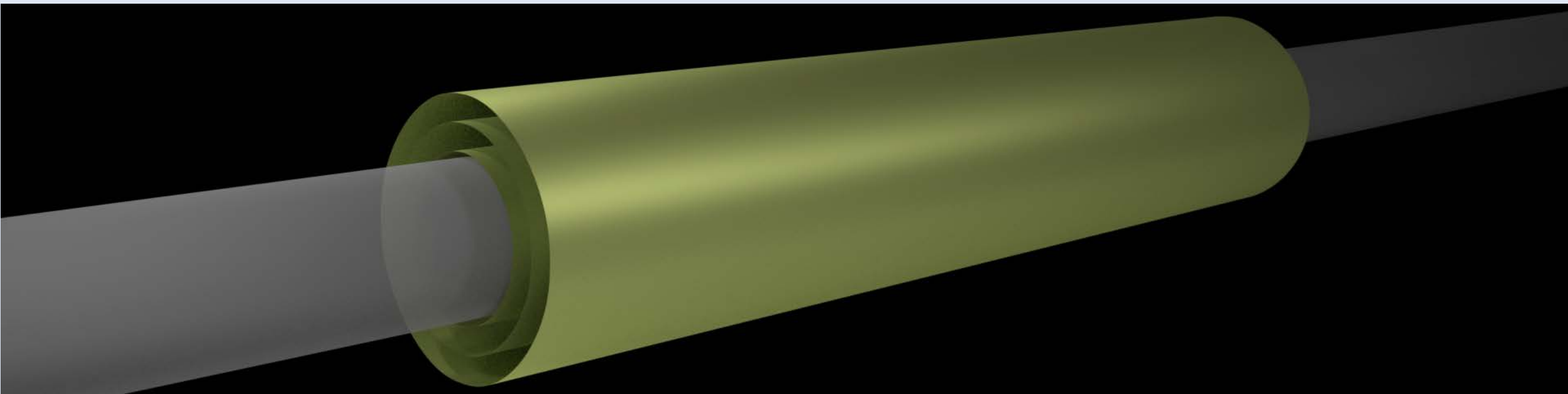


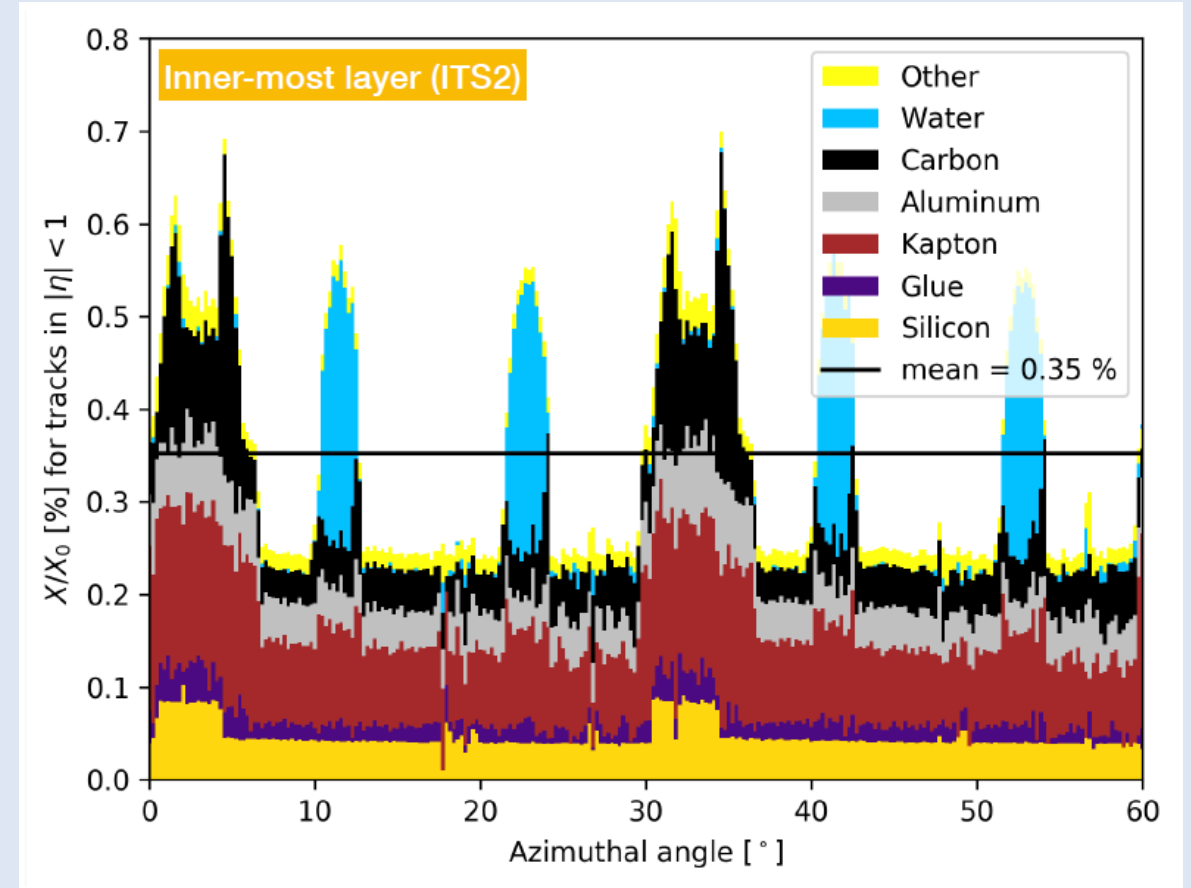
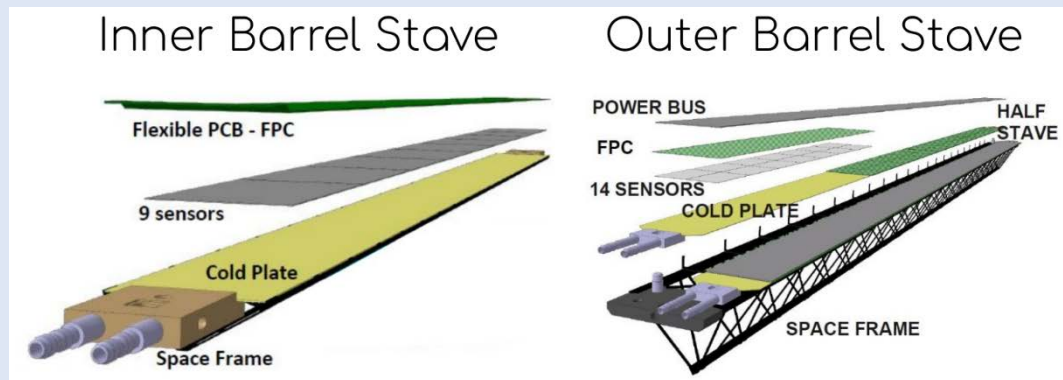
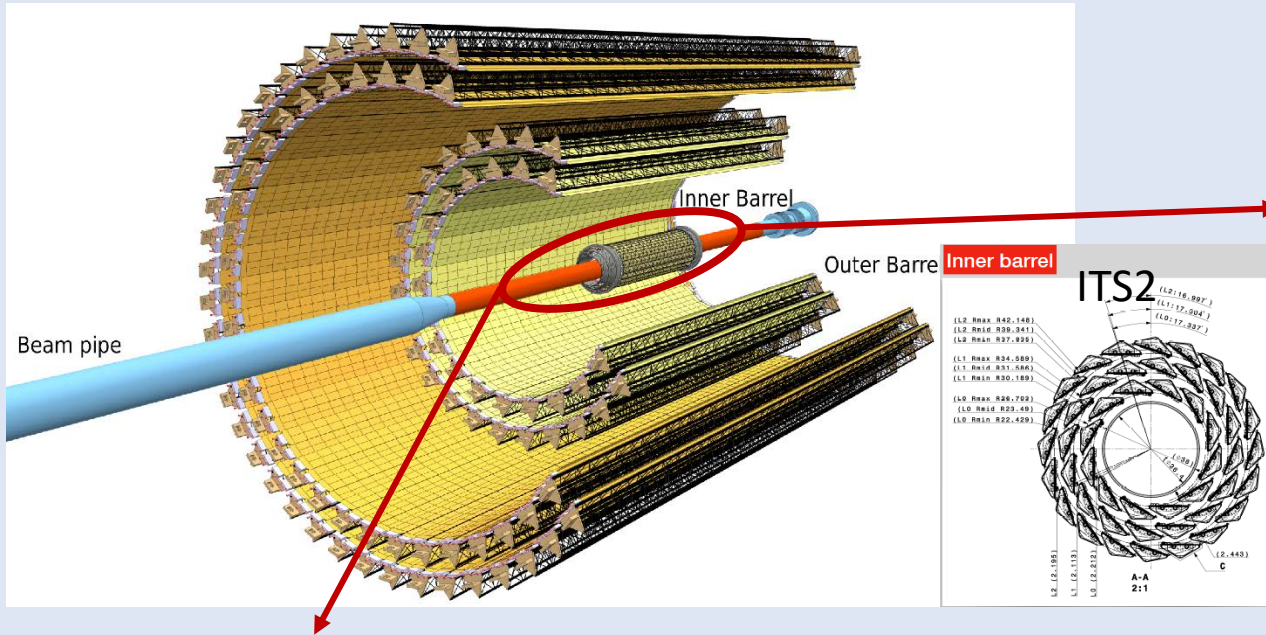
# Capteurs à pixels intégrés CMOS courbés et autres réalisations microtechniques à IPHC-C4PI



JME 13-15 juin 2023 - Caen



Un faible budget matière est un critère important dans la réalisation d'un tracker.  
 Il influe sur la précision et l'efficacité de reconstruction des traces  
 L'exemple de l'ITS-2 d'ALICE:



Le silicium représente uniquement 1/7 du budget total

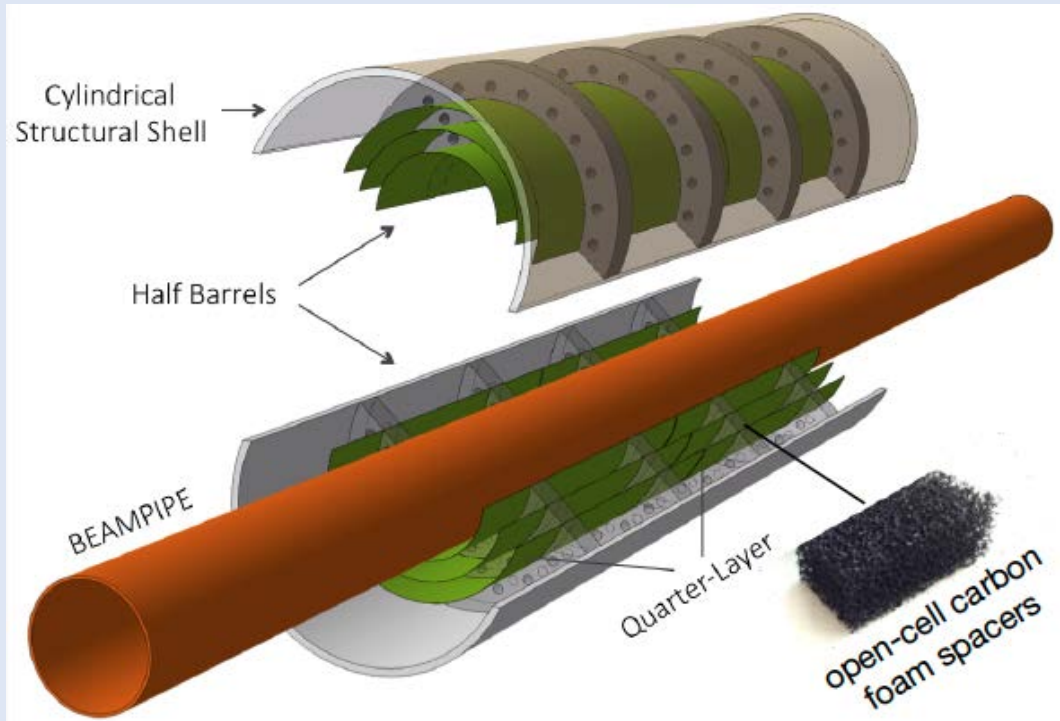
Magnus MAGER:

