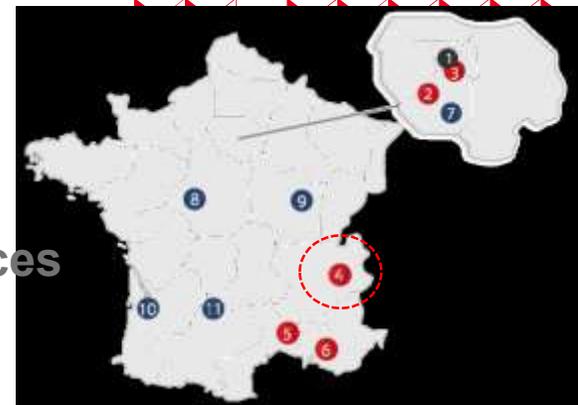


Développement et intégration d'actionneurs piézoélectriques pour des applications haptiques

Fabrice Casset

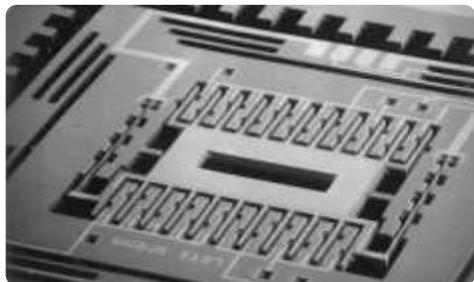
GDR TACT - Juin 2024

Le laboratoire LICA au CEA-LETI

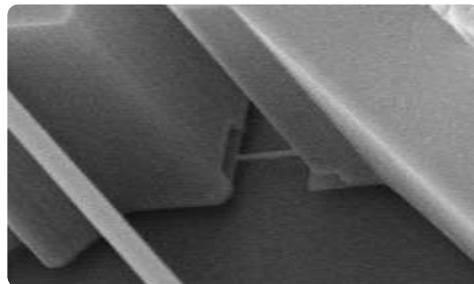


SENSORS : Maturing of new transduction techniques for better sensor performances

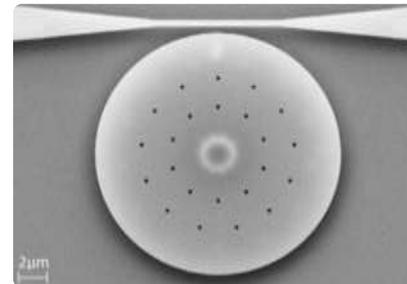
Capacitive comb-drive detection



NEMS-gauge piezoresistive detection



Optomechanical detection



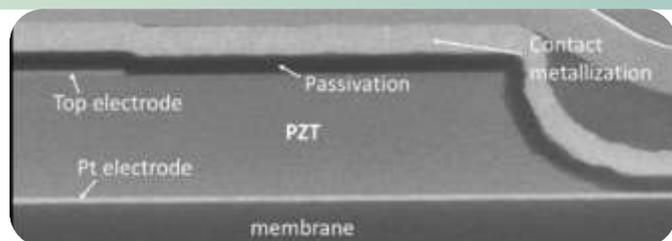
1980' ○

2000' ○

2010' ○

2015 ○

TODAY



200mm AIN and PZT technologies



Wafer-to-wafer piezoelectric film transfer



Transparent Piezo thin films
Piezo patch



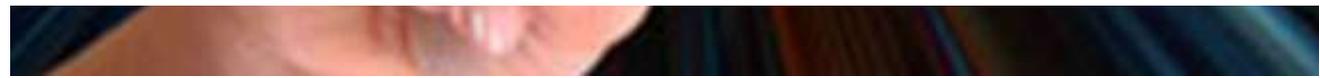
Piezoelectric actuators on substrate with limited thermal budget (Photonics, CMOS...)



ACTUATORS : Widening the scope of use of the piezoelectric thin film for future microactuators

Sommaire

- Introduction et contexte
- Etat de l'art sur l'haptique tactile
- L'actionneur piézoélectrique comme « moteur » haptique
- Les technologies piézoélectriques
 - Les polymères électroactifs
 - Les technologies couches minces
 - La technologie « piezo-in-flex »
- Conclusion & Perspectives



Introduction et contexte

- De plus en plus d'interfaces tactiles

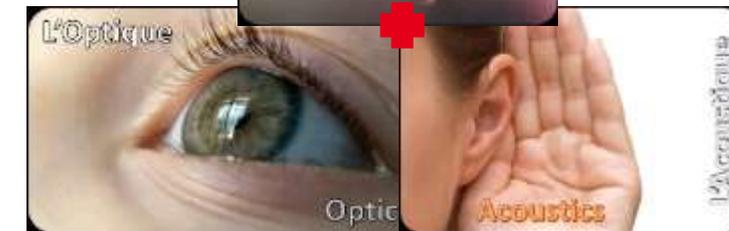


- Et pourtant le sens du toucher est sous utilisé alors que...

- La vue n'est pas toujours suffisante

- Personnes déficientes visuellement

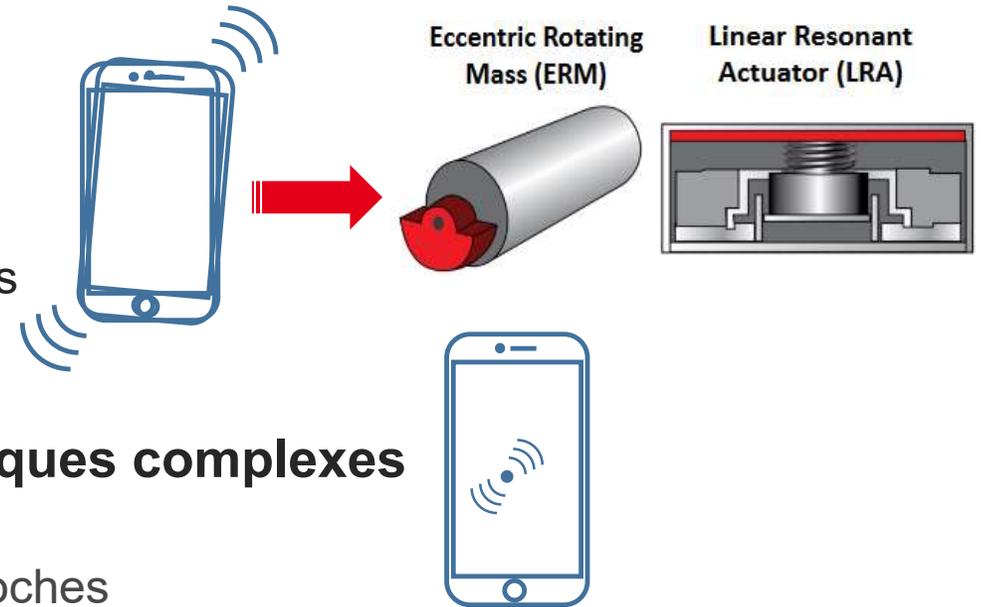
- Information augmentée en multi sensoriel



Etat de l'art

- Interfaces haptiques existantes aux perfs limitées
 - Le plus souvent que vibrotactile → Alertes & Notifications

- Des développements pour générer des effets haptiques complexes
 - Textures & Reliefs



Principalement 2 approches

Electrostatique

The diagram shows a hand touching a screen. Below it, a cross-section of a touchscreen shows a 200V (1 μm) ITO (40 nm) layer on a Glass Screen (3 mm). A hand is shown touching a screen displaying colorful dots. Logos for Disney Research, Senseg, and Canvas are included.

