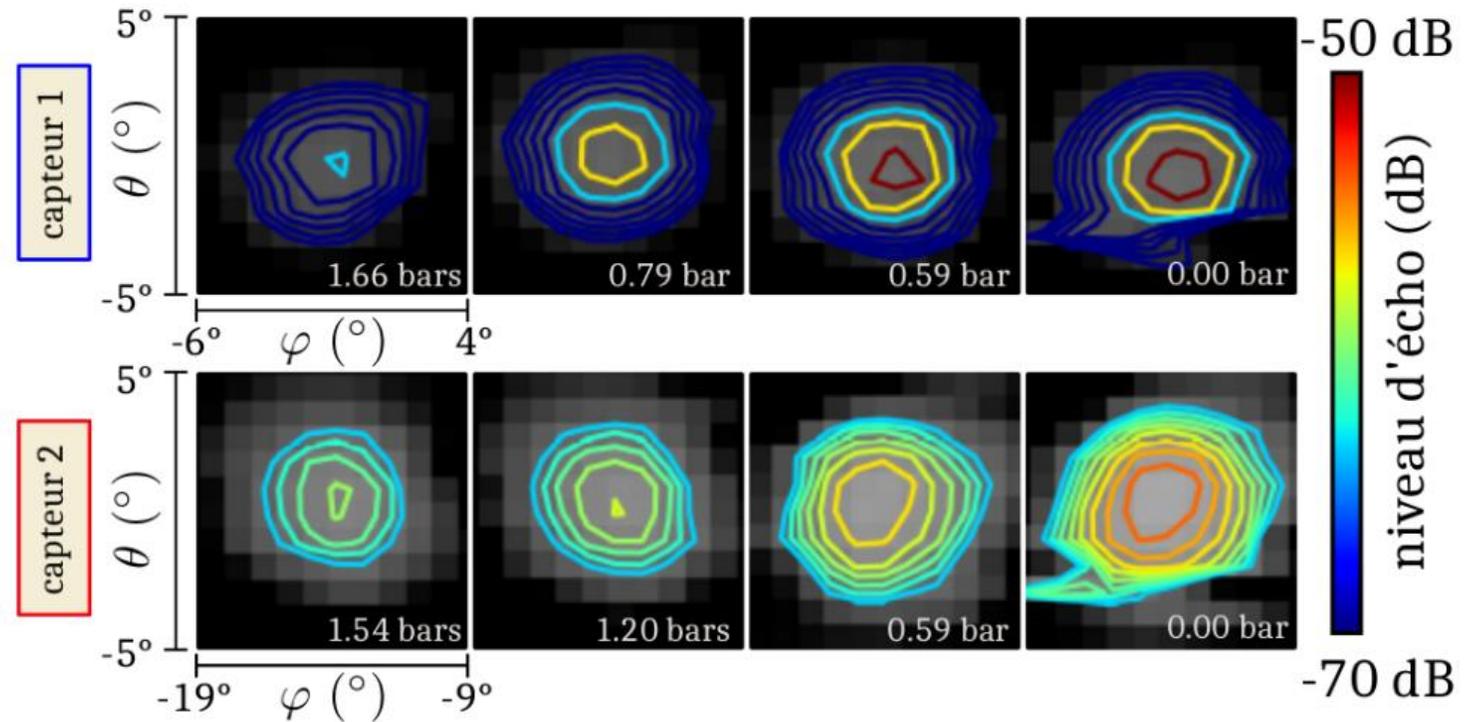
$R=4.2\text{m}; L=0.3\text{m}; R+L=4.5\text{m}$   $R=4.8\text{m}; L=1.2\text{m}; R+L=6.0\text{m}$   
**4.5m scenario 1 6.0m**

p	sensor 2			sensor 3		
	o	-	$\Delta_{max}^p$	o	-	$\Delta_{max}^p$
VV	-58.7	-70.2	11.5	ND	ND	0
VH	-70.8	-56.2	14.6	-64.3	-57.1	7.2
HV	-66.2	-55.1	11.1	-67.7	-58.9	8.8
HH	-55.0	-65.5	10.5	ND	ND	0

