

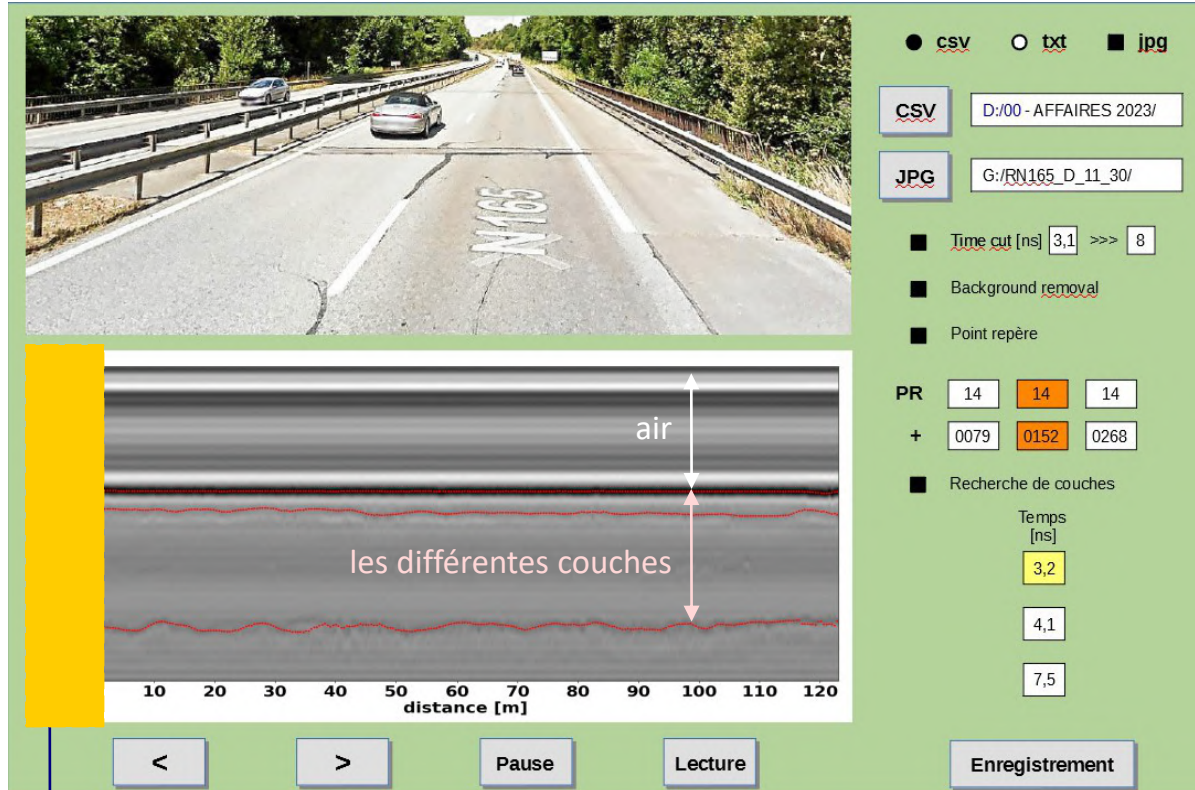
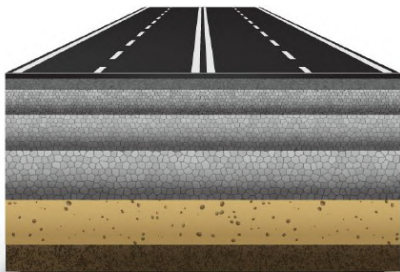
# Mesure de la permittivité diélectrique des chaussées par une sonde ouverte