☹ Forte tension (kV)

Ondes acoustiques/US

Modulation friction

The diagram shows a hand touching a screen. Below it, a cross-section of a touchscreen shows a 'Slippery Texture' with a 'High-pressure layer of air' and a 'Low-friction zone', and a 'Rough Texture' with a 'High-friction zone'. Logos for leti, TDK, and FUJITSU are included.

Filtre inverse

The diagram shows a hand touching a screen. Below it, a cross-section of a screen shows a grid of circles. Logos for list and KOC UNIVERSITY are included.

Time reversal

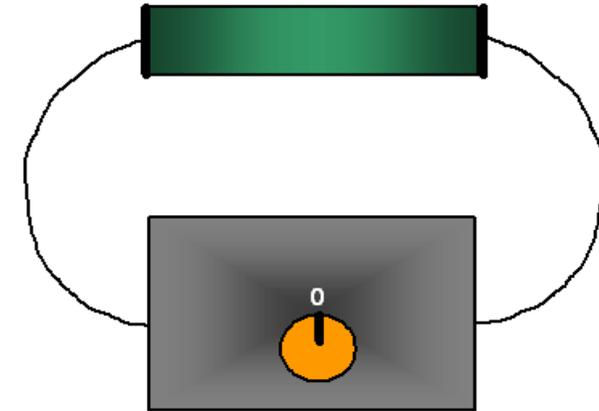
The diagram shows a hand touching a screen. Below it, a cross-section of a screen shows a grid of circles. Logos for list, leti, HUAWEI, REDUX, and Google are included.

☺ Actionneur Piézoélectrique (Intégration, ↘ consommation)

L'actionneur piézoélectrique comme « moteur »

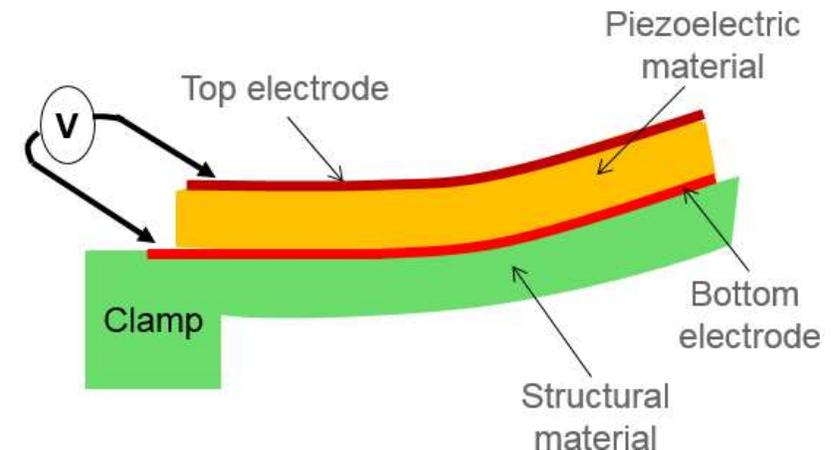
- Effet piézoélectrique inverse...

- Tension d'actionnement → Déformation
- Coefficient piézo d_{31} le plus grand possible



- ... et effet unimorphe

- Design → Actionneur piézoélectrique fixé sur une couche structurale pour générer une **déformation hors plan**
- Générer des **déformations de l'ordre du μm ou quelques μm**



Comment mettre en œuvre un actionneur piézoélectrique performant?

Les technologies piézoélectriques



▪ Rôle du CEA-LETI

- « De la recherche à l'industrie » → **Augmenter le TRL des technologies piézoélectriques**
- Plateforme de « production » → Utiliser nos **équipements industriels**
- Les interfaces haptiques → Valoriser nos **technologies différenciantes**

▪ Plusieurs filières technologiques possibles

PZT

(LEAD ZIRCONIUM TITANATE)

■ Properties:

- ✓ High piezo coefficient
- ✓ High K
- ✓ Low mechanical properties

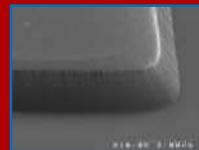


ALN

(ALUMINIUM NITRIDE)

■ Properties:

- ✓ Low piezo coefficient
- ✓ High mechanical properties
- ✓ High temp. stability



ELECTRO-ACTIVE

POLYMER

■ Properties:

- ✓ Low piezo coefficient
- ✓ Low mechanical properties
- ✓ Low cost / Large scale



PIEZO CERAMIC

■ Properties:

- ✓ High piezo coefficient
- ✓ Pick & Place
- ✓ Commercially available



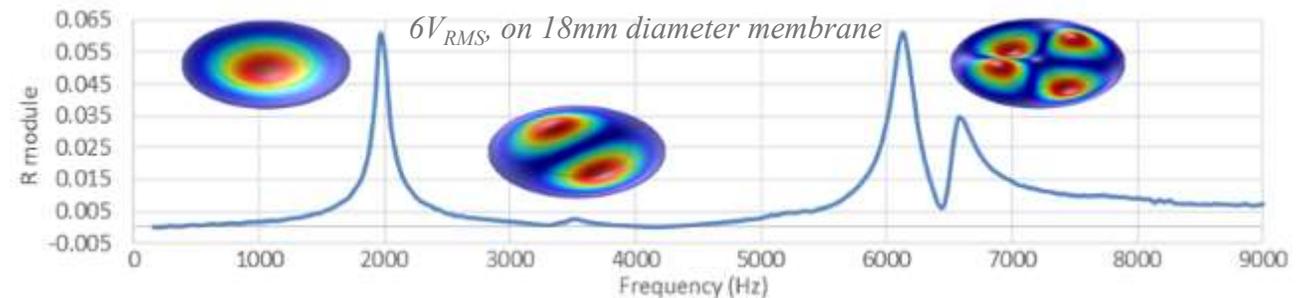
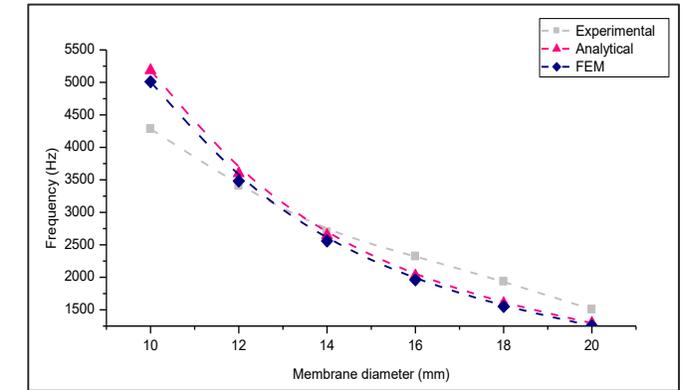
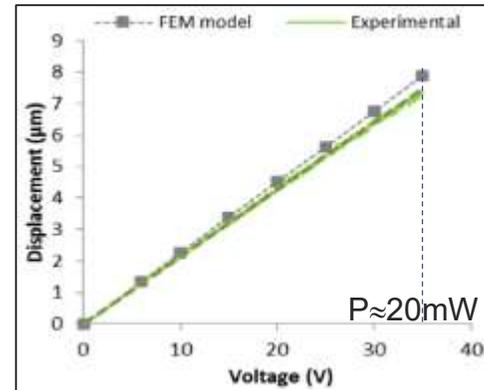
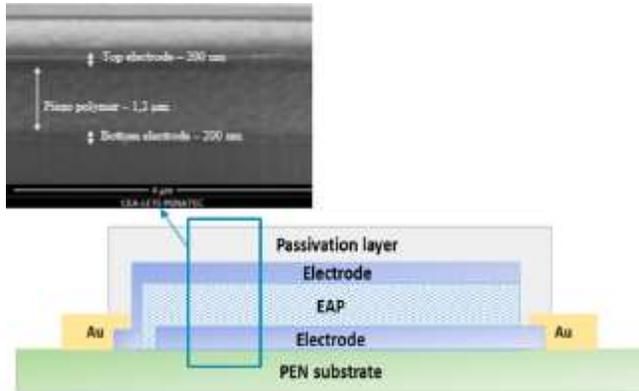
Les polymères électroactifs (EAP)