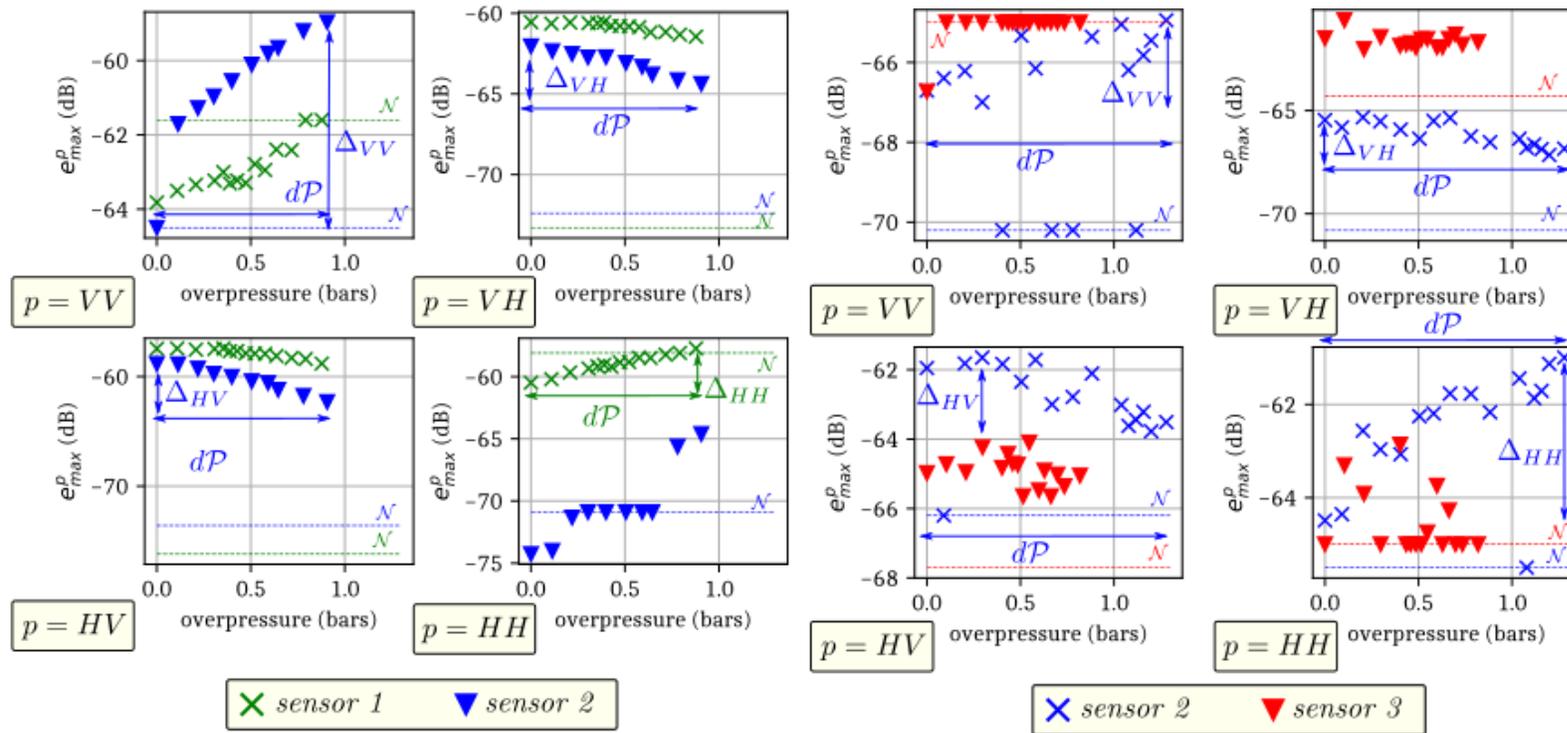
$R=8.1\text{m}; L=1.2\text{m}; R+L=9.3\text{m}$   $R=17.7\text{m}; L=0.3\text{m}; R+L=18.0\text{m}$   
**9.3m scenario 2 18.0m**

all values are in dB scale  
o: open-circuited two-port  
-: matched-impedance transmission line  
ND: radar echo not detected

scénario 1



### Lecture de la pression



#### scénario 1

**Capteur 1** 4.2m  
**Capteur 2** 4.8m

#### scénario 2

**Capteur 2** 8.1m  
**Capteur 3** 17.7m

$p / S_q$	sensor 1				sensor 2			
	$\Delta_p$	$\Delta_{S_q}$	$\alpha_p$	$\frac{\Delta_p}{\Delta_{S_q}}$	$\Delta_p$	$\Delta_{S_q}$	$\alpha_p$	$\frac{\Delta_p}{\Delta_{S_q}}$
VV / S <sub>11</sub>	2.2	2.9	2.5	0.75	2.8	4.2	3.1	0.66
VH / S <sub>12</sub>	0.9	2.5	1.0	0.36	2.3	2.7	2.5	0.85
HV / S <sub>21</sub>	1.3	2.5	1.5	0.52	3.4	2.8	3.8	1.21
HH / S <sub>22</sub>	2.7	9.0	3.1	0.30	NR <sup>a</sup>	6.9	NR <sup>a</sup>	NR <sup>a</sup>

