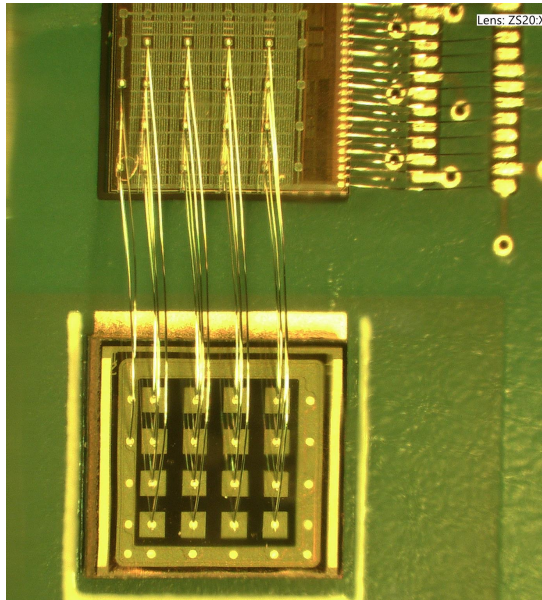


Les capteurs LGAD pour 4D tracking



O. Brand-Foissac, V. Chaumat, T. Cornet, D. Marchand, A. Sharma, L. Serin, A. Torrentó

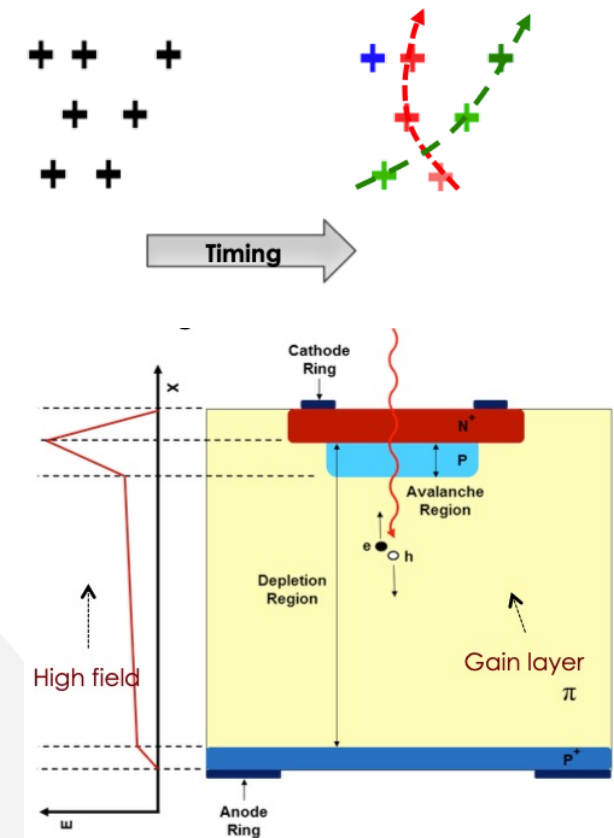
- LGAD: nouveau concept de détecteurs silicium pour tracking 4D pour les futurs collisionneurs et LGADs
- R&D LGAD à IJCLab: AC-LGAD pour EIC Roman Pots
 - Banc laser IR: description, caractérisation
- Perspectives R&D