**Benhui FAN et Frédéric BOSC**

**Endsum** (Évaluation Non Destructive des Structures et des Matériaux) **Cerema**

# Des multi-couches dans les chaussées

-un deux-roues motorisé équipé d'une antenne hyperfréquence

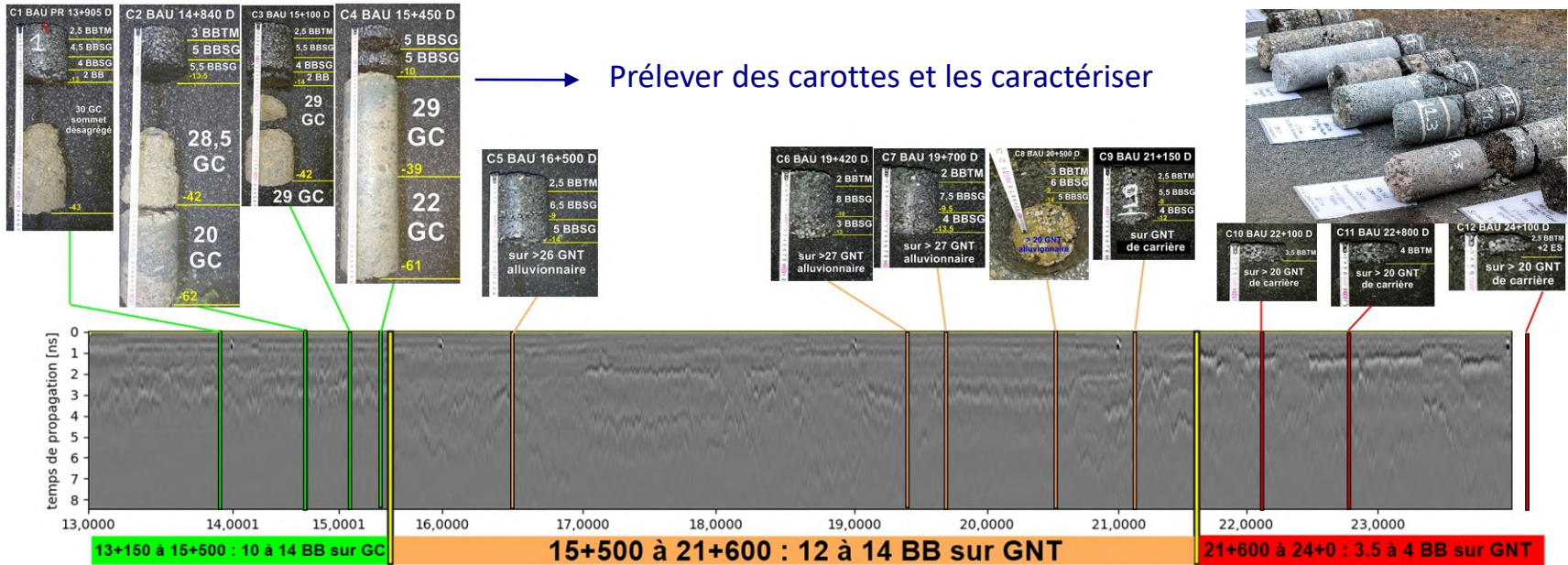


domaine temporel

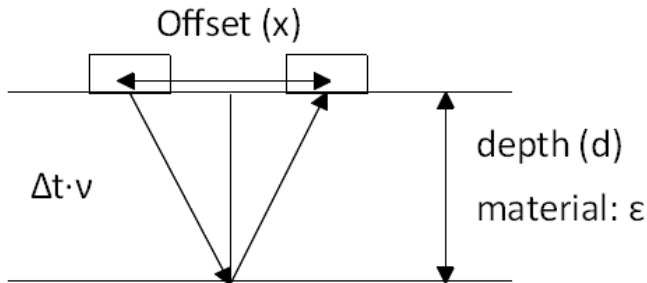
B-scan (radargram) par radar géophysique  
la vitesse des ondes électromagnétiques (EM)

domaine spatial

# Domaine temporel et spatial



La vitesse des ondes EM dépend de la permittivité diélectrique ( $\epsilon_r$ )



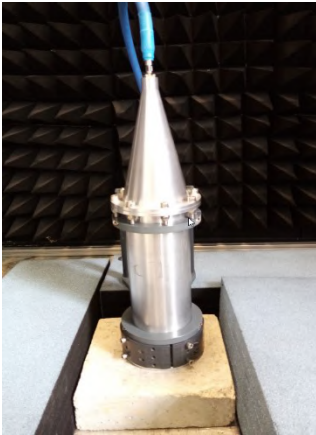
$$\left(\frac{x}{2}\right)^2 + (d)^2 = \left(\Delta t \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}}\right)^2$$