ELECTRO-ACTIVE POLYMER

- Properties:
 - ✓ Low piezo coefficient
 - ✓ Low mechanical properties
 - ✓ Low cost / Large scale



- Des actionneurs piézoélectriques sur polymères



Bon accord modélisation / mesure
 Forts déplacements à basse fréquence
Preuve de concept effet vibrotactile à basse tension (<35V_{RMS})

Les polymères électroactifs (EAP)

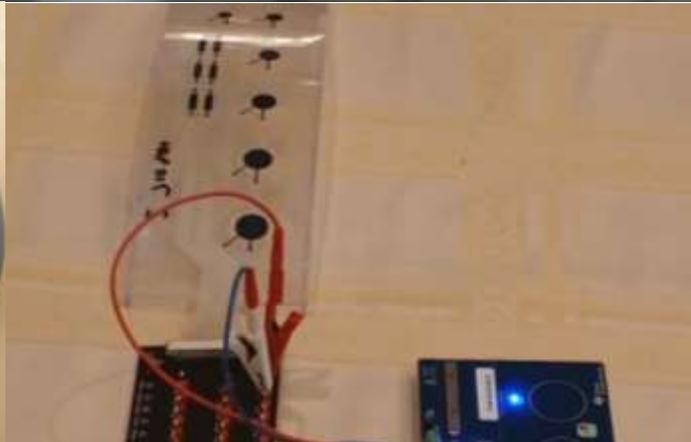
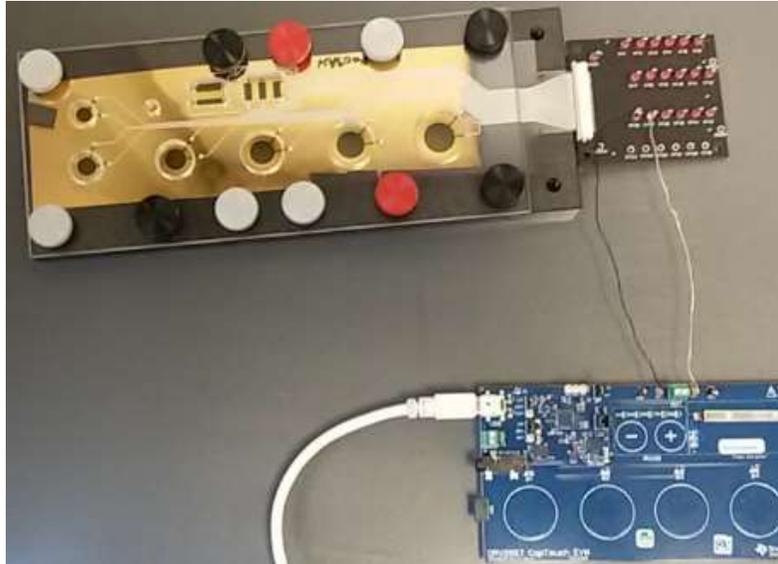
- Mais limité au vibrotactile → Faible d_{31} ($\approx -1\text{pm/V}$), Freq audible



ELECTRO-ACTIVE POLYMER

Properties:

- ✓ Low piezo coefficient
- ✓ Low mechanical properties
- ✓ Low cost / Large scale



Nécessité de bénéficier d'un matériau piézo plus performant pour générer des effets haptiques complexes

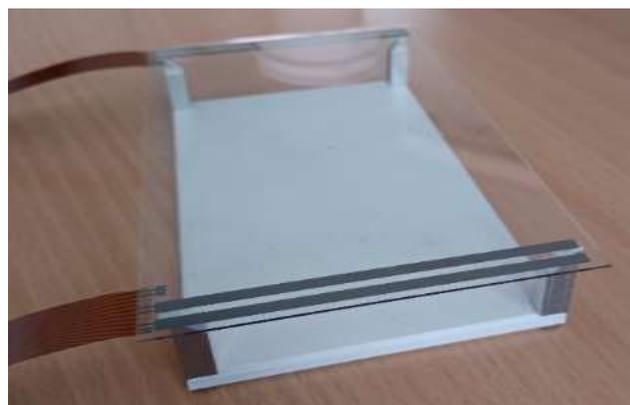
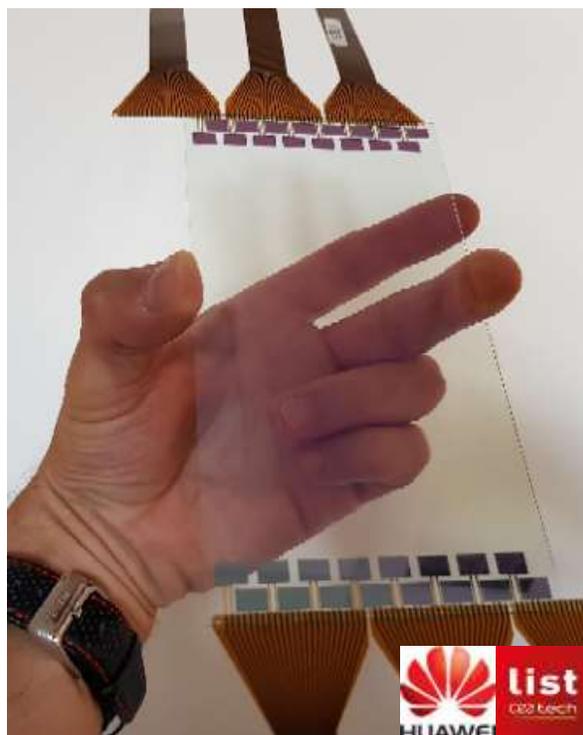
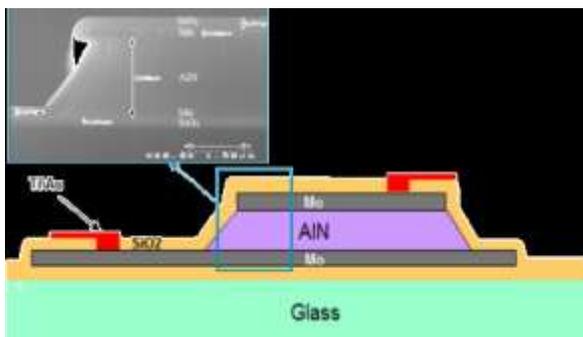
Les Technologies en couches minces

ALN
(ALUMINIUM NITRIDE)

- Properties:
 - ✓ Low piezo coefficient
 - ✓ High mechanical properties
 - ✓ High temp. stability



- L'AIN: un matériau piézoélectrique intégrable sur verre



- Technologie salle blanche & équipements industriels
- Substrat en verre 200 mm
→ Démonstrateurs haptiques

Les Technologies en couches minces

ALN
(ALUMINIUM NITRIDE)