- Tracking 4D pour les futurs collisionneurs

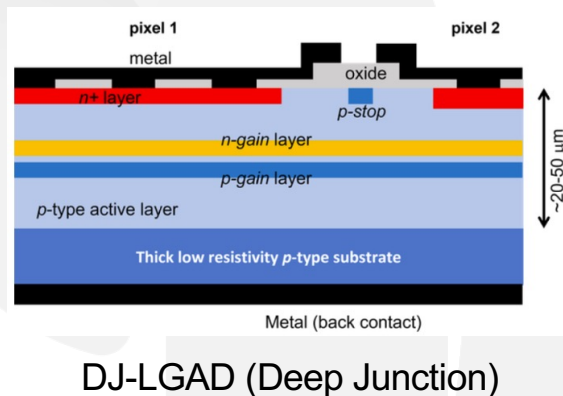
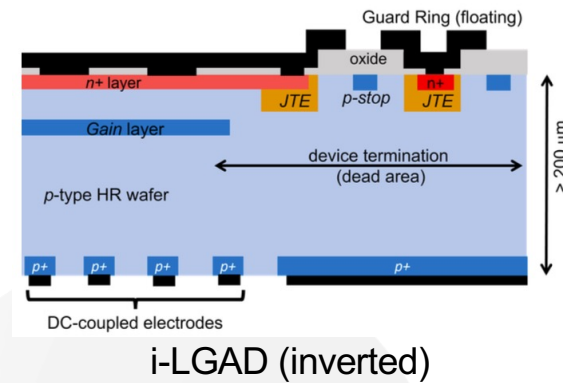
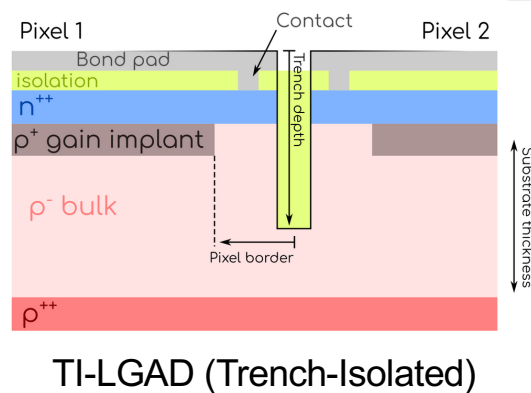
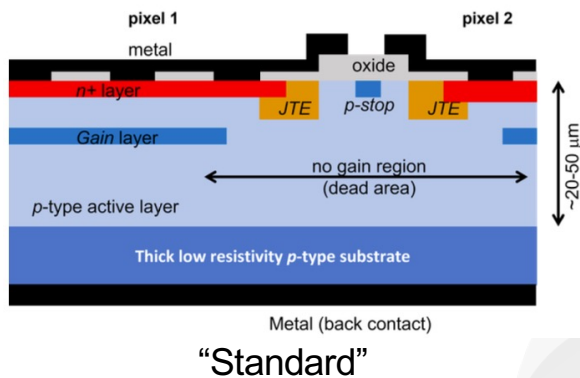
- Résolution spatiale $\sigma(10 \text{ } \mu\text{m})$ + résolution temporelle $\sigma(10 \text{ ps})$ pour résoudre ambiguïtés dans la reconstruction de traces dans des environnements à très haute radiation ($> 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)

- Nouveaux capteurs LGAD: Diode avec une couche de dopage qui permet une amplification du signal contrôlée (Gain ~ 10)

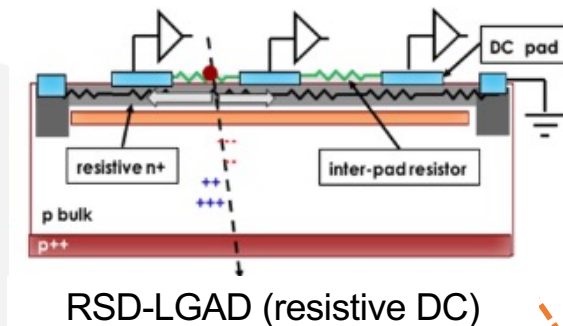
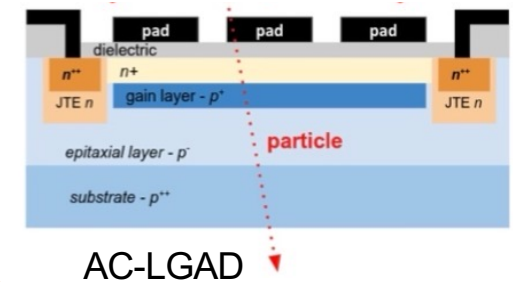
- Suffisamment grande pour que le signal soit plus rapide que dans une diode « normal » \rightarrow mesure du temps
- Suffisamment petite pour ne pas avoir du bruit ajouté
- Déjà prévus dans les endcap timing detectors ATLAS-HGTD et CMS-ETL
- Mais résistance aux radiations limitée à $\sim 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