Mesurer  $\epsilon_r$  de routes → estimer l'épaisseur (d)

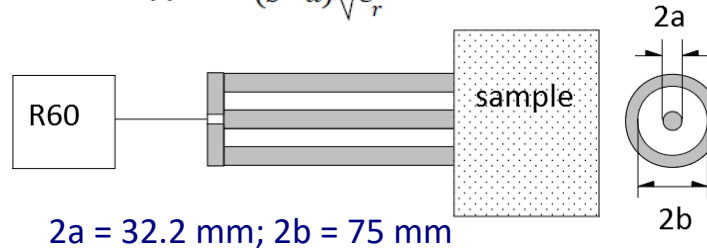
# Mesure en laboratoire

- Sonde ouverte : poser la sonde directement

→ mesurer les valeurs  $S_{11}$  → calculer  $\epsilon_r^*$  par la méthode de capacitance



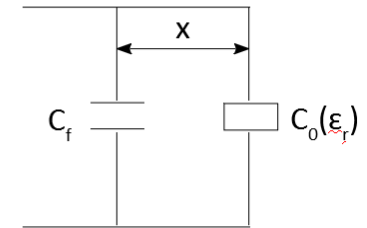
$$f_{cut-off} = \frac{20}{(b-a)\sqrt{\epsilon_r}}$$



$$2a = 32.2 \text{ mm}; 2b = 75 \text{ mm}$$

$$\epsilon_r' = 4 \rightarrow f_{cut-off} < \mathbf{0.47 \text{ GHz}}$$

circuit équivalent



calibration: court-circuit, air et PTFE (Téflon)

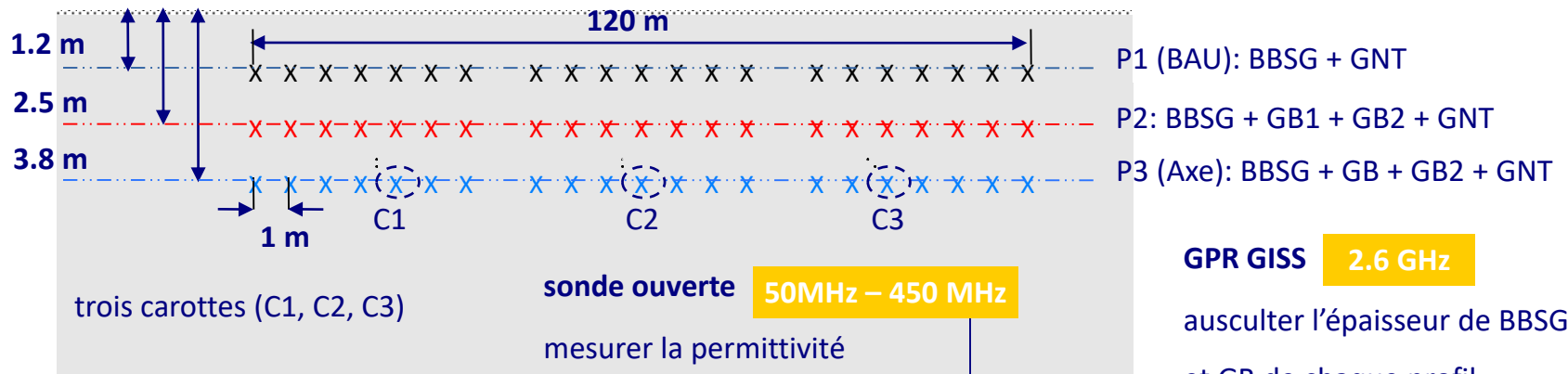
References:

- [1] Grant J.P, Clarke R.N., Symm G.T. and Spyrou N.M. A critical study of the open-ended coaxial line sensor technique for RF and microwave complex permittivity measurements. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 1989; 22: 757
- [2] Otto G.P. and Chew W.C. Improved Calibration of a large open-ended coaxial probe for dielectric measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1991; 40: 742 – 746
- [3] Filali B., Boone F., Rhazi J., Ballivy G. Design and calibration of a large open-ended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2008; 10: 2322 – 2328
- [4] Guihard V., Taillade F., Balayssac J., Steck B., Sanahuja J., Deby F. Permittivity measurement of cementitious materials with an open-ended coaxial probe. *Constr Build Mater.* 2020; 230: 116946.
- [5] Fan B. Bosc F. Liu Y. Fauchard C., Dielectric Measurement by Open-ended Coaxial Probe for Hot- Mix Asphalt Roads: from laboratory test to on-site investigation, *NDT&E International*, 2023, 138, 102872

...