[https://indico.cern.ch/event/860914/contributions/3626138/attachments/1956071/3249152/2019-12-04\\_ITS3-impl.pdf](https://indico.cern.ch/event/860914/contributions/3626138/attachments/1956071/3249152/2019-12-04_ITS3-impl.pdf)

Pour réduire le budget matière il faut idéalement

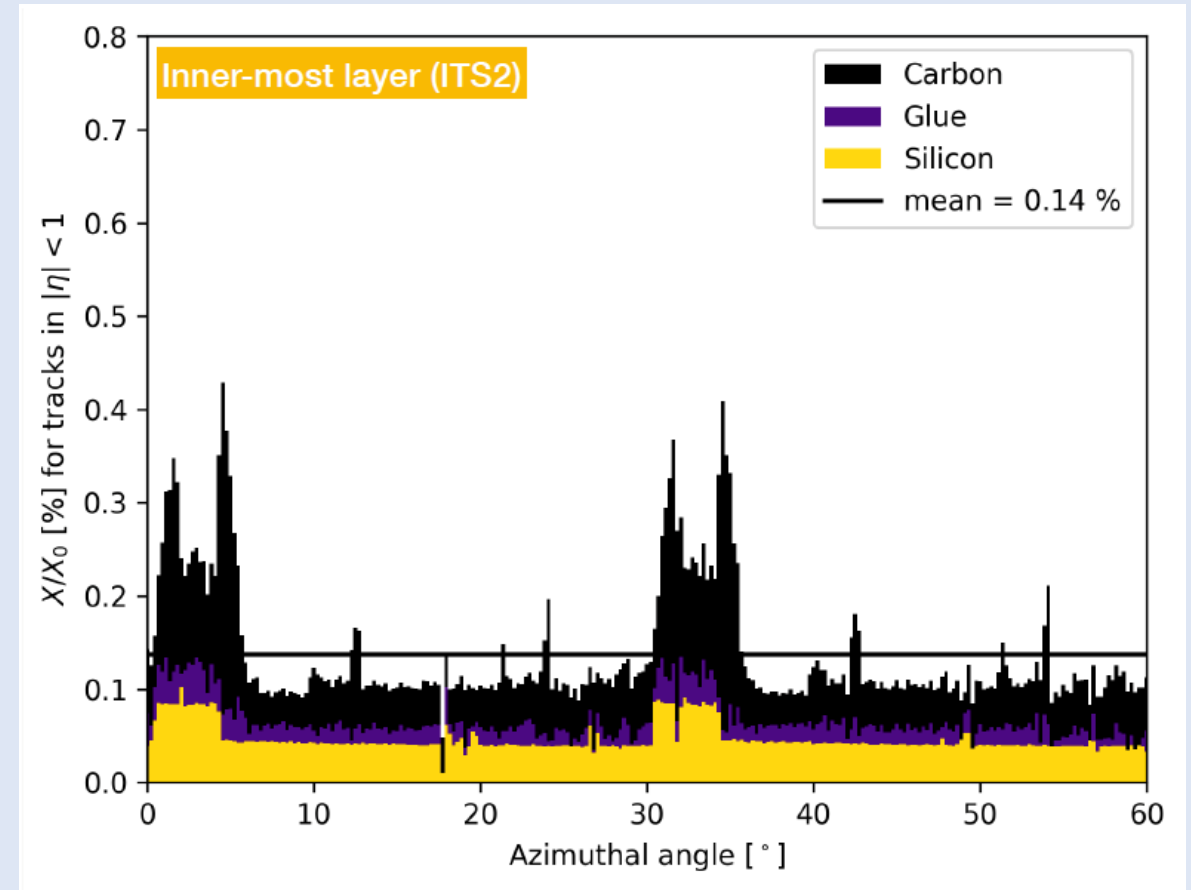
- Supprimer le refroidissement à eau (faible puissance,  $<20 \text{ mW/cm}^2$ )
- Supprimer la distribution des puissances et des signaux (1 seul circuit de grande taille embarquant ces fonctions)
- Limiter le support mécanique dans la zone d'acceptance du détecteur (profiter de la rigidité procurée par un capteur courbe)

### Inner barrel ITS3



WP4, une R&D à part entière, indépendamment de la conception du capteur de  $\sim 14 \times 29 \text{ cm}^2$

Voir présentation du capteur MOSS par Xiaochao FANG

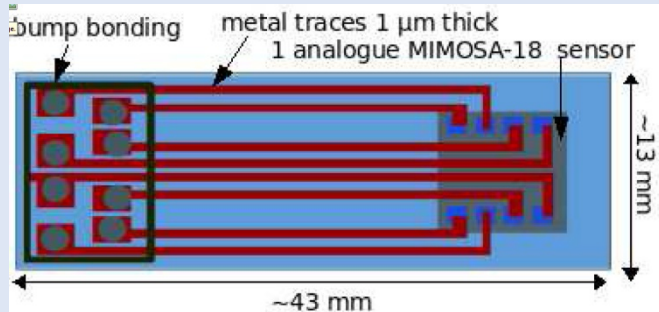


**Historique 2010:** Dans le cadre de la R&D pour l'ILC

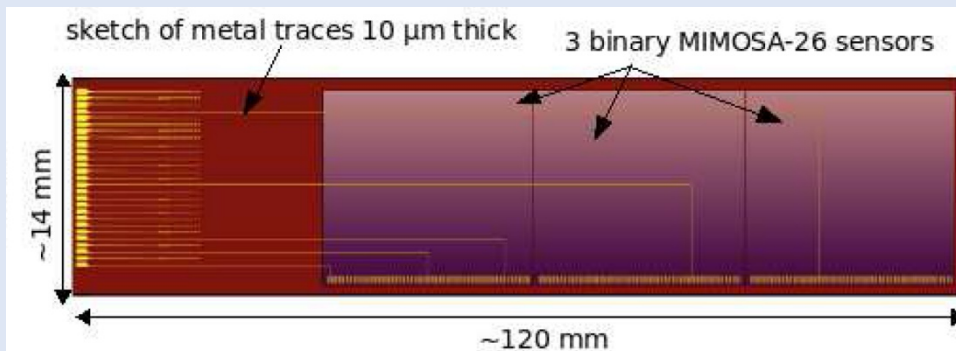
Le programme SERWIETE: SEnsor Raw Wrapped In an Extra Thin Envelope

- A partir de capteurs existants MIMOSA, aminci à 30-50 $\mu$ m
- Dans un film polymérisé participant à la structure mécanique et à l'interconnexion
- Pour un budget matière recherché de 0.15% de longueur de radiation

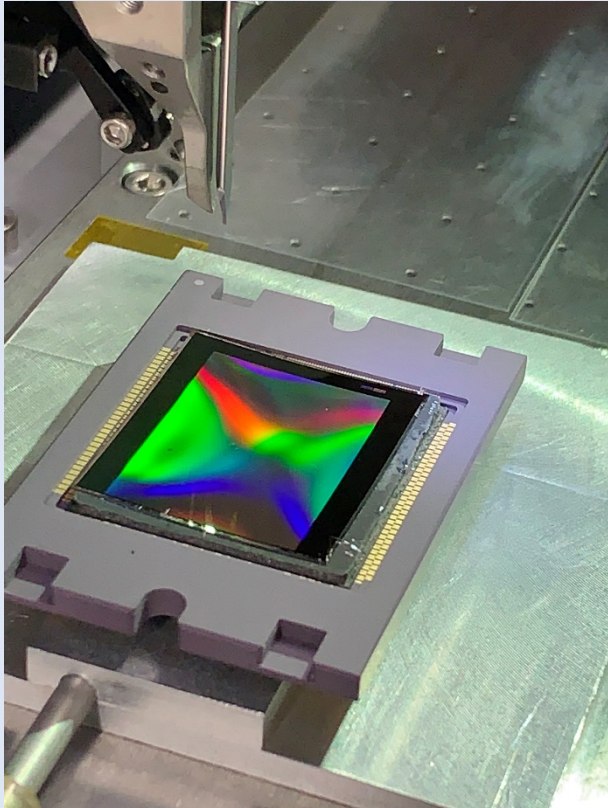
• 1<sup>ère</sup> étape 2010



• 2<sup>ème</sup> étape prévue pour 2011 mais non finalisée

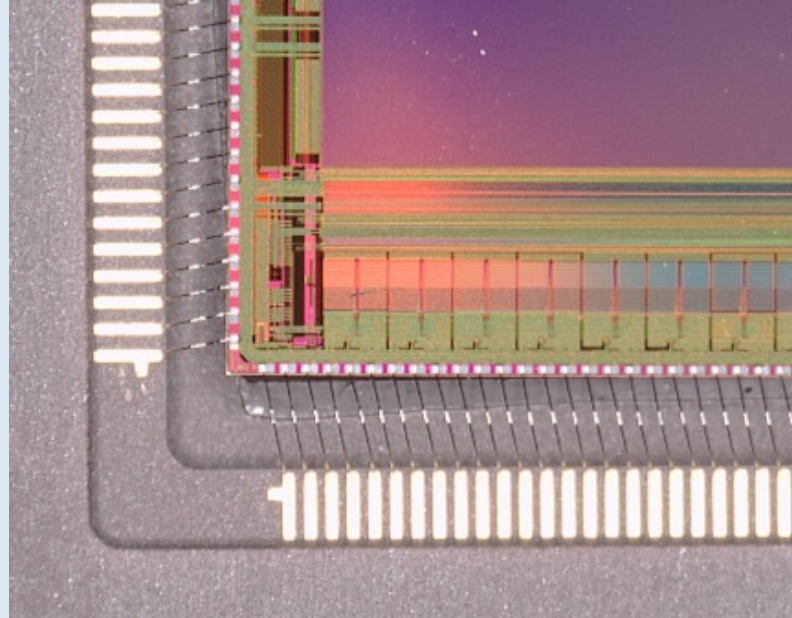


- Une courbure adaptée à la forme du plan focal afin de relâcher les contraintes de l'optique d'imagerie

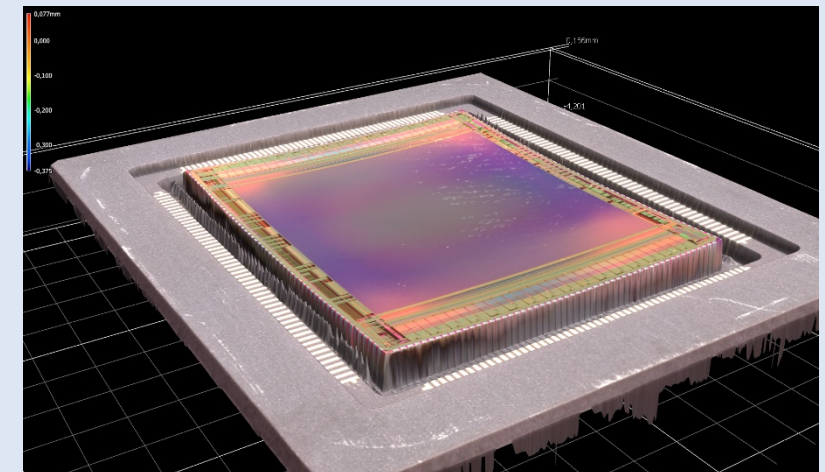
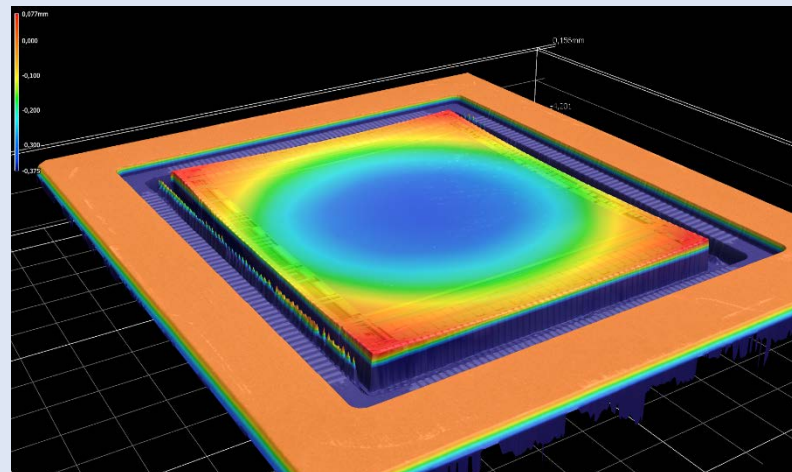