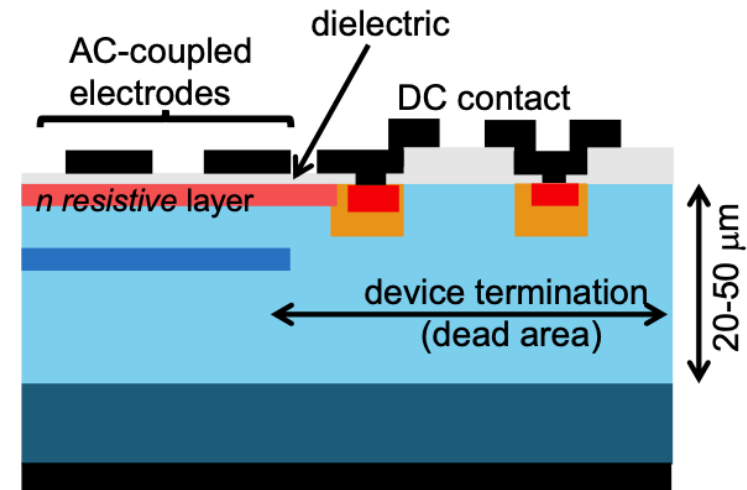
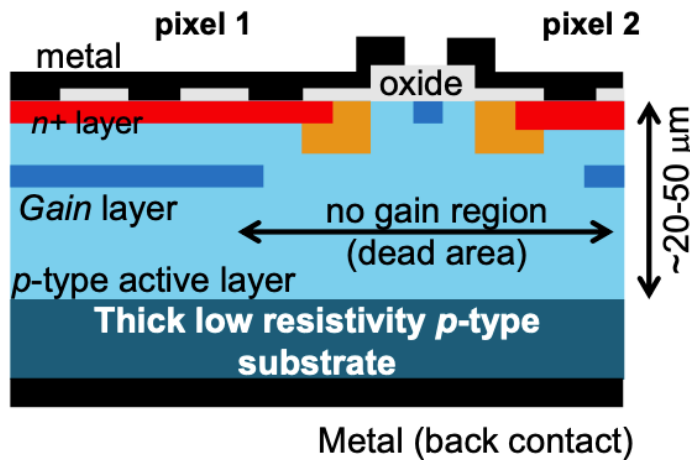


Couplage DC



Couplage AC





• DC-LGAD

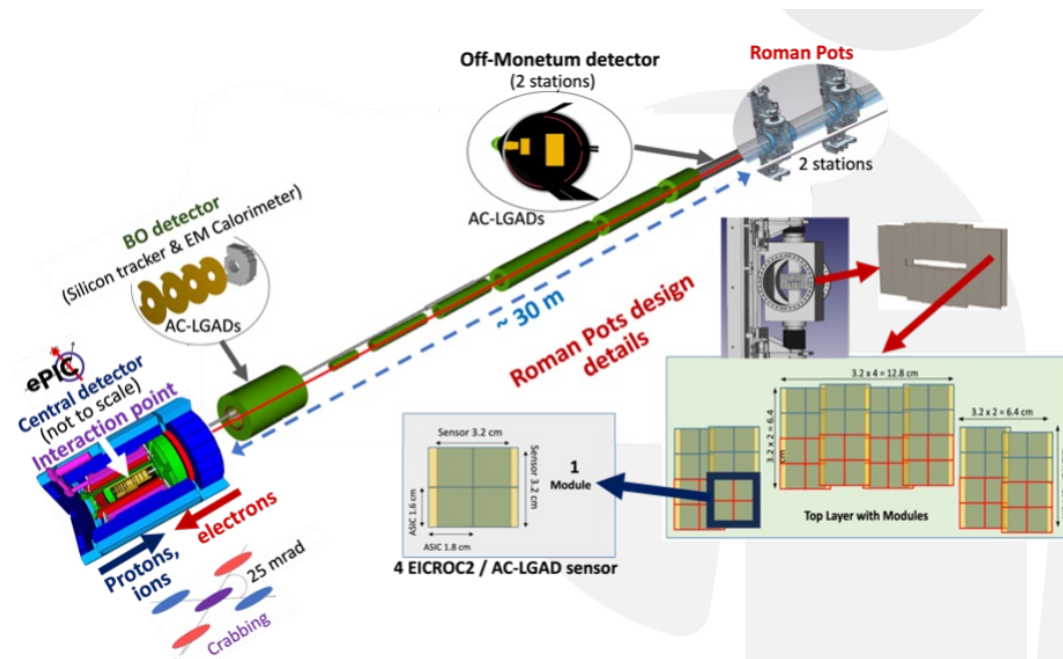
- Voies individuelles (pixels, strips) physiquement séparées
- Résolution spatiale donnée par taille électrode
- Facteur de remplissage trop petit pour des petits pixels (région sans gain)