# Mesure sur chantier : une route nouvelle

- Trois profils à tester (21 points / profil)



trois carottes (C1, C2, C3)

sonde ouverte 50MHz – 450 MHz

mesurer la permittivité

diélectrique de chaque point

GPR GISS 2.6 GHz

ausculter l'épaisseur de BBSG  
et GB de chaque profil

Modèle Debye → décaler  $\epsilon_r'$  des basses fréqs. à 2.6 GHz

BBSG ~5.1 cm

GB1 ~9.0 cm

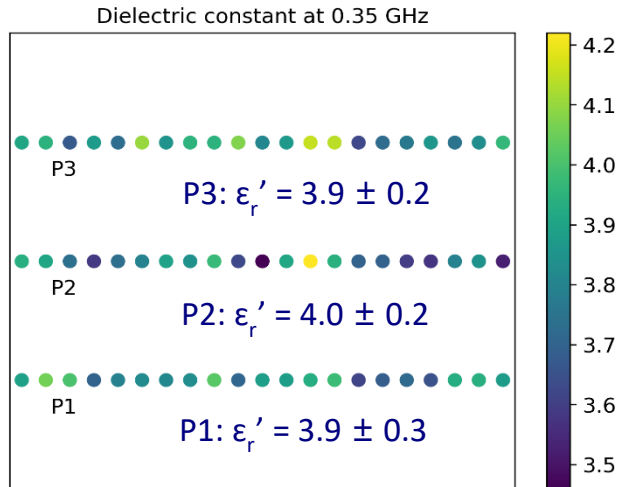
GB2 ~11.3 cm



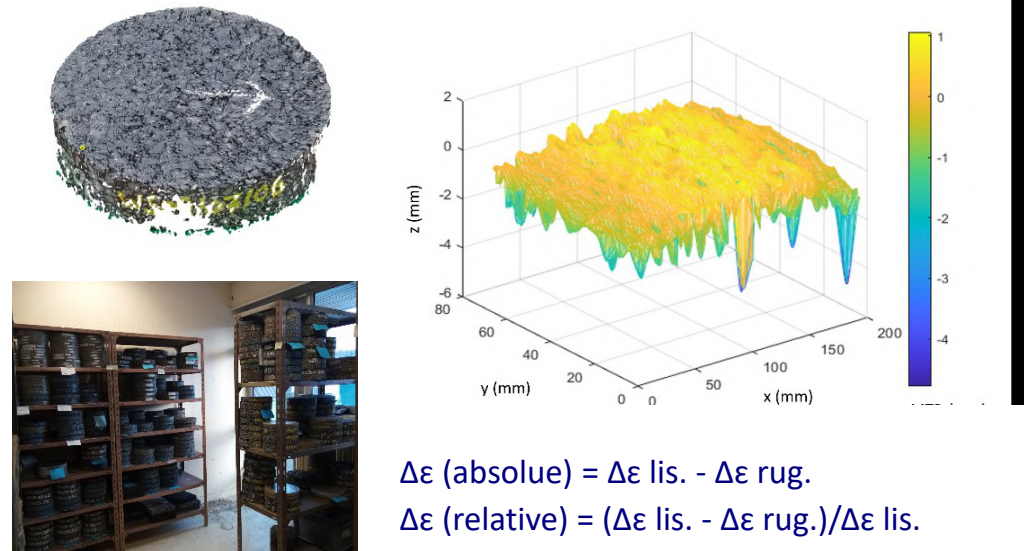
- (1) BBSG: béton bitumineux semi grenu
- (2) GB: grave bitume
- (3) GNT: grave non traitée

# Propriétés diélectriques de trois profils

- Constante diélectrique à 350 MHz



- Macro-texture de BBSG



1) hétérogénéité de chaussée :