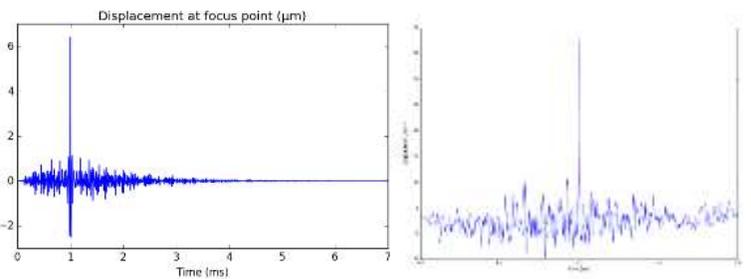
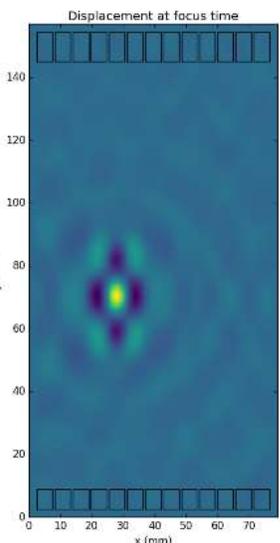
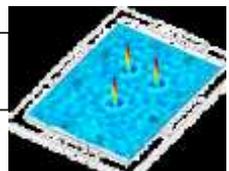
- Properties:
 - Low piezo coefficient
 - High mechanical properties
 - High temp. stability



- Preuve de concept d'un effet haptique avec actionneurs en ALN ($d_{31} \approx -3\text{pm/V}$)



Time reversal



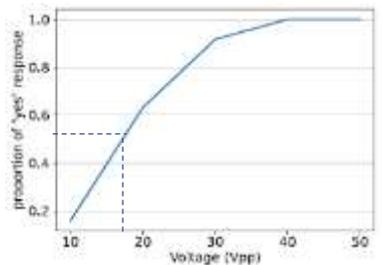
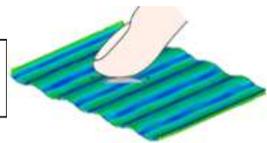
BandWidth: [25-125] kHz
 Voltage: 180 Vpp
 Number of actuators: 26
 Actuator Material: ALN
 Actuator Thickness: 2 μm
 Actuator dimension: 5.0 x 6.5 mm / 5.0 x 9.5 mm
 T = 1 ms

Max displacement = 6.4 μm
 Contrast = 14.5
 Spatial resolution = 5.0 mm
 Temporal resolution = 5.6 μs

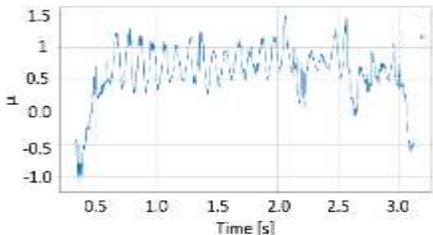
Déplacement 6,8 μm
 (28 actionneurs, 180Vpp) et effet haptique perceptible



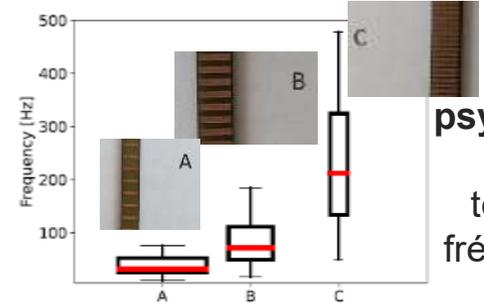
Modulation de friction



Seuil de perception @ 17V
 Mode de Lamb @ 67.2kHz



Mesure de la réduction de friction (45% @ 10Hz de modulation et 48Vpp)



Campagne psychophysique prouvant la discrimination de 3 textures via différentes fréquences de modulation

[C.Hudin, World Haptics 2017]

[T. Goubault, IEEE EuroSime 2024]

Peut on augmenter les performances haptiques ($\nearrow d_{31}$) ?

Les Technologies en couches minces

PZT

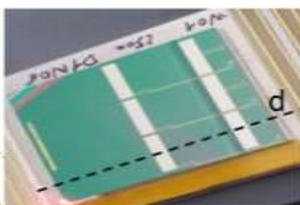
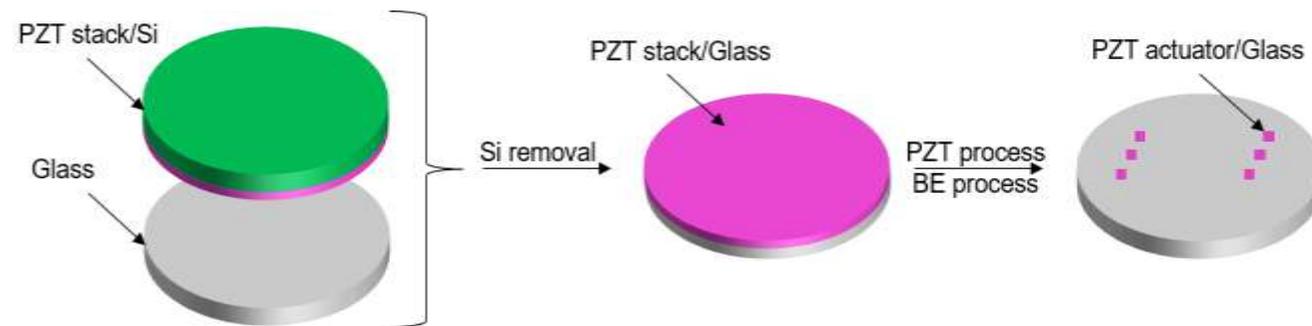
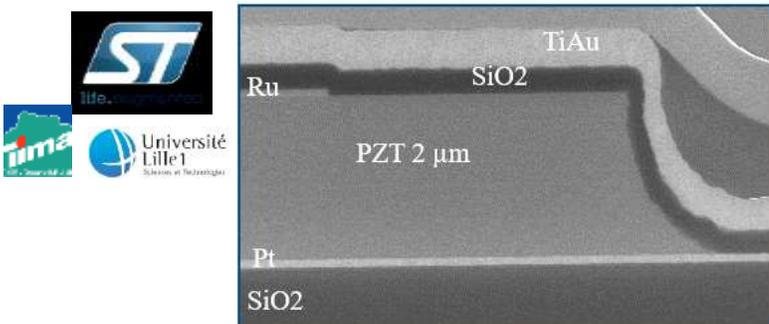
(LEAD ZIRCONIUM TITANATE)

■ Properties:

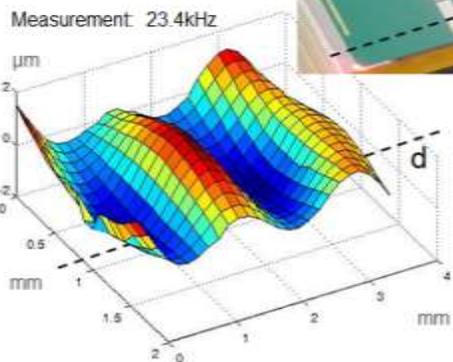
- ✓ High piezo coefficient
- ✓ High K
- ✓ Low mechanical properties

■ **Le PZT: le champion du d_{31} ($\approx -180\text{pm/V}$)**

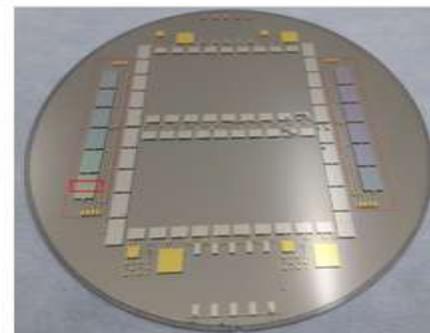
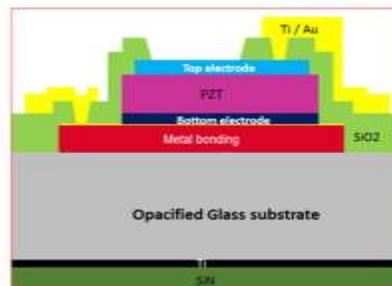
➤ **Déposé sur Silicium (recuit $> 700^\circ\text{C}$)** → Technologie de **report sur verre**