Capteur CMOS concave 15,6 x 18,6mm  
Rayon courbure env. 300mm en X et en Y

- Des prestations régulières pour le LAM et pour la startup SILINA (sous NDA)



- Env. 380 fils répartis sur les 4 côtés
- Réalisé en 16 étapes pour suivre le rayon de courbure et par plage de différentes hauteurs
- Temps d'exécution du bonding : 4h
- Cf: Christophe WABNITZ

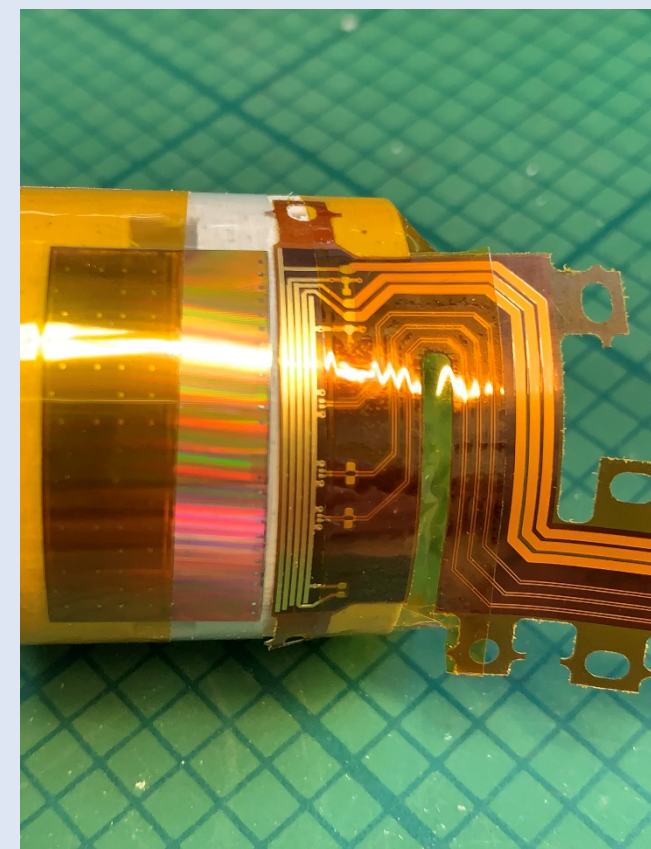


Profil du capteur – Profilomètre optique VR5000

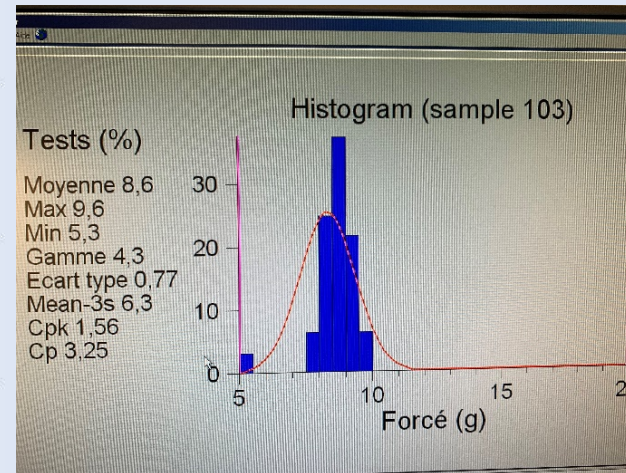
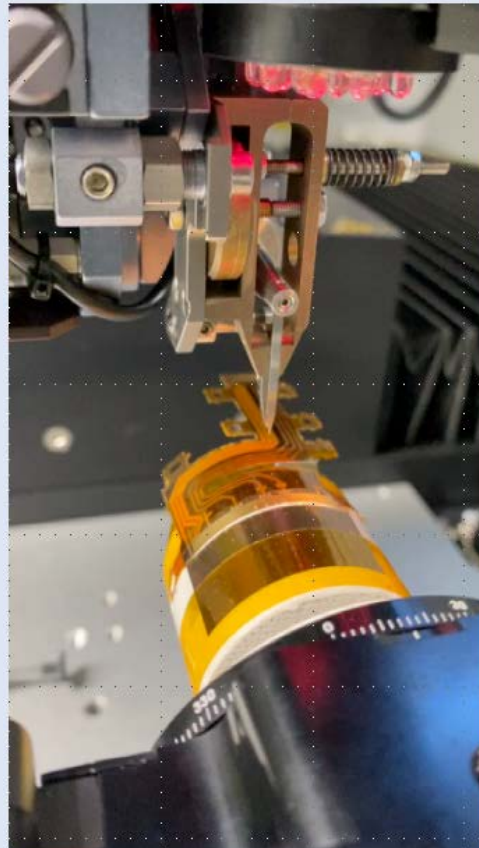


Études de faisabilité (octobre 2020), étape1

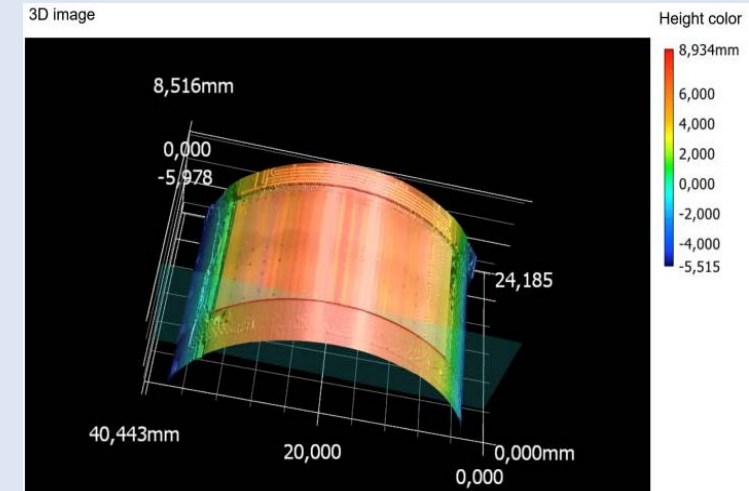
- Courbure d'un capteur CMOS ALPIDE , une taille réticulaire
- Bonding du capteur au PCBflex
  - En suivant le rayon de courbure



ALPIDE (15 x 30mm, ép. 50um)  
courbé à la main  
Rayon de courbure 18mm



Pulltests



Retour d'expérience:

- Pulltests montre que le bonding est dans les critères de qualité
- En pliant des dizaines de fois plusieurs capteurs, seuls 2 capteurs ont cassé (cumul de stress?)
  - Rendement très correct

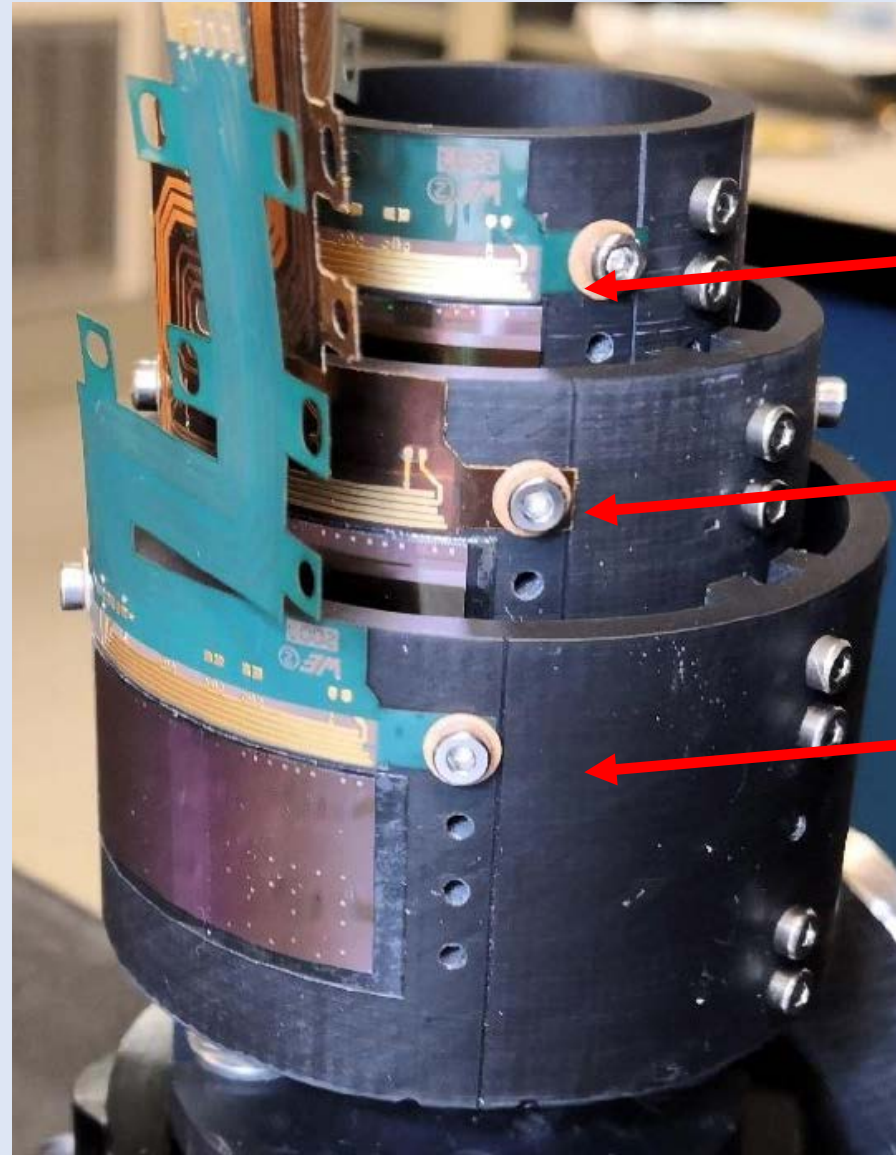


@C4PI-MT : Impression 3d et Bonding

Le bon fonctionnement des MAPS, type ALPIDE, courbés à un rayon d'environ 22 mm a été démontré en faisceau:

- Pas de dégradation systématique visible de la surface du capteur
- Pas de signes de dégradation du fonctionnement
- Seuils de détection des pixels non affectés
- Efficacité de détection mesurée > 99,9 %

<https://arxiv.org/abs/2105.13000> (27/05/21) : First demonstration of in-beam performance of bent Monolithic Active Pixel Sensors

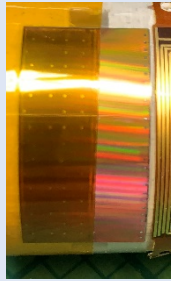


18mm radius

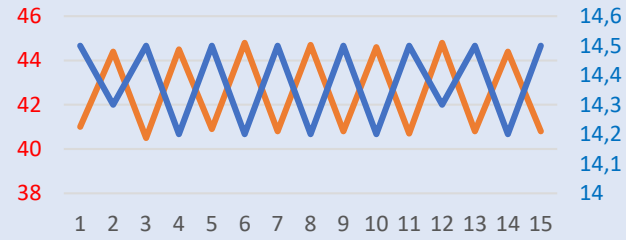
24mm radius

32mm radius

Résultats de février 2021 (Premiers résultats de la collaboration obtenus @C4PI-MT) - Etude faite sur R18mm, R24mm, R32mm