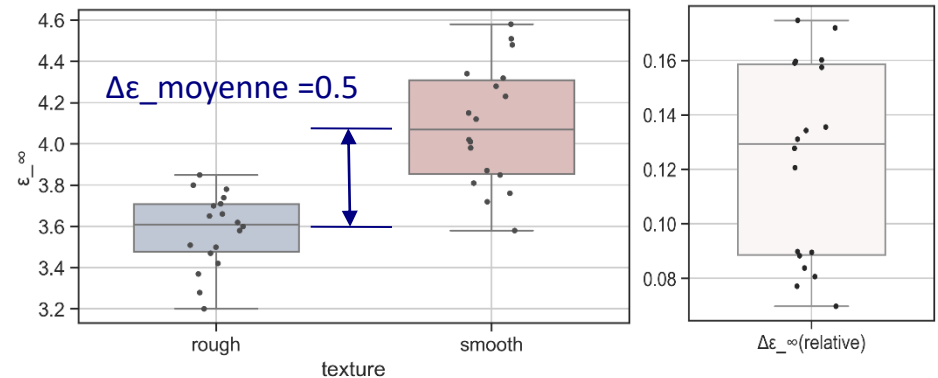
→ compactage, collage, etc

2) problème de contact:

P3: PMT\_moyenne = 0.8 [0.65, 1.08]

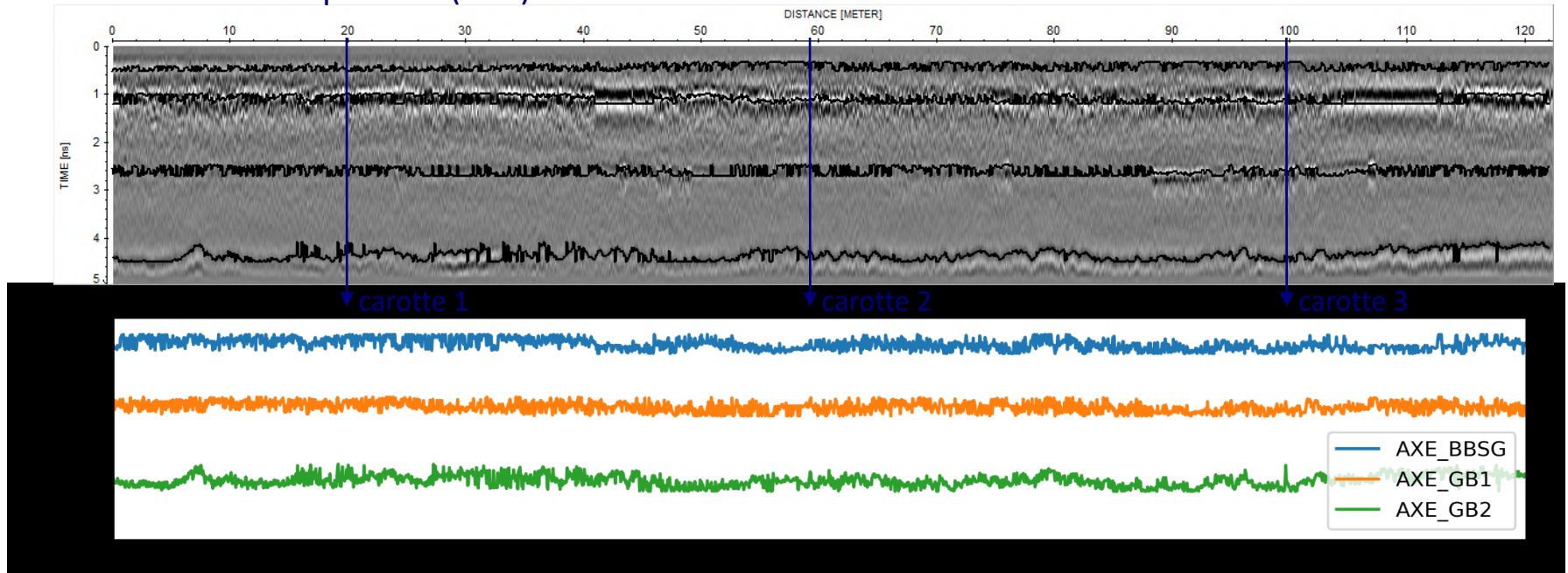
P2: PMT\_moyenne = 0.66 [0.51, 0.87]