$R=4.2m; L=0.3m; R+L=4.5m$      $R=4.8m; L=1.2m; R+L=6.0m$   
 $dP=0.9bar$      $dP=0.9bar$

#### scenario 1

$p / S_q$	sensor 2				sensor 3			
	$\Delta_p$	$\Delta_{S_q}$	$\alpha_p$	$\frac{\Delta_p}{\Delta_{S_q}}$	$\Delta_p$	$\Delta_{S_q}$	$\alpha_p$	$\frac{\Delta_p}{\Delta_{S_q}}$
VV / S <sub>11</sub>	2.0	4.6	1.6	0.43	NR <sup>a</sup>	8.0	NR <sup>a</sup>	NR <sup>a</sup>
VH / S <sub>12</sub>	1.8	3.1	1.4	0.58	NR <sup>a</sup>	1.8	NR <sup>a</sup>	NR <sup>a</sup>
HV / S <sub>21</sub>	2.1	3.2	2.1	0.65	NR <sup>a</sup>	1.9	NR <sup>a</sup>	NR <sup>a</sup>
HH / S <sub>22</sub>	3.5	7.5	2.7	0.46	NR <sup>a</sup>	1.6	NR <sup>a</sup>	NR <sup>a</sup>

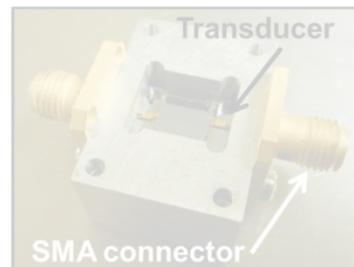
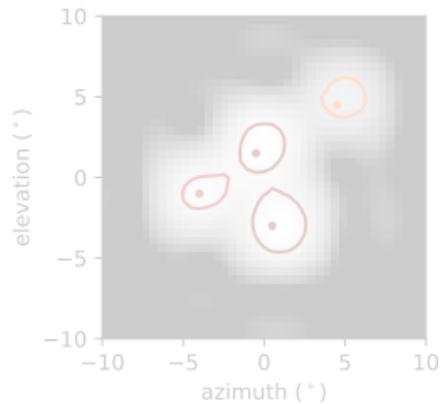
$R=8.1m; L=1.2m; R+L=9.3m$      $R=17.7m; L=0.3m; R+L=18.0m$   
 $dP=1.3bars$      $dP=0.8bar$

#### scenario 2

$\Delta_p$  in dB;  $\Delta_{S_q}$  in dB;  $\alpha_p$  in dB per bar;  $\frac{\Delta_p}{\Delta_{S_q}}$  in dB per dB