• AC-LGAD

- Une seule surface active, signaux échantillonnés par plusieurs électrodes (partage de charge)
- Résolution spatiale donnée par la méthode du barycentre
- Facteur de remplissage 100%

• EIC – Roman Pots

- Détection de protons/noyaux légers issus du DVCS pour 3D-imaging des nucleons / noyaux
- $\sim 50 \mu\text{m}$ résolution spatiale, $< 35 \text{ ps}$ résolution temporelle
- Résistance à des niveaux de radiation modérés = $1-5 \times 10^{15} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$



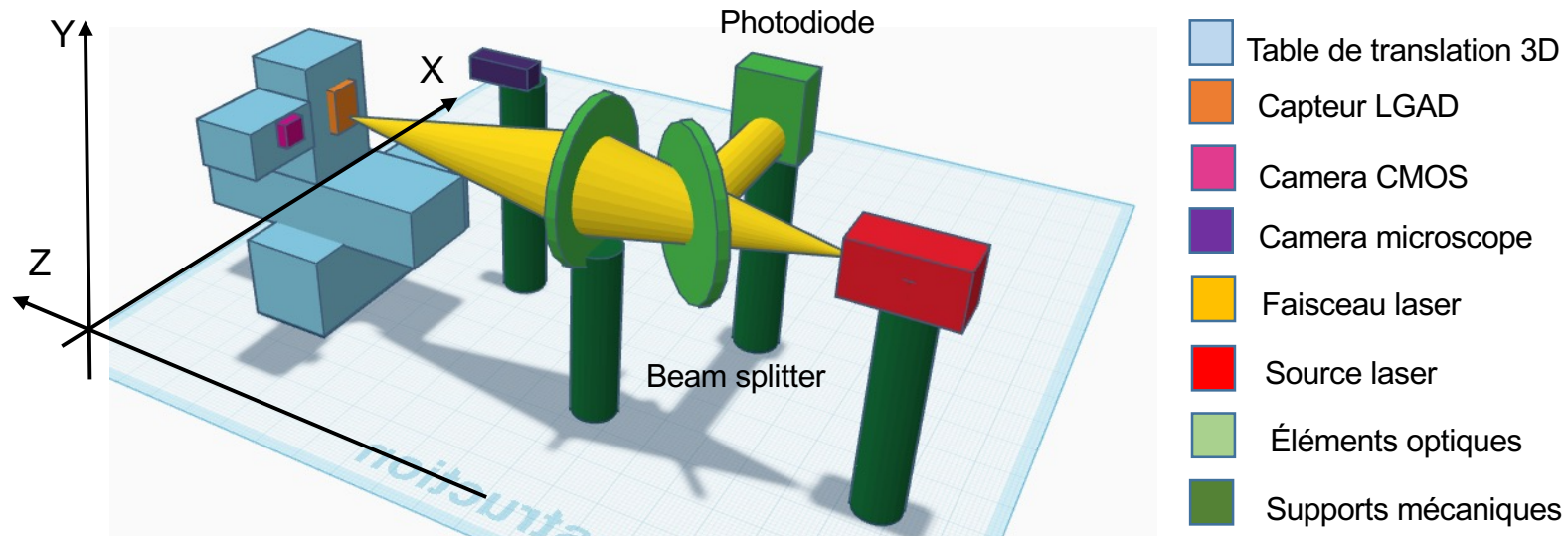
• Détecteur pour Roman Pots:

- AC-LGAD $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ pixels
- Développement d'une puce dédiée EICROC (IJCLab + OMEGA + CEA/IRFU)
 - $\sigma_{\text{pos}} \sim 20 \mu\text{m}$, $\sigma_t \sim 30 \text{ ps}$