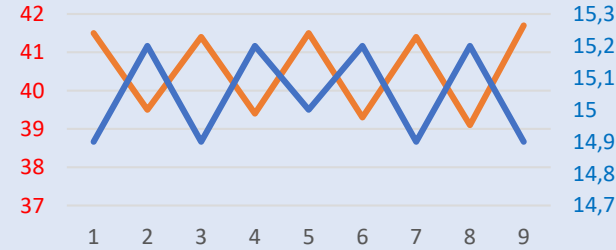


R18 - Substrate down



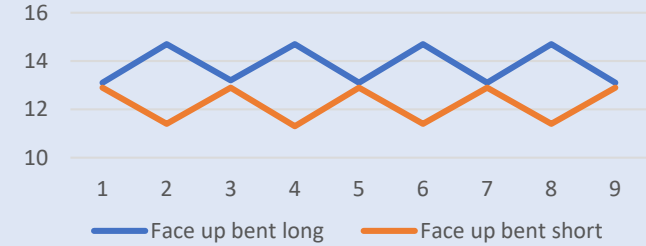
— Id (mA) — Ia (mA)

R18 - Substrate up



— Id (mA) — Ia (mA)

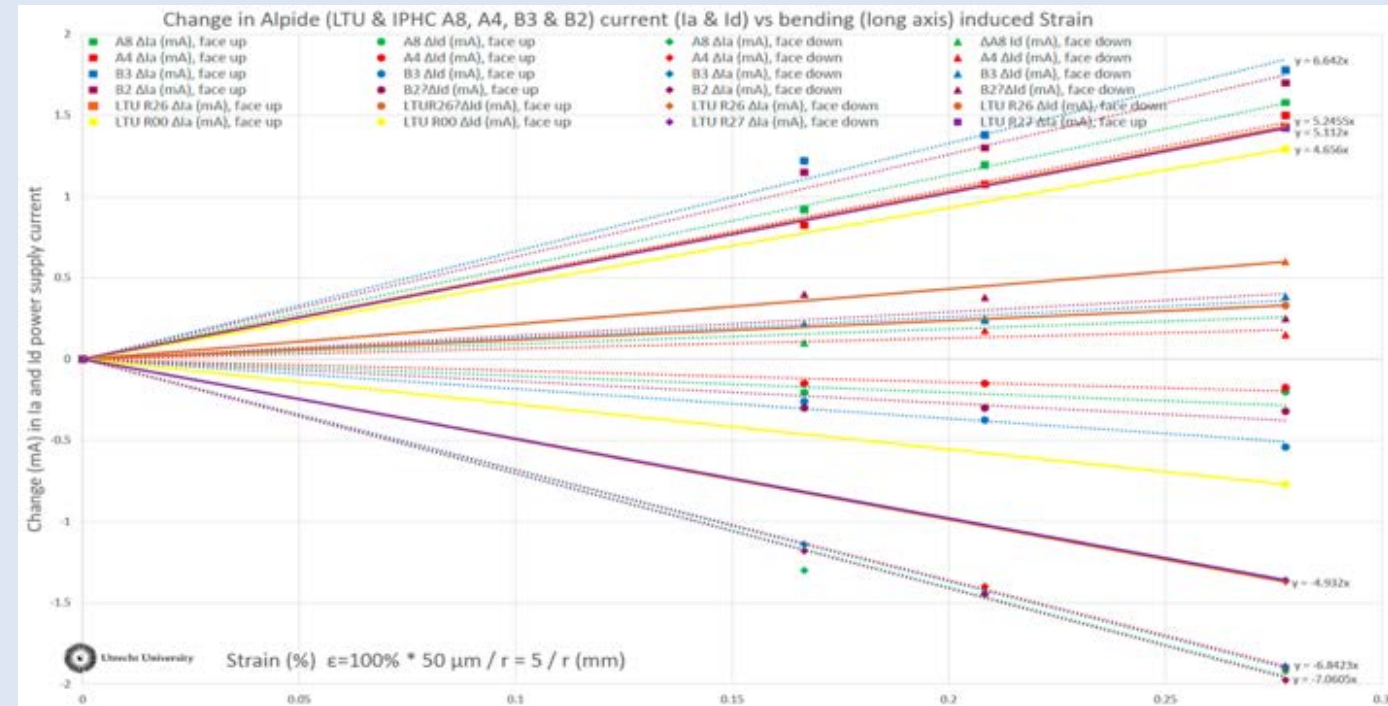
Ia - R18 - Face up - Bent long vs short



Nombres impairs : capteur plat  
Nombres pairs: capteur courbé

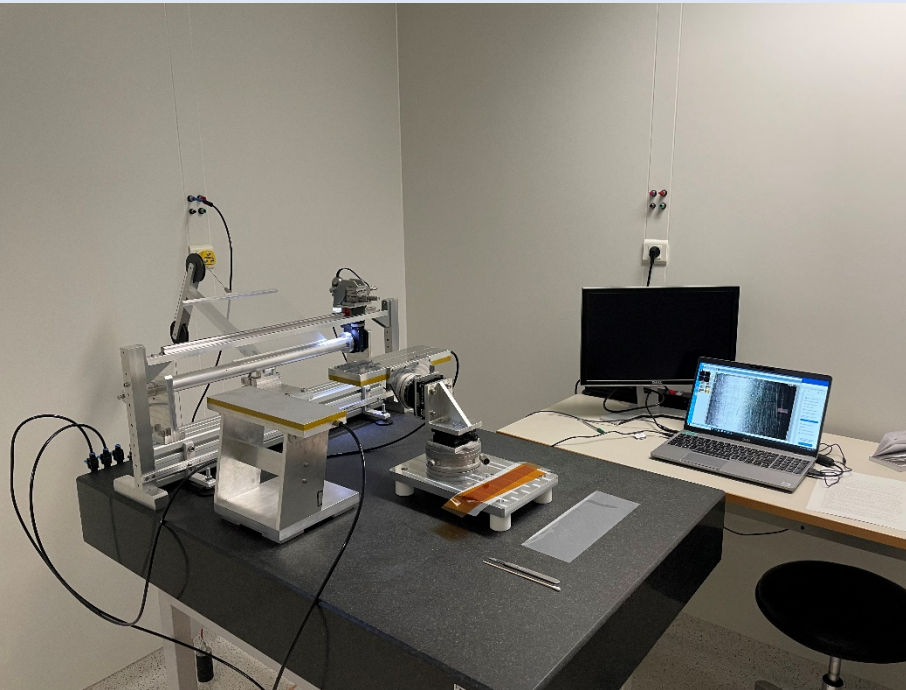
- Id : consommation de la partie digitale  
Variation d'environ 10% (R18mm)
- Ia : consommation de la partie analogique  
Variation d'environ 3% (R18mm)
- A ce stade pas d'incidence sur l'avancement du programme de R&D

Bonding de capteurs pour le LTU (Utrecht) qui a confirmé et compilé nos résultats





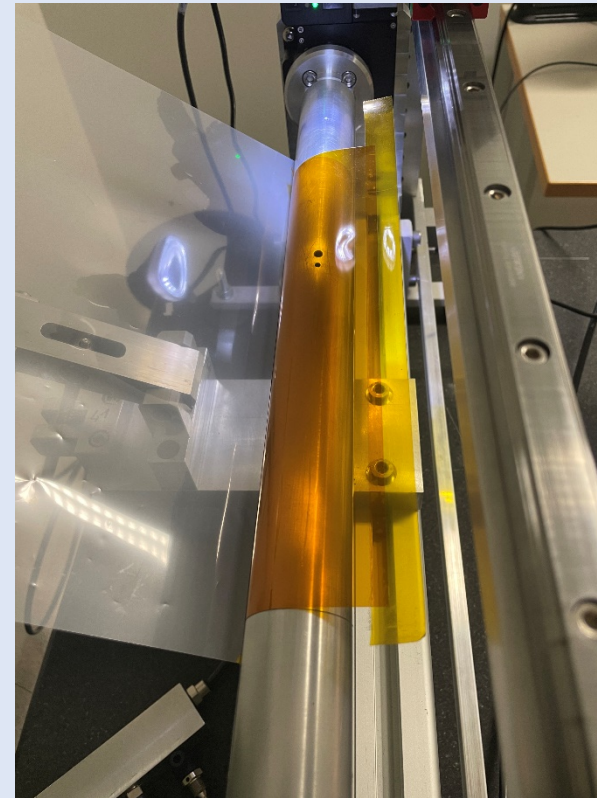
Entre temps : Etude bonding, étude encapsulation, mission à Bari



Duplication à IPHC du banc réalisé à Bari (Italie)

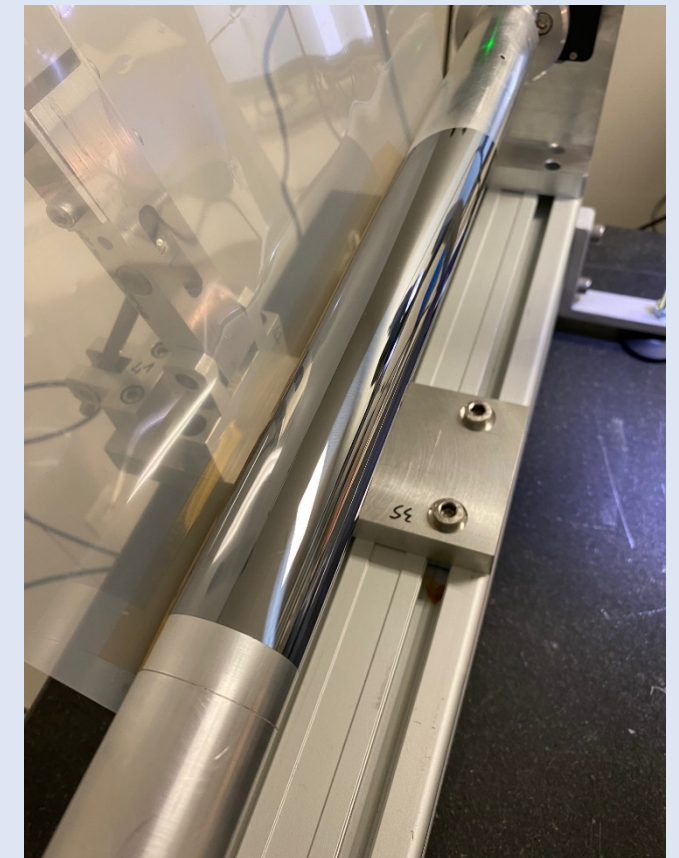
- Design, sous-traitance / impression 3D de pièce pour 15k€
  - Groupes PICSEL, ALICE, C4PI
- Installation en salle blanche

Spécification des pièces mécaniques :  $R_a = 1,2 \mu\text{m}$   
Utilisation METAPOR (métal poreux) pour aspiration des pièces.  
Table de translation et rotation NEWPORT



Déc. 2022:

- Mise œuvre protocole de pliage du WP4
- Simulation sur d'une feuille de Kapton
  - **Nécessité de 2 opérateurs**
    - 2<sup>e</sup> ingénieur (O. CLAUSE)



Fév. 2023

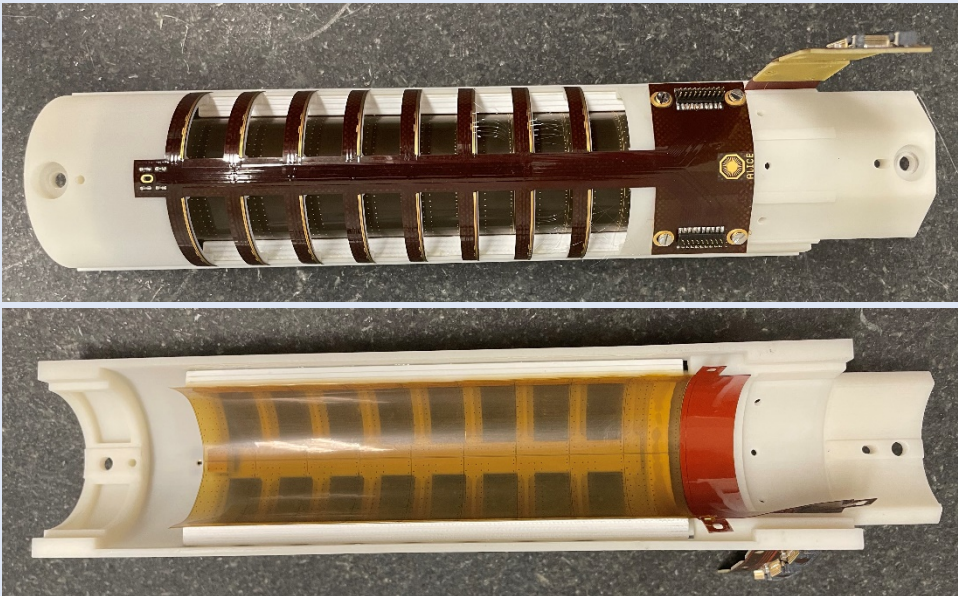
- Pliage sur un échantillon de lame de Si de  $20 \times 5 \text{ cm}^2$ , ép. 50um
- 2 fois sans casse
- **Manipulation extrêmement délicate**

Comment progresser sans structure mécanique et capteur existants ?