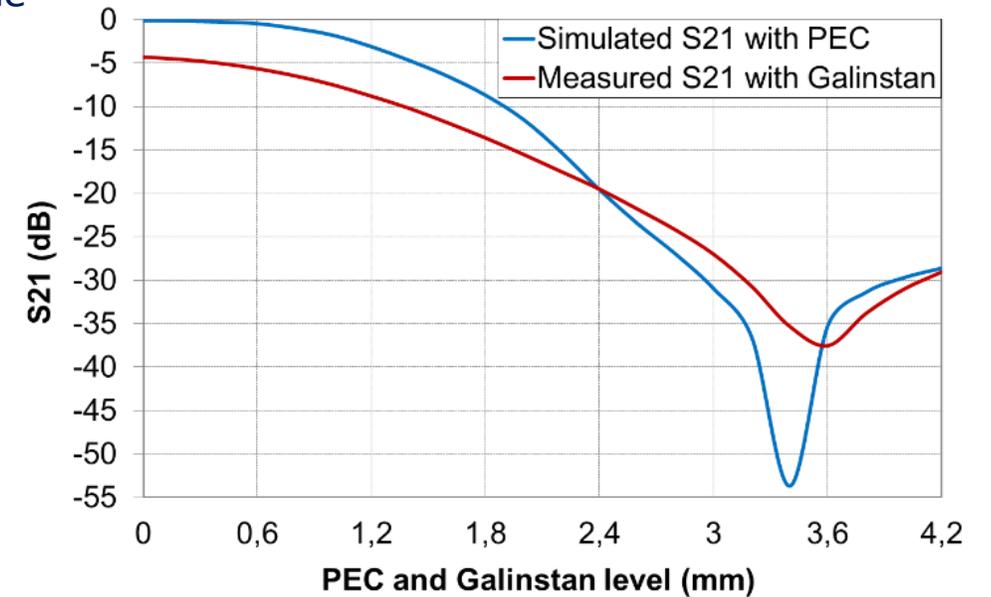
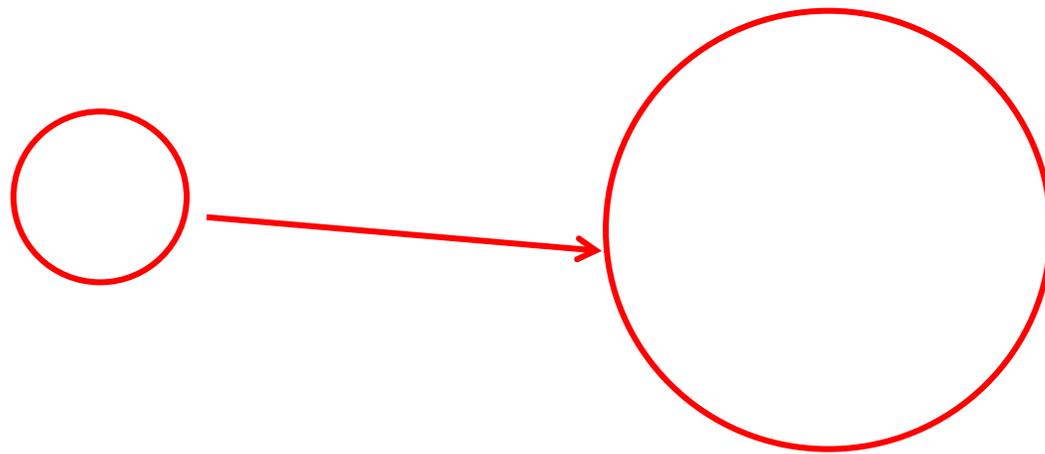
<sup>a</sup>NR: not relevant

- Segmentation par isolignes
- Interrogation de capteurs de pression passifs sans fil
- **Interrogation de capteur passif microfluidique fabriqué en technologie additive**
- Interrogation de capteur passif par imagerie range-Doppler



**Objectif:** détecter and interroger à distance un capteur passif microfluidique (24GHz) fabriquer en technologie additive [D.Henry, A.el Sayed Ahmad, H.Aubert, to be published]

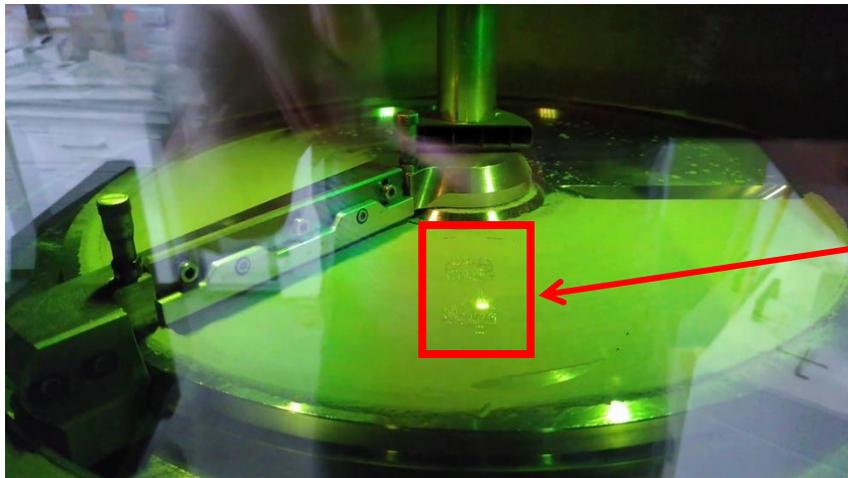
Passage du canal microfluidique à travers la cavité résonante.



Deux antennes cornets en polarisation croisée connectées à une cavité résonante

coefficient de transmission de la cavité résonante en fonction du niveau de Galinstan

Fabrication par technologie additive par la méthode SLM (Sintering Laser Melting) des différentes pièces.