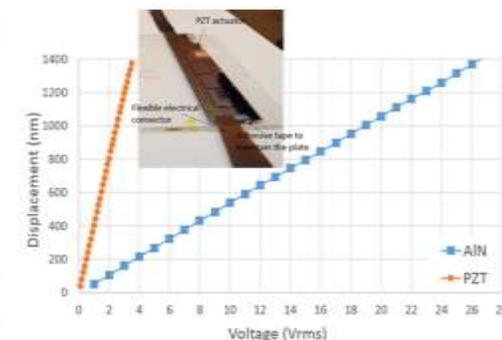
Plaque Si $40 \times 30\text{ mm}^2$
 $F = 52.5\text{kHz}$
 Déplacement $1.2\mu\text{m}$
 $V_{dc} = 12\text{V} + V_{ac-p-p} = 8\text{V}$



Effet haptique par modulation de friction perceptible en modulant à 10Hz



Plaque verre $10 \times 2\text{ cm}^2$
 $F = 9.2\text{kHz}$, Déplacement $1.4\mu\text{m}$, $V_{dc} = 5\text{V} + V_{ac} = 3.5\text{V}_{\text{rms}}$
Effet haptique par modulation de friction ressenti en modulant à 10Hz



[F. Casset, IEEE MEMS 2019]

[F. Casset, Transducers 2013]

Comment peut on intégrer des actionneurs piézo sur une interface représentative ?

La Technologie « Piezo-in-Flex »

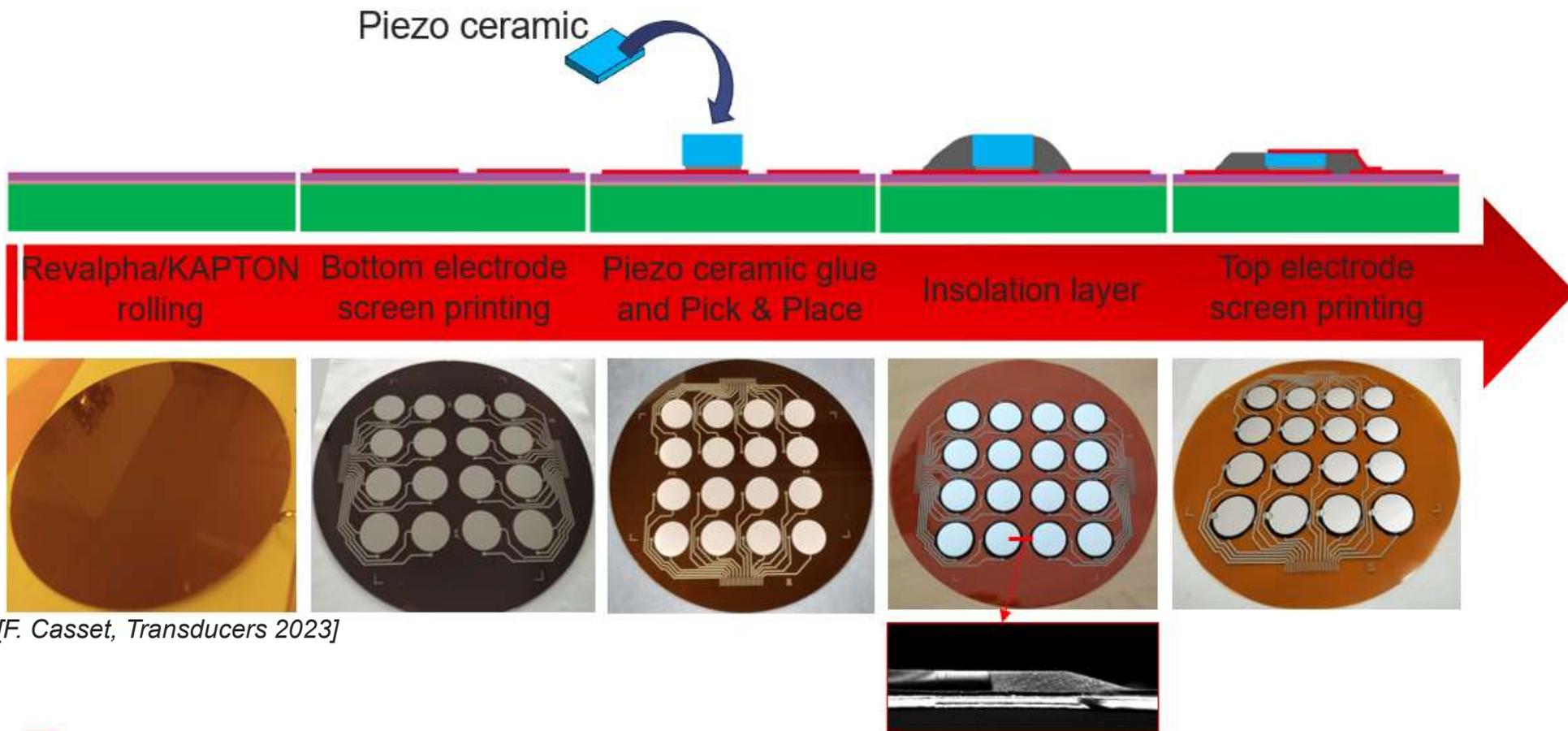
■ Intégration collective d'actionneurs piézoélectrique en PZT

- Equipements industriels (sérigraphie, Pick & Place)
- Intégration collective → Pas de report et connexion 1 à 1 des actionneurs...

PIEZO CERAMIC

■ Properties:

- ✓ High piezo coefficient
- ✓ Pick & Place
- ✓ Commercially available



La Technologie « Piezo-in-Flex »