- Émuler l'intégration avec un exosquelette et un « Super-Alpide » (1 lame silicium de 9 x 2 Alpides, 14 x 6 cm<sup>2</sup>)

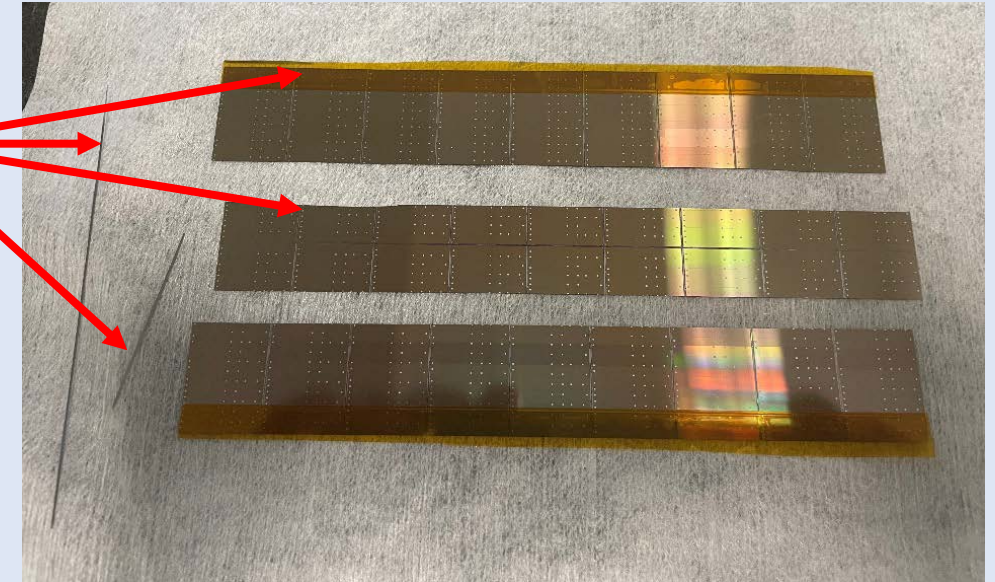
Étape 1: Mars 2023 – Entraînement à la procédure d'assemblage d'un Super-Alpide de mylar sur un exosquelette

Étape 2: Avril 2023 – Entraînement pliage d'un Super-Alpide Si (de type « Metal Pad Only »)  
Succès = 1/3



- Bonding de 16\*45 fils dans ouverture (9,5x27mm) de profondeur 8mm
- Bonding de 2\*45 fils avant mise en place exosquelette
- Longueur fil : env. 15mm !!!
- **Un design loin de l'objectif mais complexe à maîtriser**

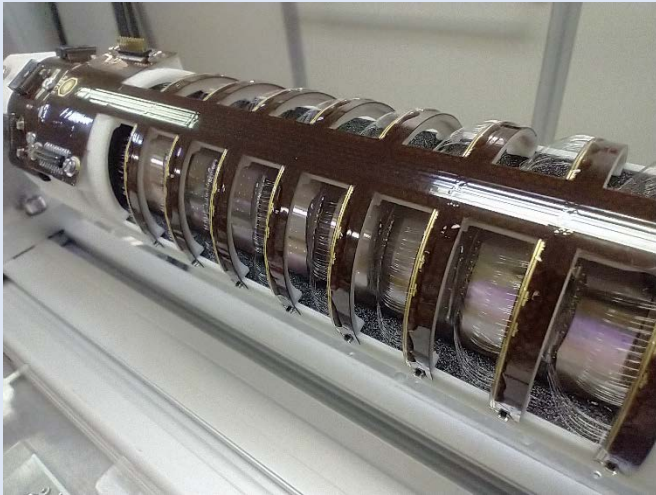
Cassures  
au  
moment  
du pliage



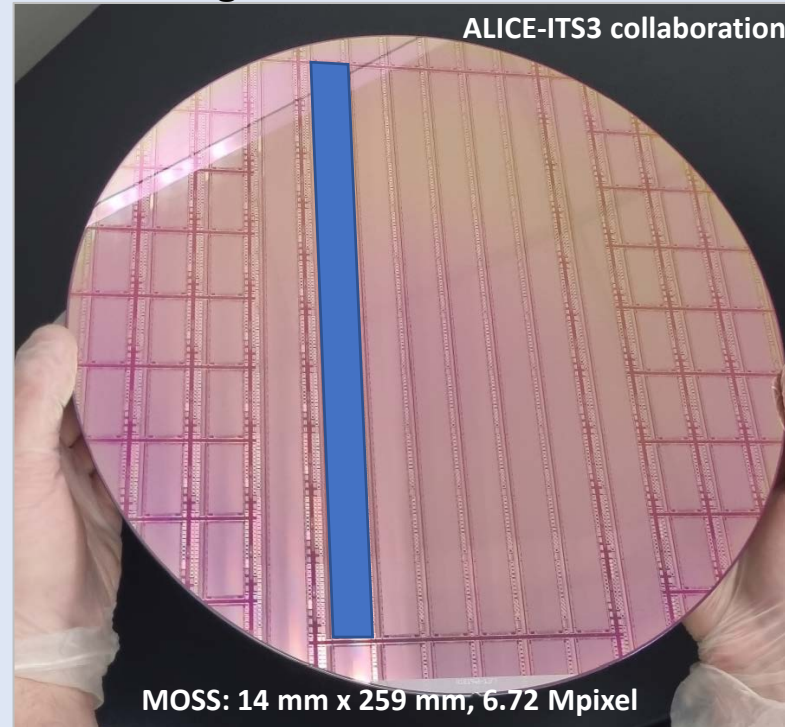
- 2\*9 Alpide, 14x6cm, ép. 40um) en vue d'une intégration sur un exosquelette. Avant montage:
  - Inspection optique minutieuse (surface et bord)
    - **Identifier les microfissures du silicium ?!**
  - Nettoyage des surfaces du silicium et des outils
    - **Qualité du mandrin très importante (Ra=0,4 μm)**

Consolider notre savoir-faire dans ce domaine « multi-physique / multidisciplinaire »

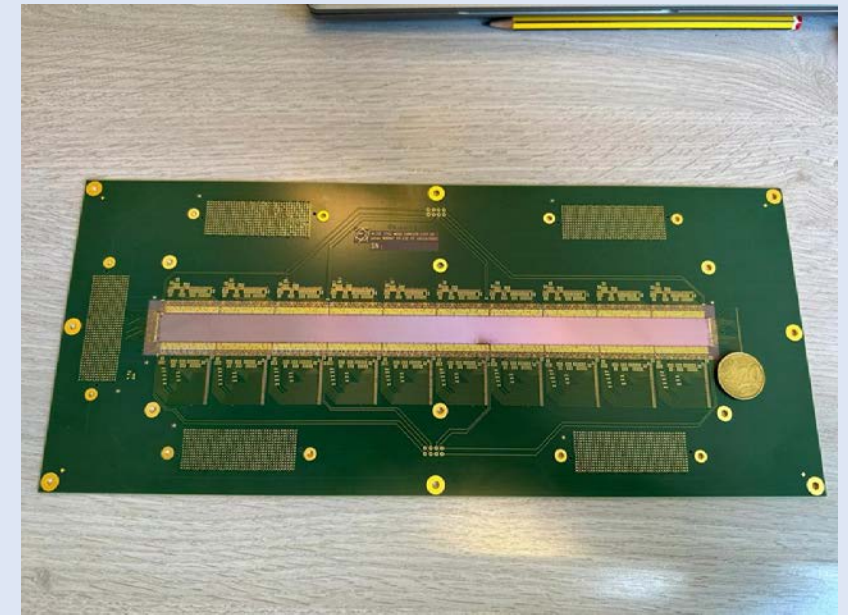
Réalisation de 3 objets complets avec des capteurs amincis à 50 $\mu$ m, 40 $\mu$ m, 30 $\mu$ m.



En attendant une possible intervention sur le design réel MOSS ...



... C4PI a contribué au bonding de MOSS Pad-Metal sur les machines du CERN

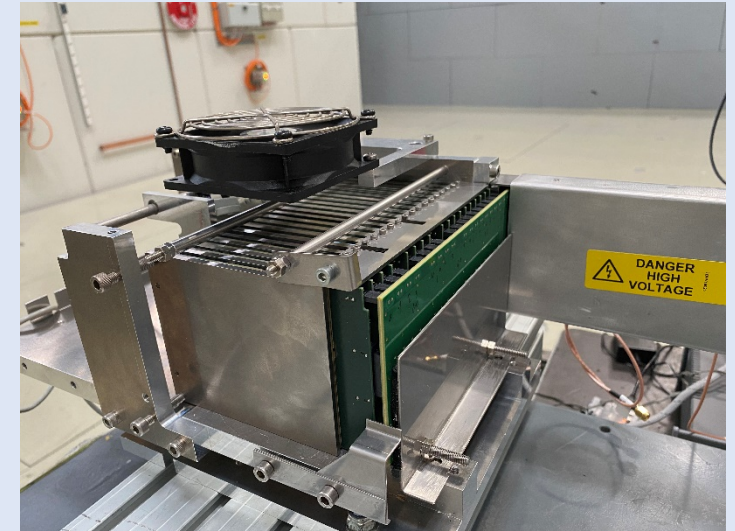
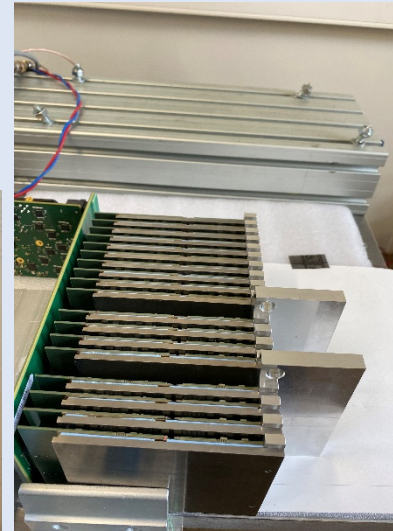
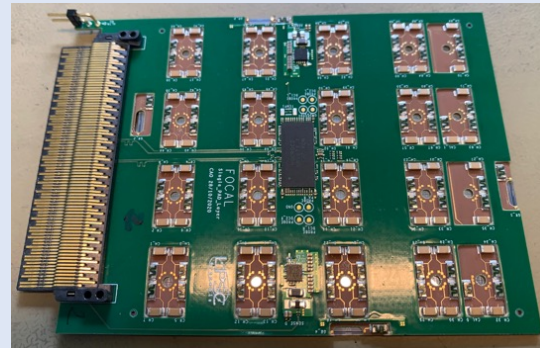
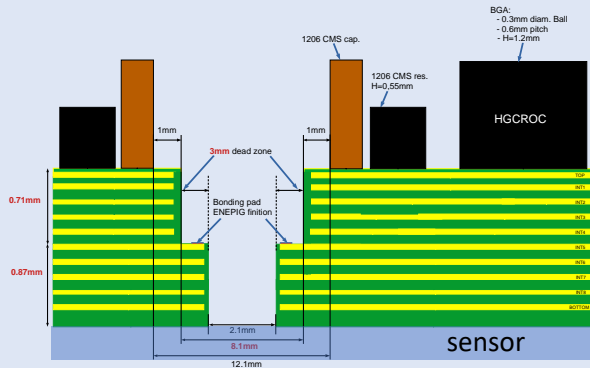