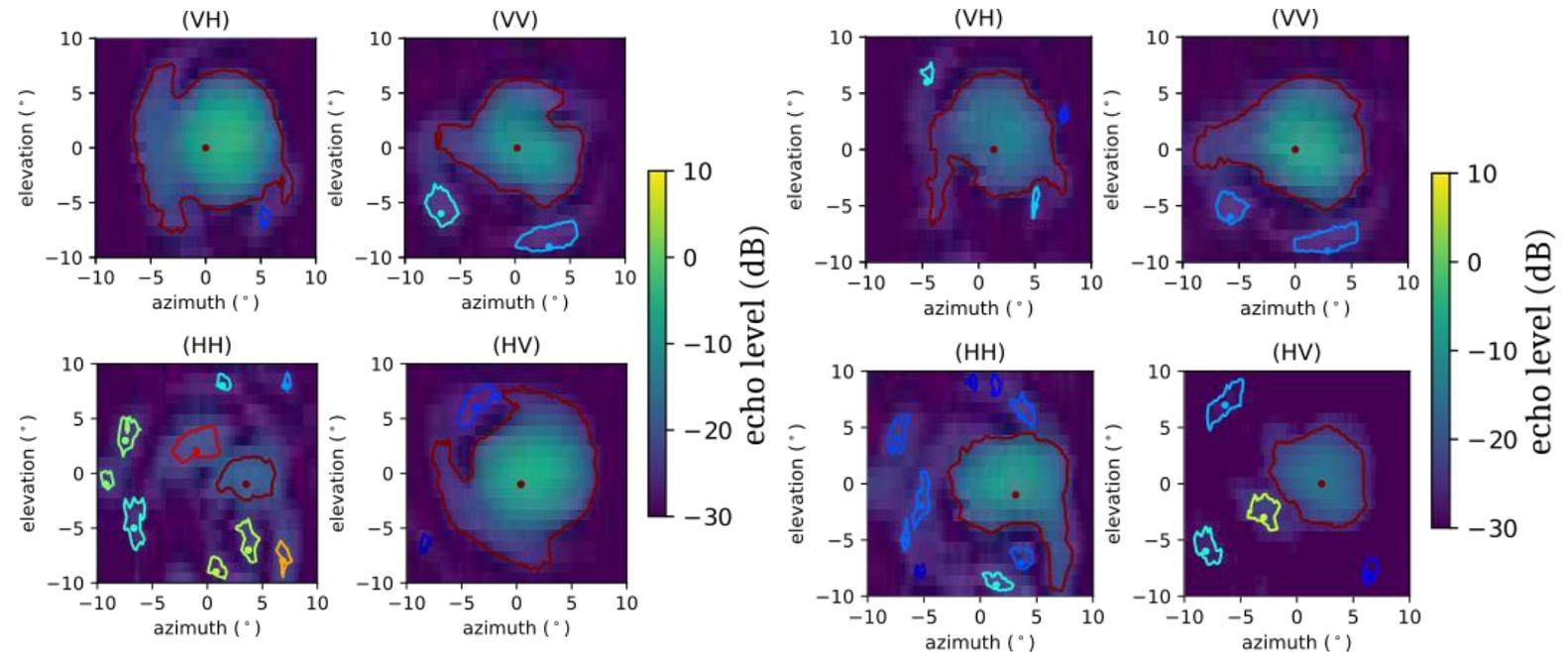


Pièces en cours de fabrication



Pièces assemblées

Interrogation effectuée par un radar FM-CW 24GHz pour différentes profondeurs de métal liquide (Galinstan) dans le canal microfluidique.