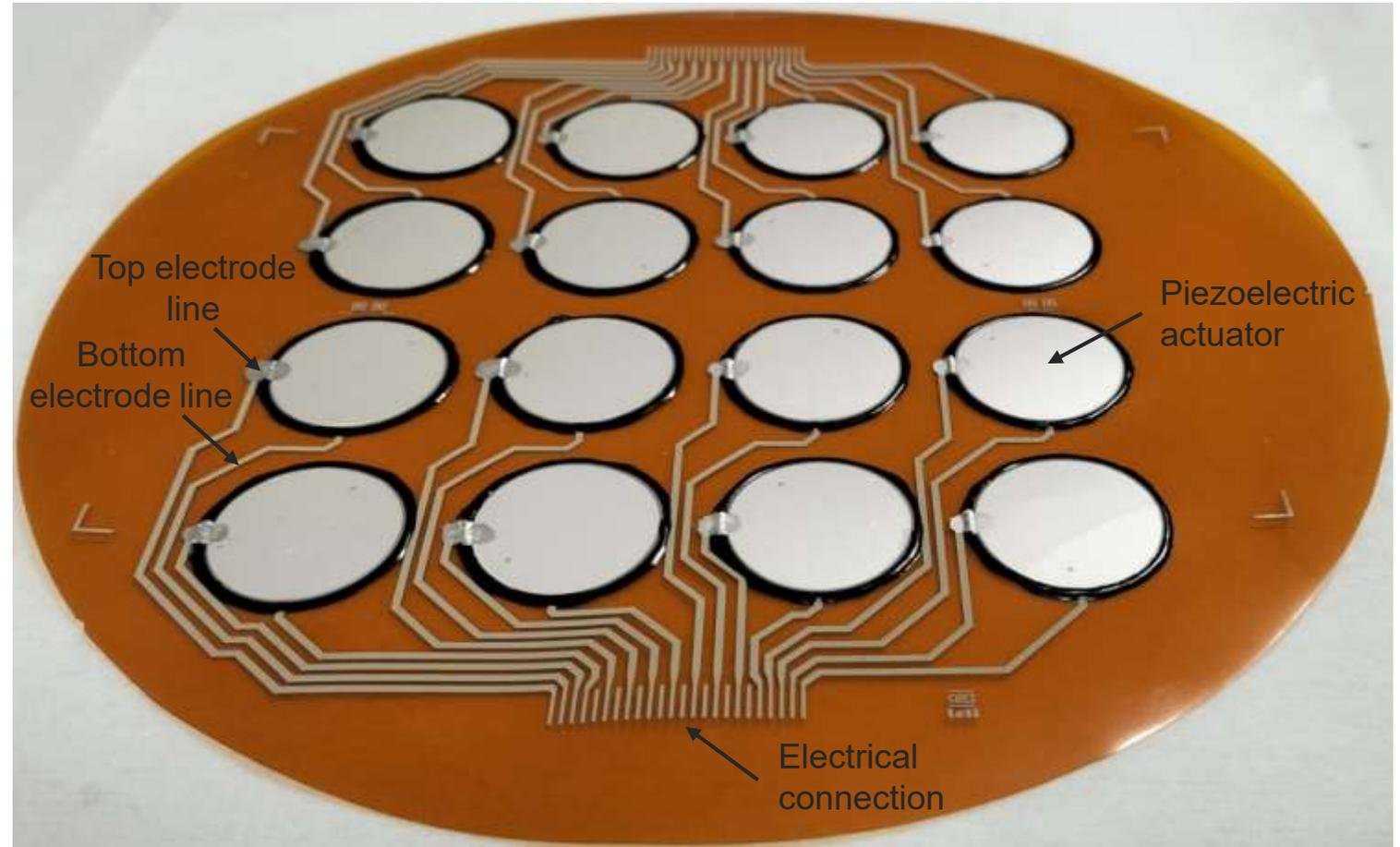
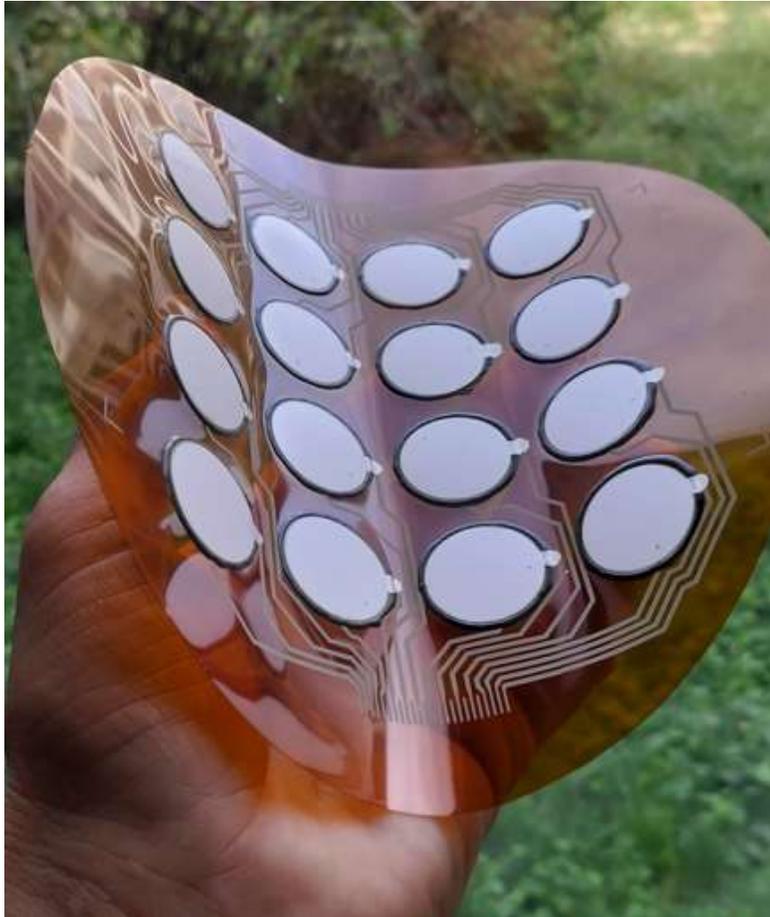
Haptic Tablet for the Accessibility of Digital Content to the Visually Impaired

PIEZO CERAMIC

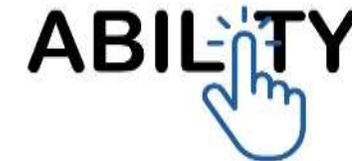
- Properties:
 - ✓ High piezo coefficient
 - ✓ Pick & Place
 - ✓ Commercially available



- Vignette piézoélectrique flexible et conformable



La Technologie « Piezo-in-Flex »