Les capteurs courbes un intérêt pour d'autres projets

- R&D pour FCCe<sup>+</sup>e<sup>-</sup> à partir de capteurs MIMOSIS développés au C4PI

2022 Prestation pour LPSC , projet ALICE – FoCal  
 Forward electromagnetic and hadronic calorimeter

- Réaliser des connexions sur structures épaisses et gd surface
  - “Tête deep access”

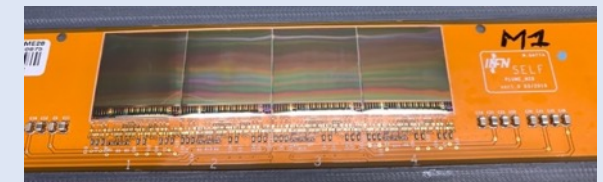
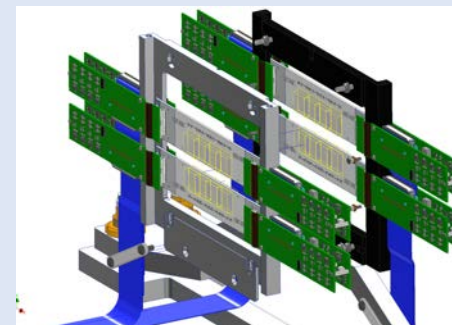
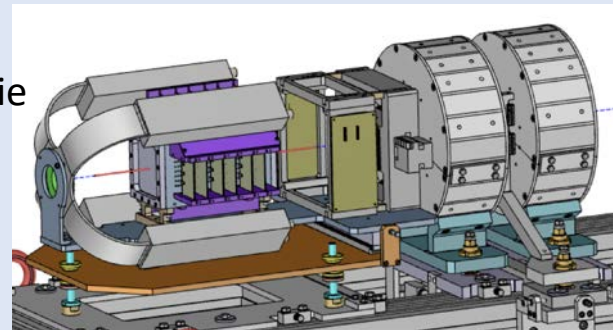


Papier (LPSC) : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/04/P04031>

FOOT (Collab. INFN): 2023  
 FragmentatiOn Of Target: Hadron-thérapie

Réalisation des 4 plans de détection du  
 Tracker interne

- 64 cm<sup>2</sup> double face
- 32 capteurs de 0.9 Mpixel
  - MIMOSA-28 - 20 x 20 mm – Ep. 50um



Plan de 2x 4 MIMOSA-28  
 Montés sur PCbflex  
 Support en carbure de silicium

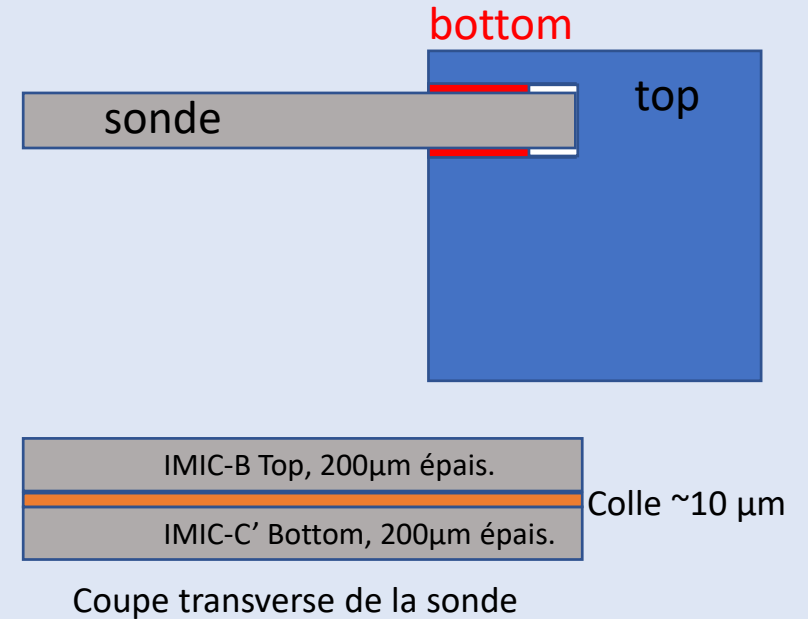
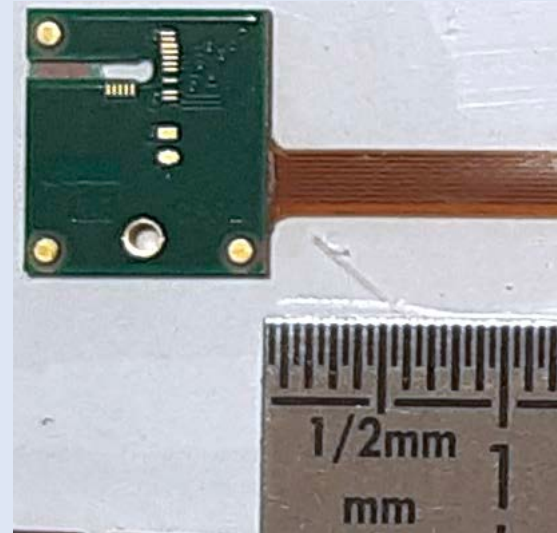
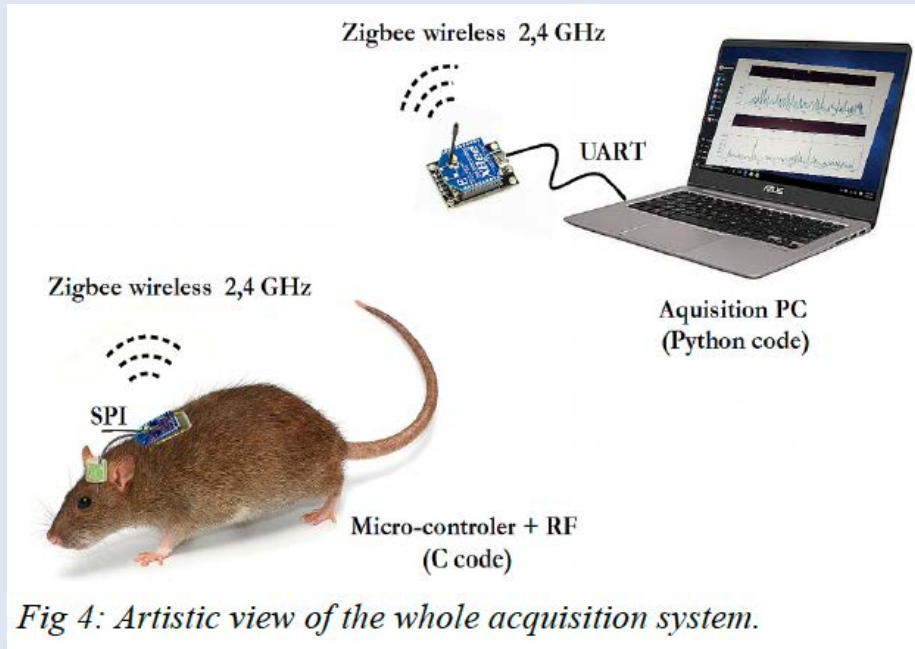
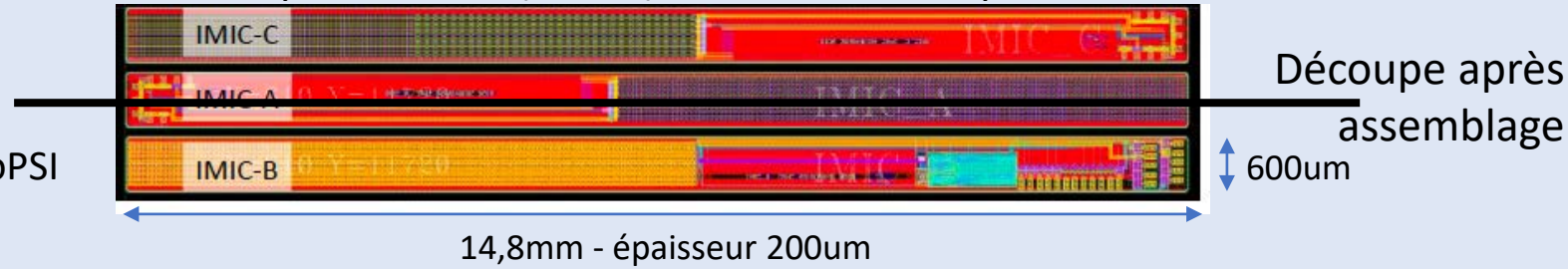
En cours:

**MAPSSIC** (MAPS Sonde Intra-Cranienne)

- Design: Cf. Maciej Kachel C4PI)
- Coll: CPPM, IJCLAB, IPHC, Lyon Neuroscience, NeuroPSI

Environ 400 sondes à produire

2 capteurs IMIC (B et C) à sortie numérique



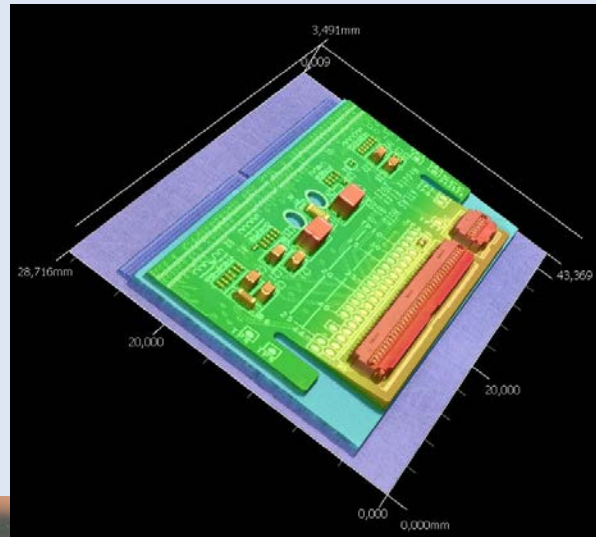
- 1- Tests sous pointes des triplettes, sélection, en cours...
- 2- Collage des triplettes (épaisseur totale <450um)
- 3- Découpe des triplettes (Micro-Packs)
- 4- Assemblage sonde sur PCB
- 5- Bonding + encapsulation