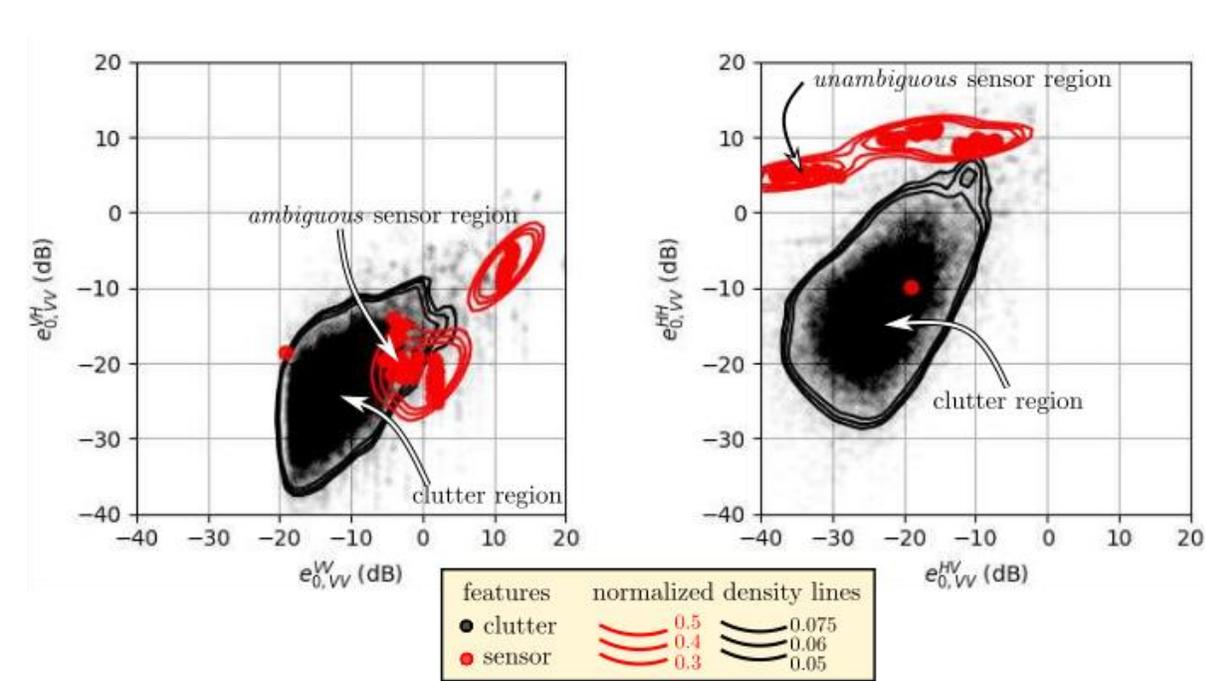


Niveau de Galinstan : 0mm

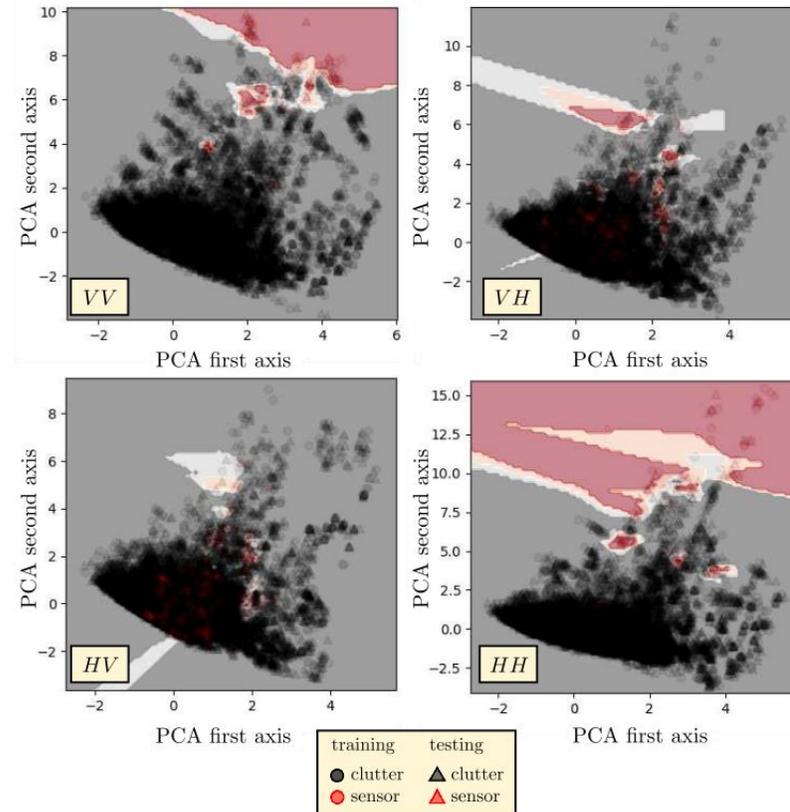
Niveau de Galinstan : 3.0mm

Dynamique de 10dB attendue à 2.5m de distance du radar

Etude de faisabilité d'identification du capteur microfluidique (entre 5m et 15m de distance avec le radar) à partir des paramètres des isolignes.