Haptic Tablet for the Accessibility of Digital Content to the Visually Impaired

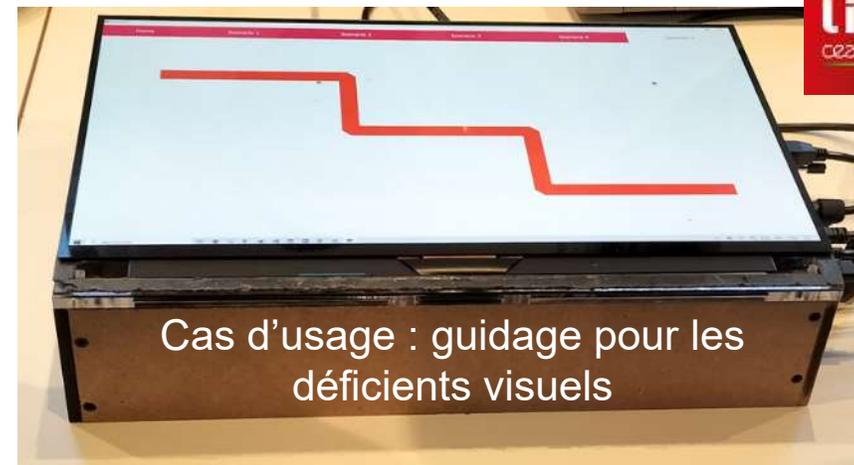
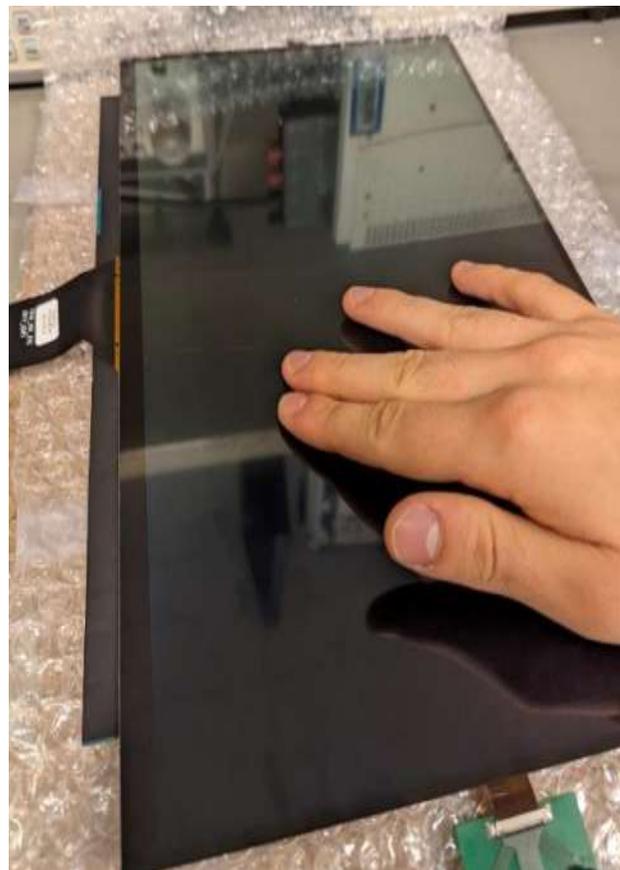
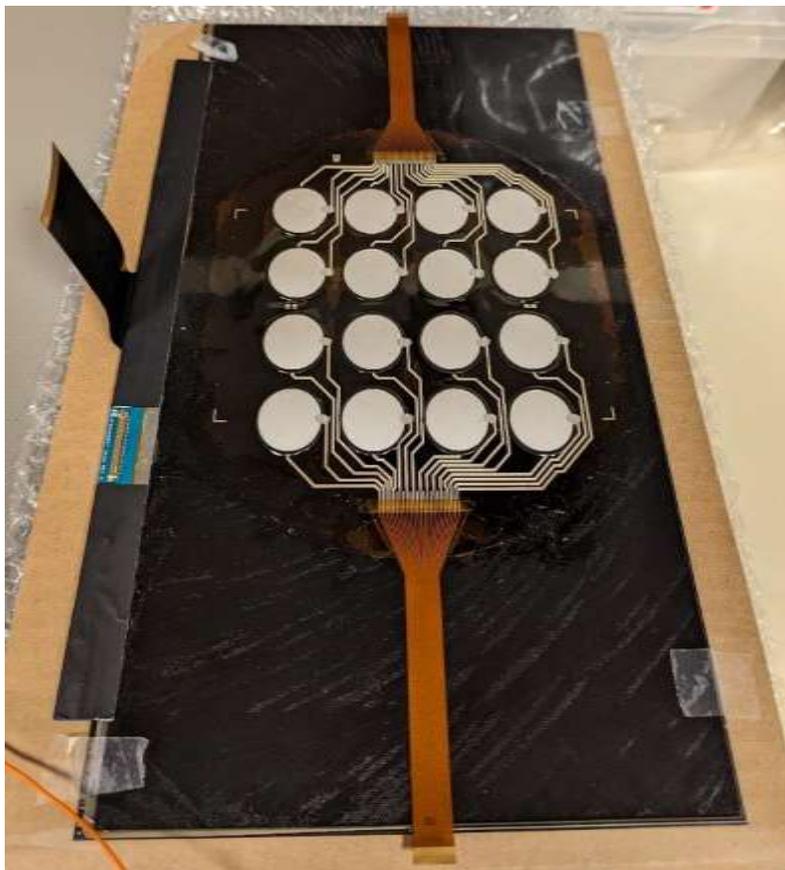
PIEZO CERAMIC

- Properties:
 - ✓ High piezo coefficient
 - ✓ Pick & Place
 - ✓ Commercially available



- **Preuve de concept → Intégration sur un écran OLED**

- Démonstrateur haptique pour les malvoyants: Principe du **Filtre inverse**
- Thèse **Théotime Goubault**



Cas d'usage : guidage pour les déficients visuels

Effet haptique localisé à partir de 20Vpp
@ 500Hz (fort effet @ 50Vpp)
Evaluation dans le cadre d'ABILITY
(workshop avec malvoyants)

Vers une interface haptique flexible

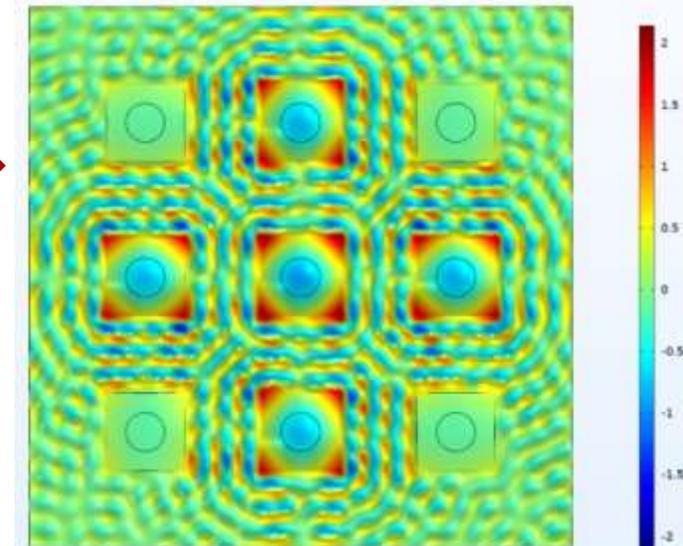
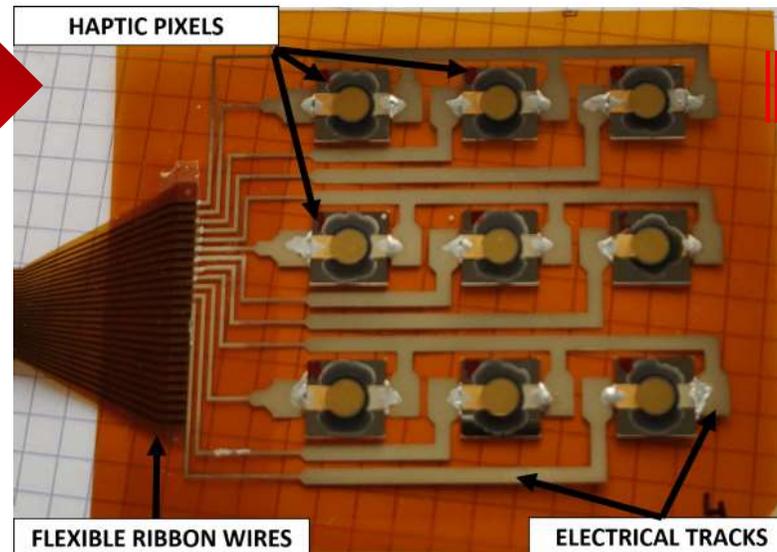
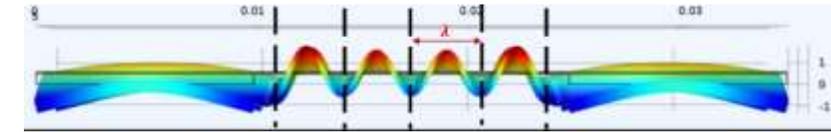
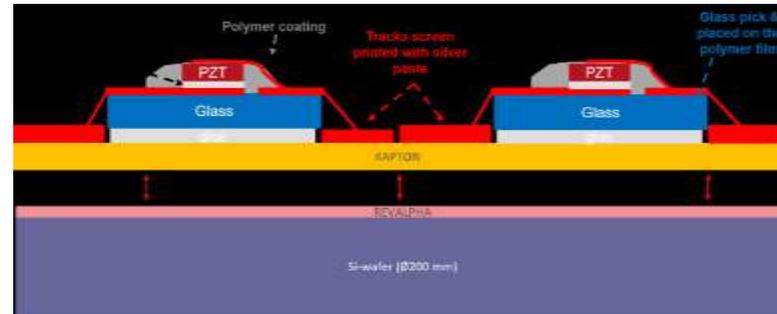


PIEZO CERAMIC

- Properties:
 - ✓ High piezo coefficient
 - ✓ Pick & Place
 - ✓ Commercially available