Suivi strict des puces/sondes

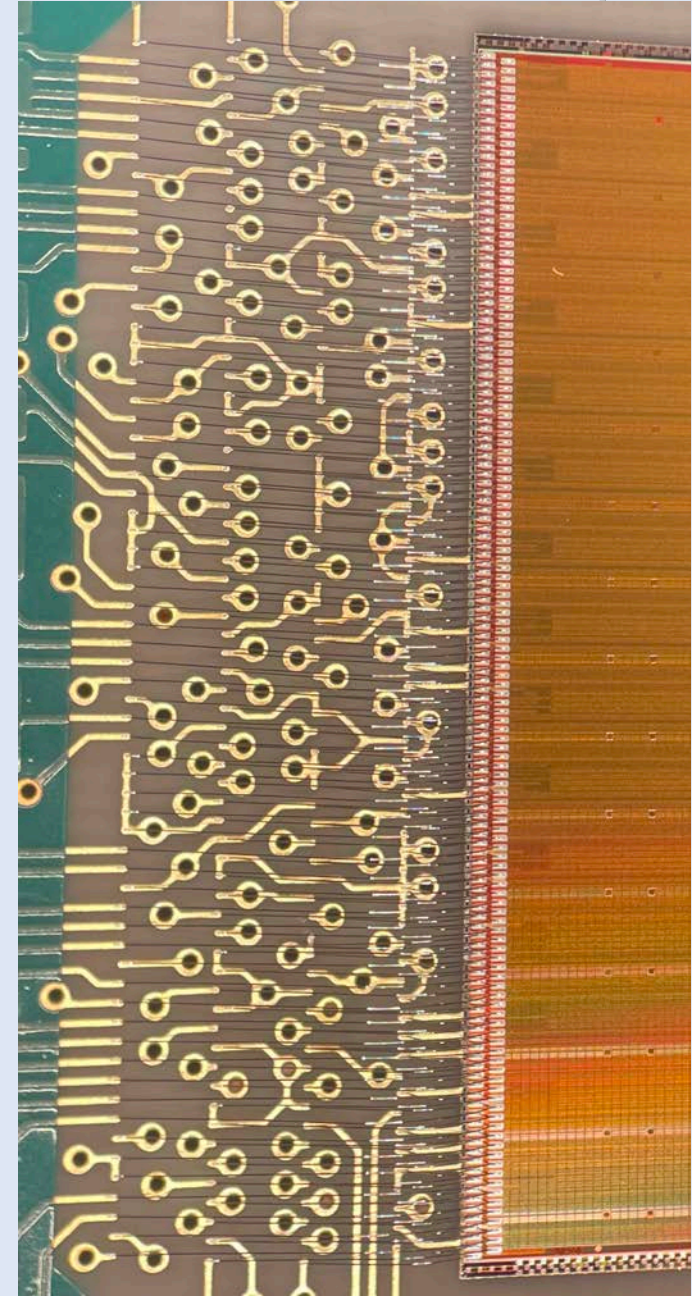
Mise en place de procédures d'assemblage  
Contrôle et suivi qualité

## Projet High Granularity Timing Detector d'ATLAS : IJCLAB, OMEGA, CEA Saclay (partie française)

- Une production de >2000 modules de détection à mener sur ~2 ans
- C4PI pourrait être en charge du bonding
  - Étude de faisabilité sur une douzaine de modules
  - **Si validée mise en place des procédures de production, de contrôle et de suivi qualité**



Mesures 2D/3D (Keyence VR5000)



**A venir version ALTIROC-3:**  
400 wires / module bonding en 4 plans

# Conclusion

- La  $\mu$ T de C4PI est investie dans le WP4 du projet ALICE-ITS3
  - Une R&D complexe où nous collaborons à la mesure de nos moyens ( $\sim 1$  ETP)
    - Une grande source d'apprentissage sur l'intégration d'objets complexes
- Le plateau  $\mu$ T de C4PI maîtrise les opérations de
  - Câblage de carte PCB
  - Intégration de détecteurs / collage de puces sur supports
  - WireBonding aluminium. Conseil du design PCB en vue du WB.
  - Tests microélectroniques sous pointes.

En mode prestation / collaboration

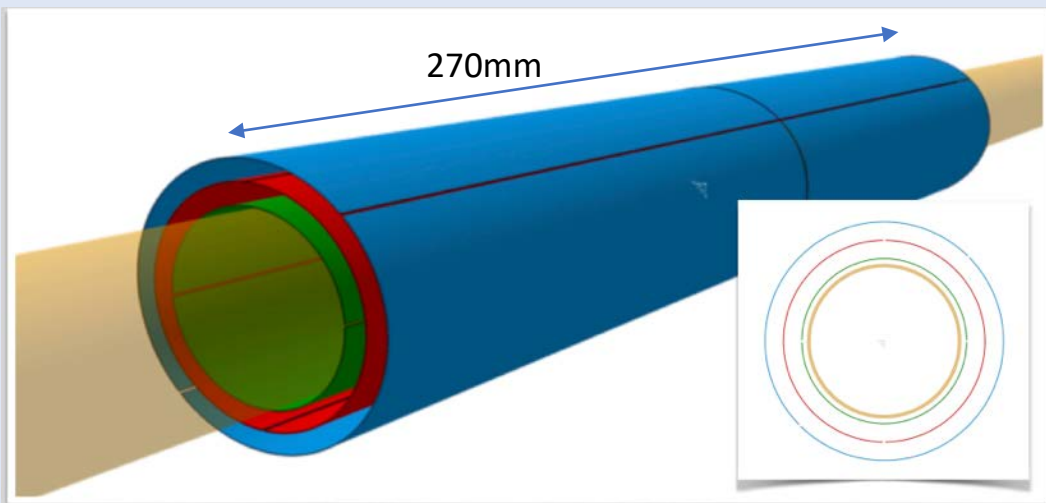
MERCI POUR VOTRE ATTENTION



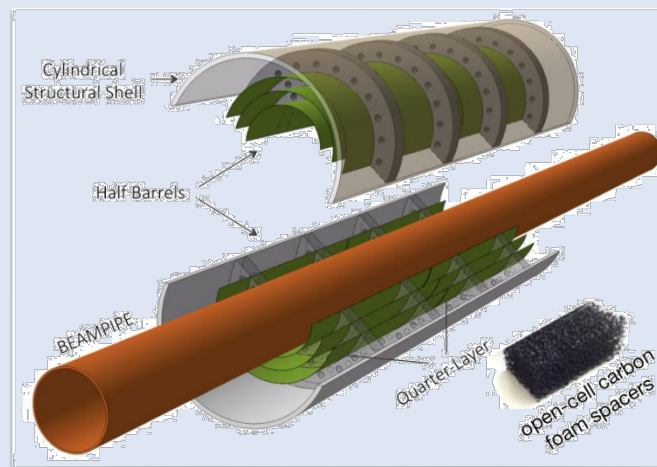


# Spares

# ITS3 : Next generation of the Inner Tracking System



Layer 0 : R18mm – Active area :  $27 \times 22,5 = 610\text{cm}^2$   
Layer 1 : R24mm – Active area :  $27 \times 30,2 = 816\text{cm}^2$   
Layer 2 : R30mm – Active area :  $27 \times 37,6 = 1016\text{cm}^2$   
Chip thickness : 20-40um