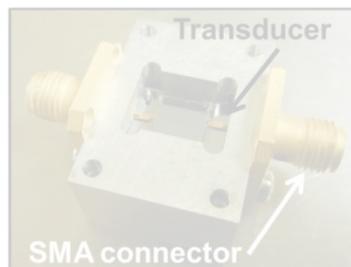
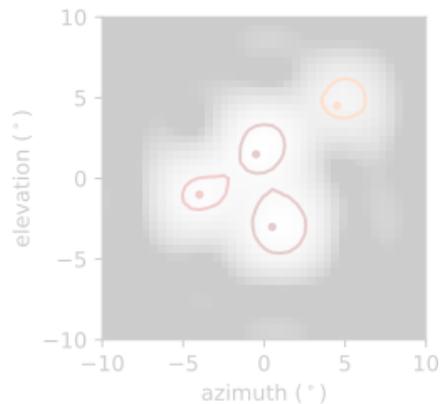


Définition de régions de clutter et du capteur pour l'identification

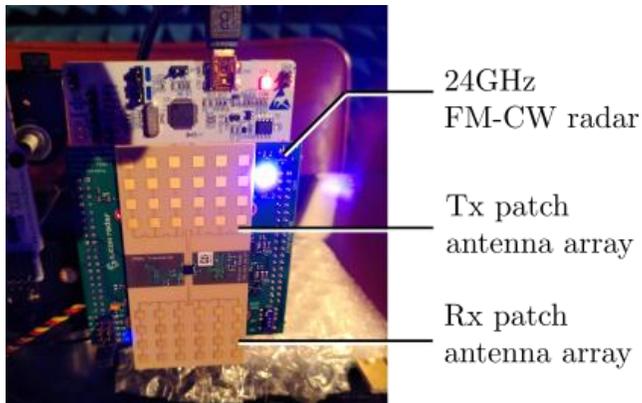


Proposition de modèles de classification clutter / capteur

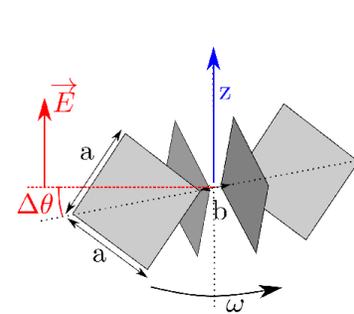
- Segmentation par isolignes
- Interrogation de capteurs de pression passifs sans fil
- Interrogation de capteur passif microfluidique fabriqué en technologie additive
- Interrogation de capteur passif par imagerie range-Doppler



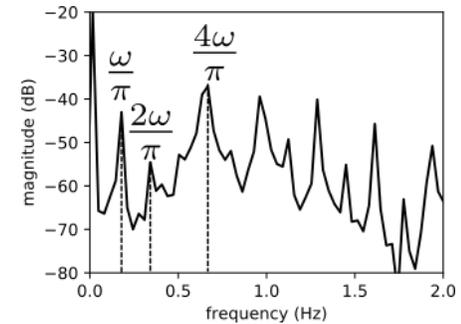
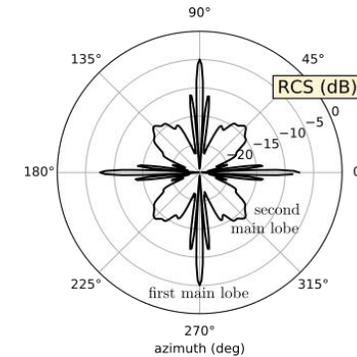
**Objectif:** détecter and interroger à distance un capteur passif sans fil “mécanique” avec un radar FM-CW. À titre d'exemple, un radiomètre de Crookes est interrogé pour différents éclairagements lumineux à une portée de 3,5m [1]



- fréquence porteuse : 24 GHz
- bande de modulation : 1GHz
- résolution en profondeur : 15cm
- temps de répétition: 30ms