*PMT: profondeur moyenne de texture*



# Estimer l'épaisseur de différentes couches

- B-scan à 2.6 GHz pour P3 (AXE)



	carotte 1 (cm)			carotte 2 (cm)			carotte 3 (cm)		
	règle	gamma	radar	règle	gamma	radar	règle	gamma	radar
BBSG	5.3	5.5	$5.2 \pm 0.2$	5.2	4.5	$5.86 \pm 0.03$	5.1	5.0	$5.85 \pm 0.08$
GB1	9.3	8.5	$9.7 \pm 0.4$	8.7	8.0	$9.6 \pm 0.9$	8.8	8.0	$8.6 \pm 0.4$
GB2	10.9	10.5	$13 \pm 1$	11.7	11.5	$13.6 \pm 0.3$	11.1	11.0	$13.2 \pm 0.7$

# Conclusions et perspectives

## \* Application pour les routes

- la sonde ouverte peut nous donner les permittivités diélectriques de la route
- problème de contact → utiliser la PMT pour améliorer notre résultat
- un indice des propriétés viscoélastiques ( $\epsilon^*$ ) vs module complexe mécanique ( $G^*$ )
- le changement d'état physique
- l'évolution structurale des matériaux (vieillessement...) provoquée par les divers facteurs environnementaux

## \* Application pour les ouvrages d'art

- estimation le taux de corrosion des bétons armés

## \* Application aux sols

- détermination la teneur en eau dans les sols



# Développement en cours

POIVRON : Prototype utilisant une sonde diélectrique ouverte piloté(e) par smartphone

- Maquette permettant la mesure diélectrique sur chaussée, parement d'ouvrage, ...
- Pilotage d'un radar à sauts de fréquences depuis un smartphone
- Objectif : Matériel à l'usage des équipes de recherche et des équipes opérationnelles du cerema

- Échelle de maturité de la technologie :

Franchissement de la « vallée de la mort » : phases 4 à 7

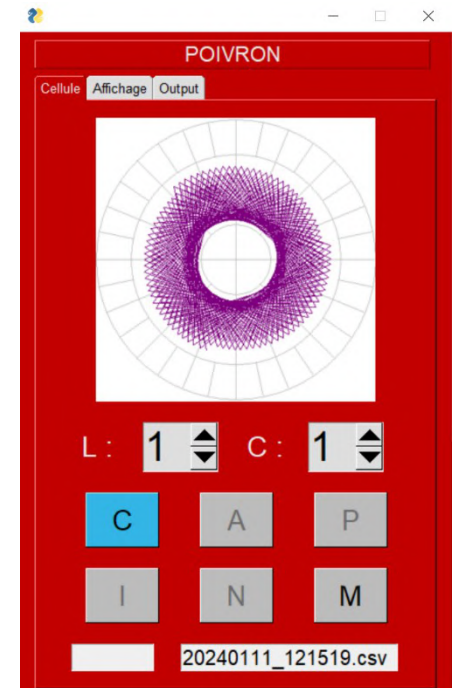
→ développeur, chercheur et spécialiste métier

Intégration du prototype dans un système industriel complet : phases 8 à 9

→ DPPN (\*)



(\*) DPPN: Département Prototypes et Projets Numériques du Cerema



# Merci de votre attention

**Coordonnées Intervenant : Benhui FAN, Frédéric BOSC et Cyrille FAUCHARD**

**Organisme : Endsum (Évaluation Non Destructive des StrUctures et des Matériaux) Cerema**

**Mél : [benhui.fan@cerema.fr](mailto:benhui.fan@cerema.fr)**

**[frederic.bosc@cerema.fr](mailto:frederic.bosc@cerema.fr)**

**[cyrille.fauchard@cerema.fr](mailto:cyrille.fauchard@cerema.fr)**

## Remerciements

Dominique PINEAU, Martial MENARD,

Sylvain NGUYEN, Olivier LAINÉ,

Vincent DANIEL, Pierre BRISSET,

David CHAUVET et Vincent BOUCHER



**Endsum-Cerema**