## EDGE CHIPS

Chip A - CHIPID[1,2,3] → 0000

Chip B - CHIPID[0,1,2,3] → 0001

## EXO CHIPS

Chip C UP1 - CHIPID[0,1,2,3] → 0000

Chip D DOWN1 - CHIPID[0,1,2,3] → 0000

Chip E UP2 - CHIPID[0,1,2,3] → 0010

Chip F DOWN2 - CHIPID[0,1,2,3] → 0010

Chip G UP3 - CHIPID[0,1,2,3] → 0100

Chip H DOWN3 - CHIPID[0,1,2,3] → 0100

Chip I UP4 - CHIPID[0,1,2,3] → 0110

Chip J DOWN4 - CHIPID[0,1,2,3] → 0110

Chip K UP5 - CHIPID[0,1,2,3] → 1000

Chip L DOWN5 - CHIPID[0,1,2,3] → 1000

Chip M UP6 - CHIPID[0,1,2,3] → 1010

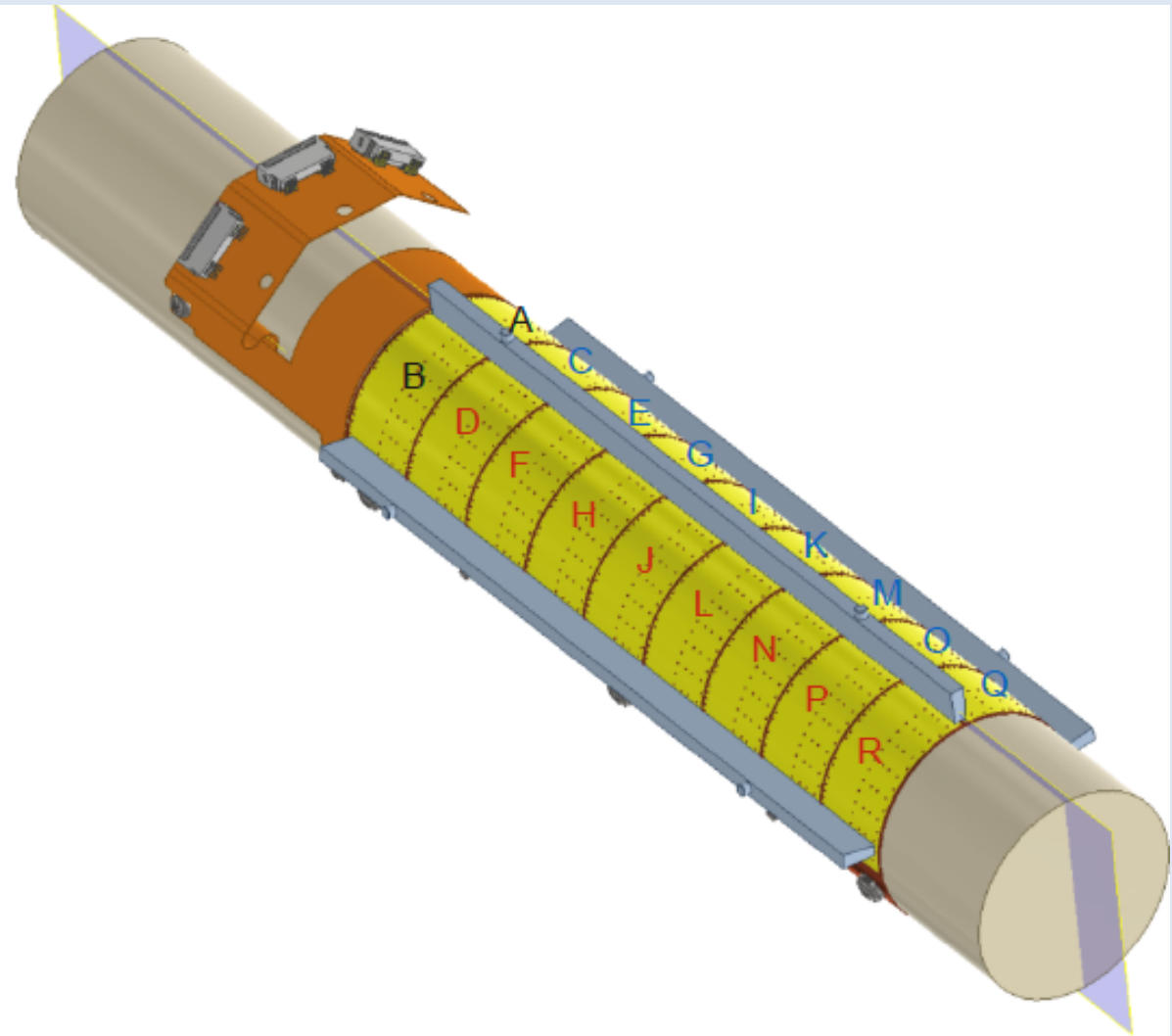
Chip N DOWN6 - CHIPID[0,1,2,3] → 1010

Chip O UP7 - CHIPID[0,1,2,3] → 1100

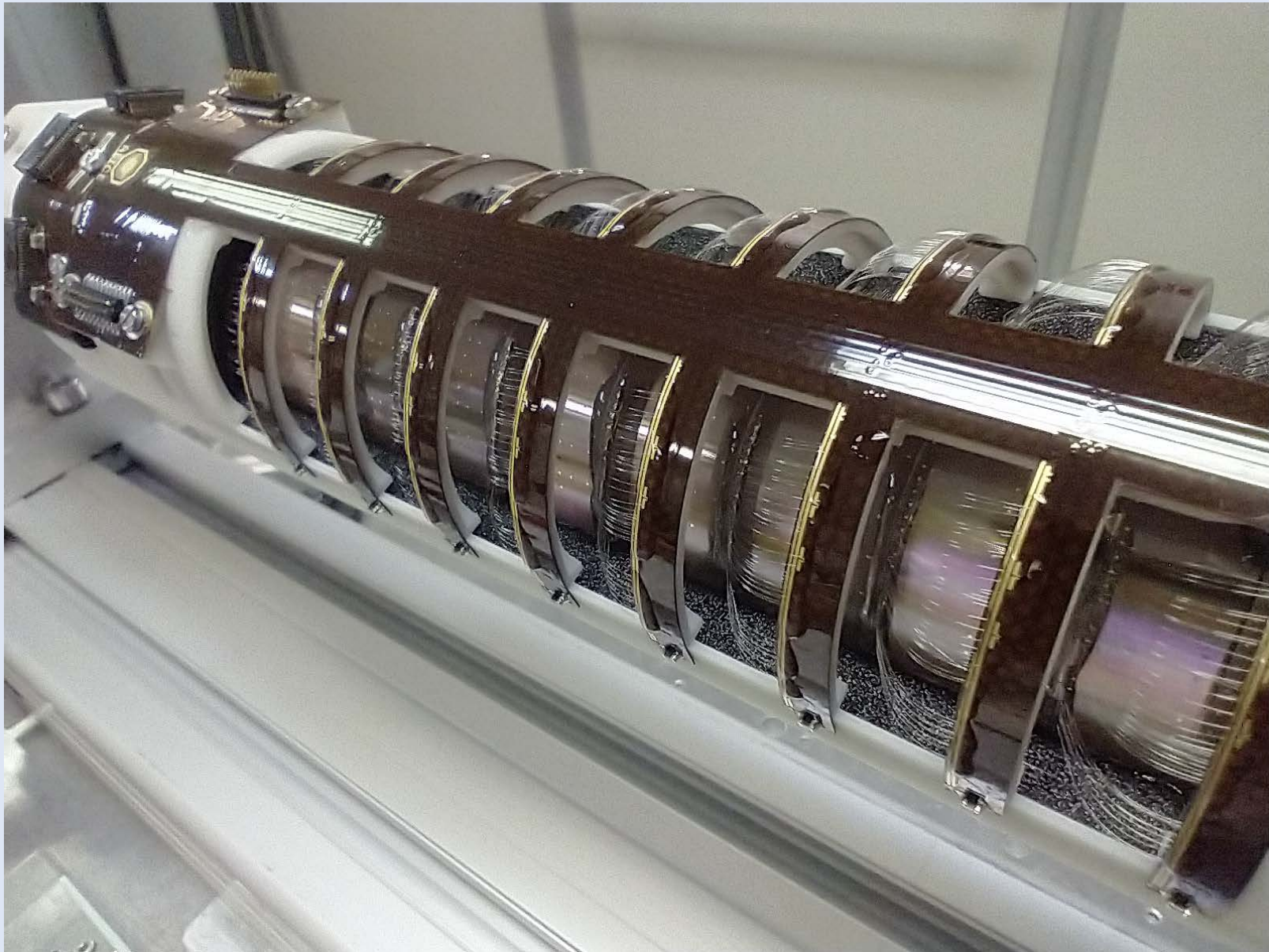
Chip P DOWN7 - CHIPID[0,1,2,3] → 1100

Chip Q UP8 - CHIPID[0,1,2,3] → 1110

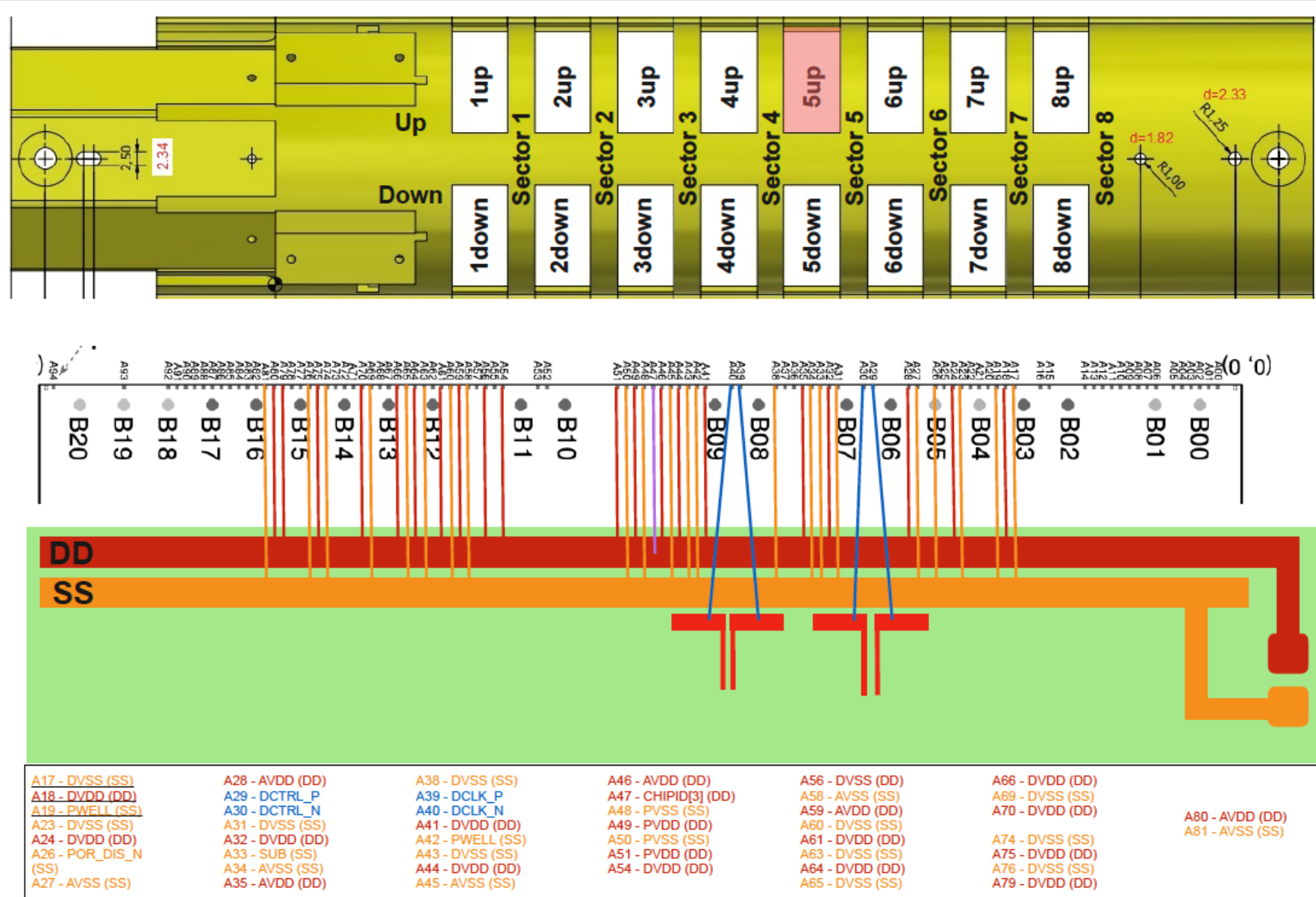
Chip R DOWN8 - CHIPID[0,1,2,3] → 1110



# Assemblage SuperAlpide sur exosquelette + bonding - ALICE - WP4



# Partie du bonding d'un exosquelette ALICE - WP4

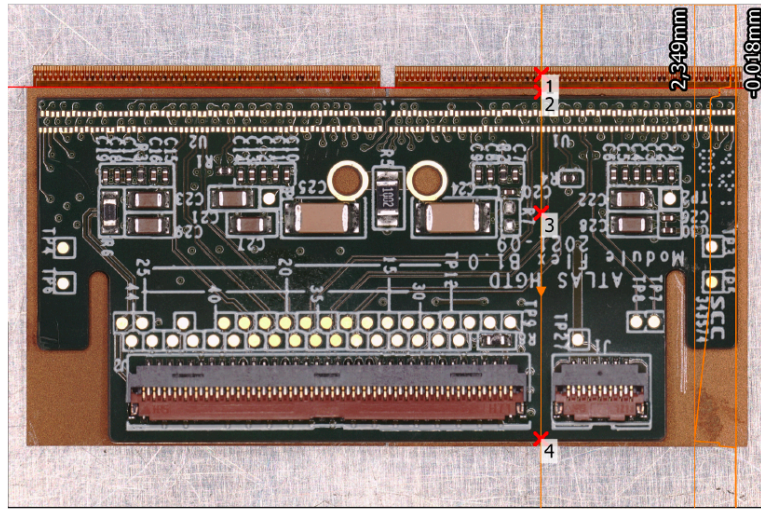


# Exemple mesure sur module HGTD

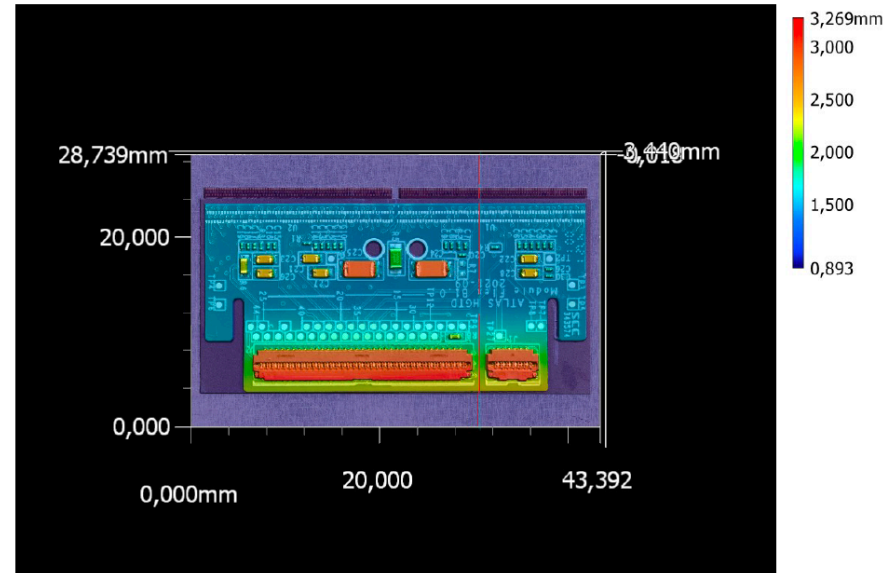
Profile measurement 20230403\_144650

KEYENCE VR-5000 Series

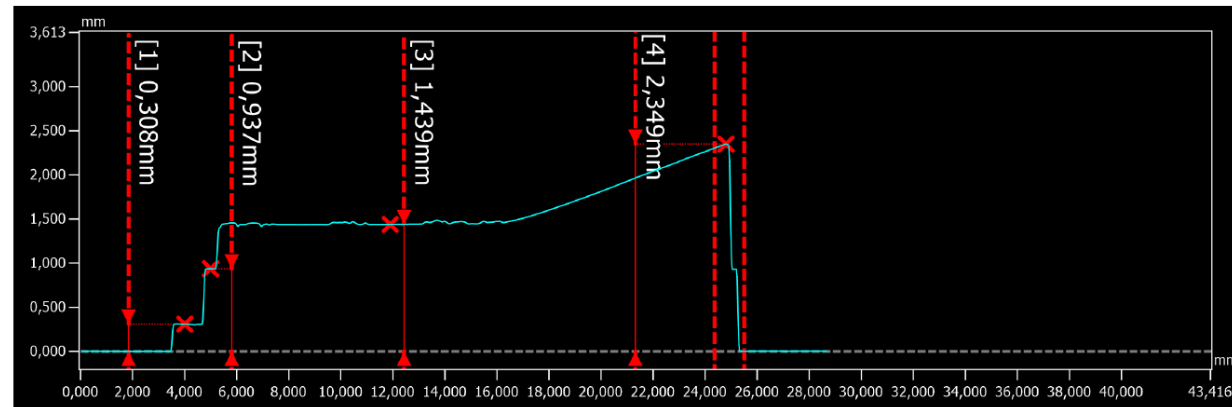
Main image



3D image



Profile



Measurement result

No.	Measurement name	Measured value	Unit
1	Height1	0,308	mm
2	Height2	0,937	mm
3	Height3	1,439	mm
4	Height4	2,349	mm

Ligne rouge : ligne de référence (recherche automatique de la ligne LGAD).  
Plan de référence : support alu autour du module.

Ligne de mesure orange (entre les 2 connecteurs): Profil transverse du module.

Measurement date and time: 03/04/2023 14:46:40

Measurement conditions: 12x Auto