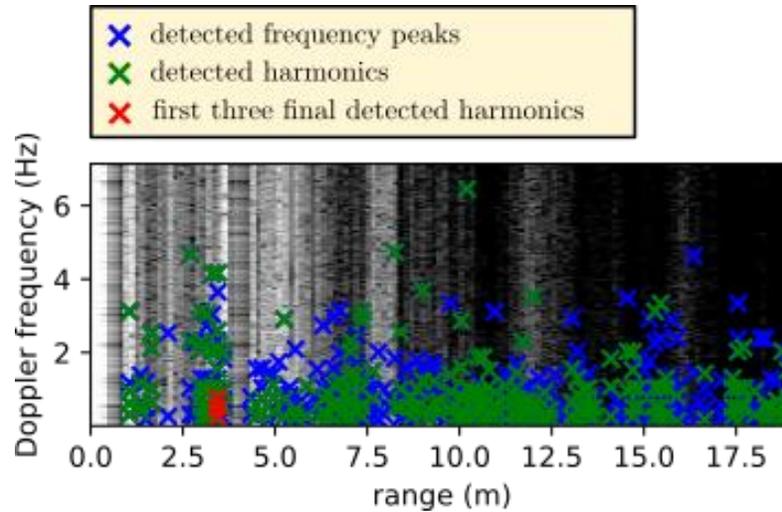
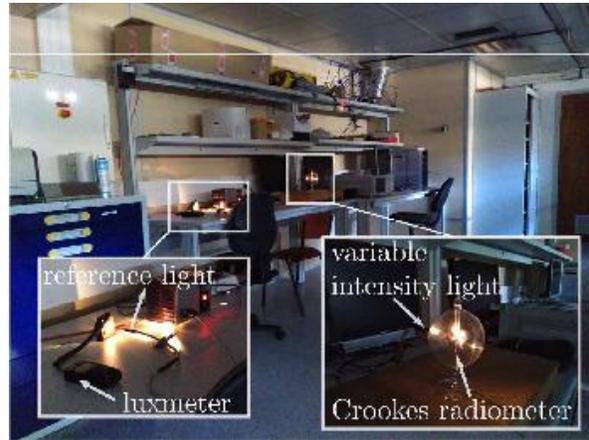
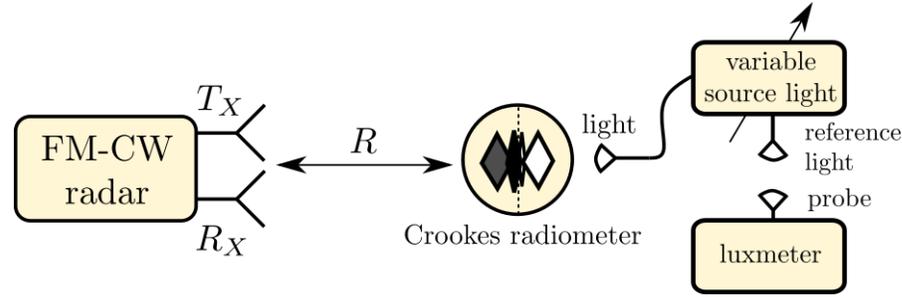


*aillettes inclinées*



*simulation : variation périodique de la RCS lorsque les ailettes tournent.*

[1] D. Henry et al., "Range-Doppler Imaging Approach for the Wireless Reading of Mechanical Sensors," 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2021, pp. 1-5.



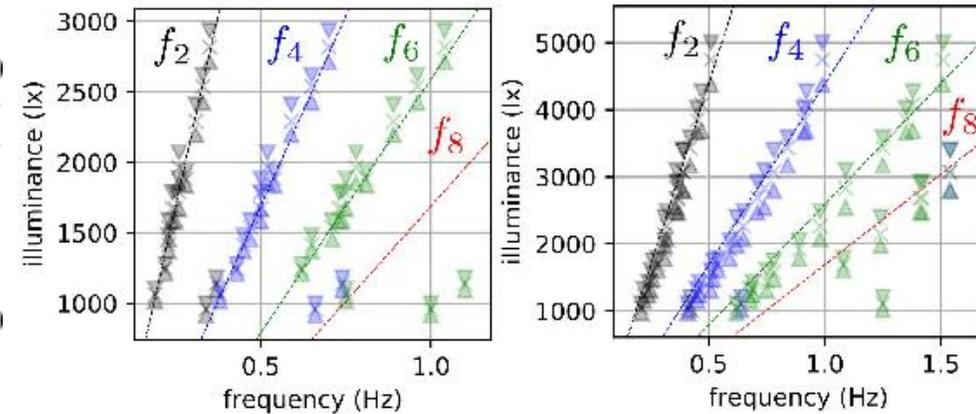
Description de l'expérience

Détection du radiomètre à 3.5m à 1500lx

Eclairage lumineux en fonction de la fréquence range-Doppler mesurée

$$I_k = \frac{2\alpha f_k}{k} + \beta$$

- ▽ maximal measured illuminance
- × averaged measured illuminance
- △ minimal measured illuminance
- ▽ first detected harmonic
- × second detected harmonic
- △ third detected harmonic



chambre anéchoïque

salle de laboratoire

## Perspectives

- La technologie additive par SLM facilite la fabrication de capteurs passifs à bas coût (en comparaison avec la fabrication des capteurs en salle blanche)
- Capteurs plus compact en intégrant les antennes directement au capteur
- L'exploitation de la polarisation croisée reste un avantage pour améliorer le SNR.
- L'utilisation des isolignes permet la lecture et l'identification du capteur.
- Etude sur le nombre maximal de capteurs identifiables.
- Calibrer le lecteur radar pour compenser la perte en dynamique du capteur en fonction de la distance d'interrogation.