- Matrice de pixels haptiques rigides intégrés à une matrice flexible
 - Principe de la modulation de friction
 - Thèse Romain Le Magueresse



Vers une interface haptique flexible



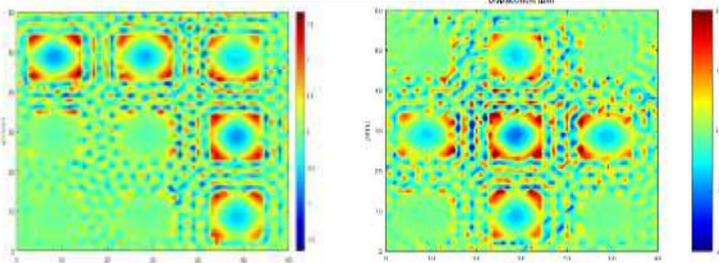
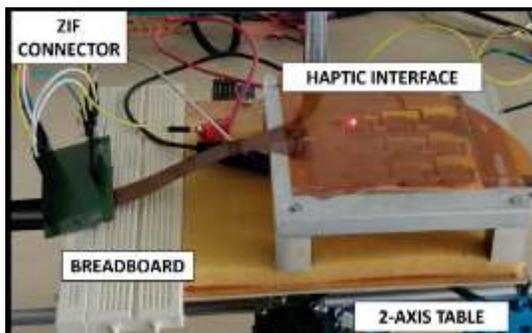
PIEZO CERAMIC

- Properties:
 - ✓ High piezo coefficient
 - ✓ Pick & Place
 - ✓ Commercially available



- Preuve de concept d'une interface haptique flexible

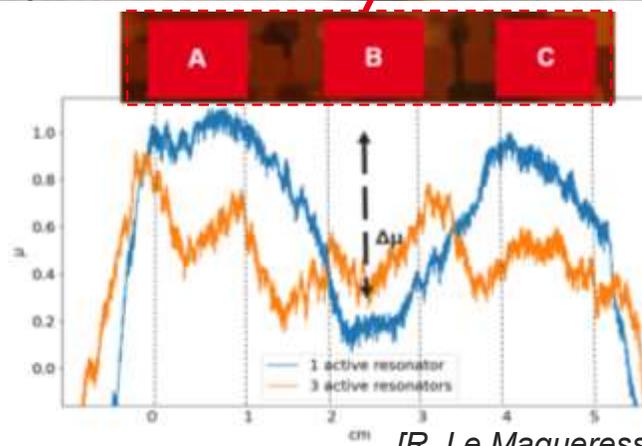
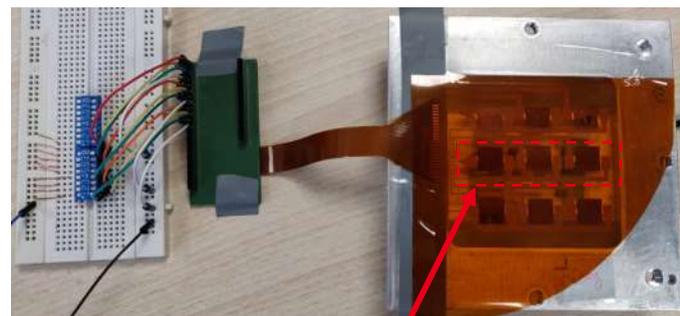
Electromécanique



Vibromètre laser: $F=31.7\text{kHz}$
 Déplacement $> 2\mu\text{m}$ @ 40Vpp
 [R. Le Magueresse, IEEE EuroSime 2022]
 [R. Le Magueresse, EuroHaptics 2022]

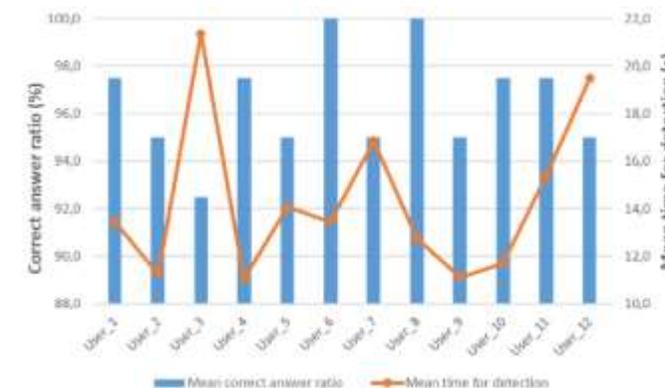
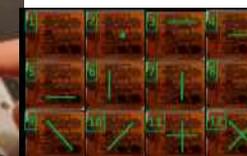
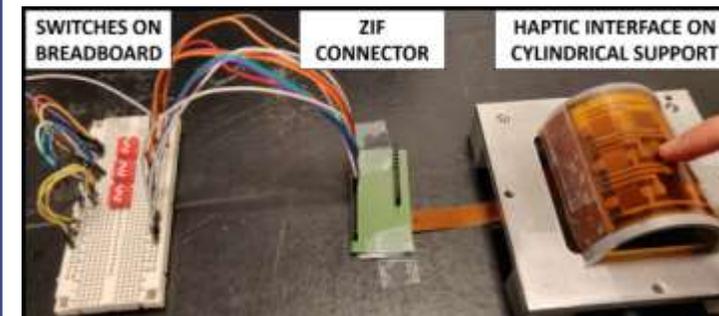
Possibilité de générer des formes complexes

Tribologie



Preuve de concept de la réduction de friction

Psychophysique



Taux de bonne réponse global 96,46 %

Preuve de concept de la discrimination de formes

Conclusions

- **Intérêt de développer des interfaces haptiques multi sensorielles**

- Augmenter & renforcer l'accès à l'information numérique



- **Développer des technologies intégrant des actionneurs piézoélectriques**

- Intégration & ↗ le TRL → techno « Piezo-in-Flex »



- **Preuve de concept d'un effet haptique via diverses technologies**

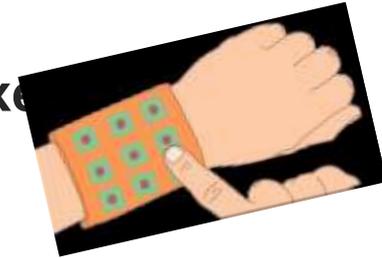
- Couches minces → fort d_{31} , technologies industrielles
- « Piezo-in-Flex » → technologies industrielles, conformabilité & flexibilité



Perspectives

- **Valoriser nos technologies par des interfaces haptiques complexes**

- Démonstrateur « piezo-in-flex » multi sensoriel
- Démonstrateur flexible
- Vers de nouvelles collaborations...

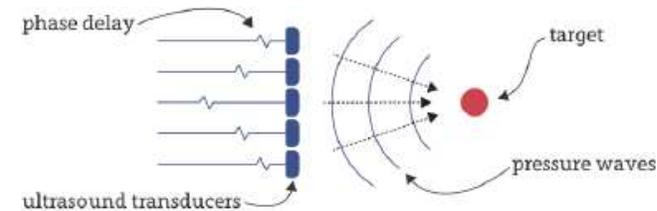


ABILITY

Haptic Tablet for the Accessibility of Digital Content to the Visually Impaired

- **Vers l'haptique sans contact**

- Effet haptique « mid-air » par la focalisation des ondes US
- [F. Casset, WiP Eurohaptics 2024]



- **Vers les actionneurs piézoélectriques transparents**

- ↗ Intégration & Performances



Transparent PZT actuator stack on Glass



[G. Le Rhun, Transducers 2019]