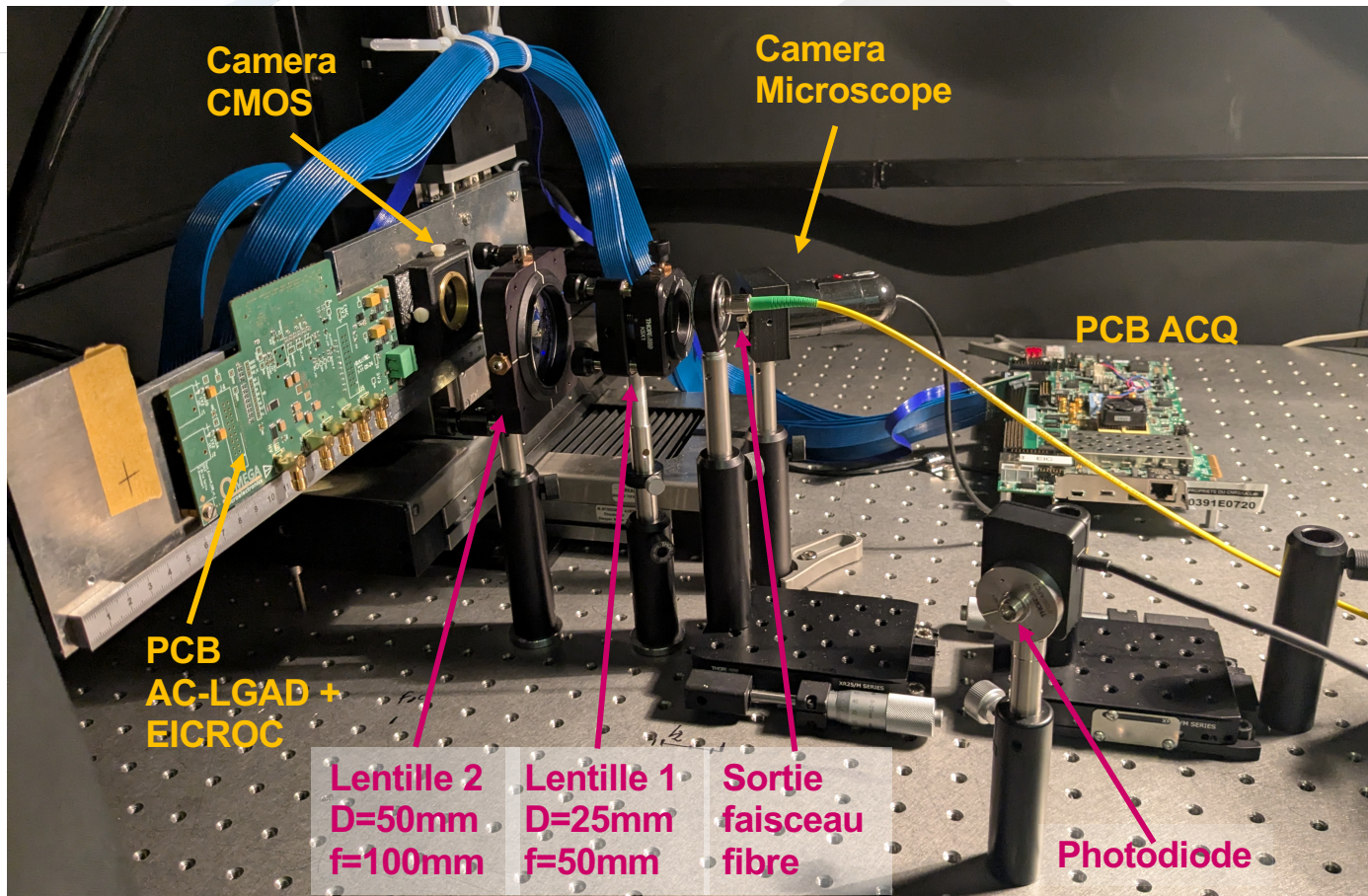
• À IJCLab:

- Tests fonctionnels électroniques pour EICROC
- Tests fonctionnels pour ensemble AC-LGAD + EICROC
 - Source beta (^{90}Sr)
 - IR-laser (MIP)
 - Test beam?

- **Motivation: laser IR pour simuler MIPs ($\lambda = 1056 \text{ nm}$ traversent $\approx 700 \mu\text{m}$ de Si)**
 - Mesurer résolution spatiale et temporelle des capteurs + électronique de lecture
→ AC-LGAD + EICROC



- **Objectif: avoir un spot le plus petit possible pour un scan fin de la surface inter-électrode**
(IR reflétée par le métal des électrodes)

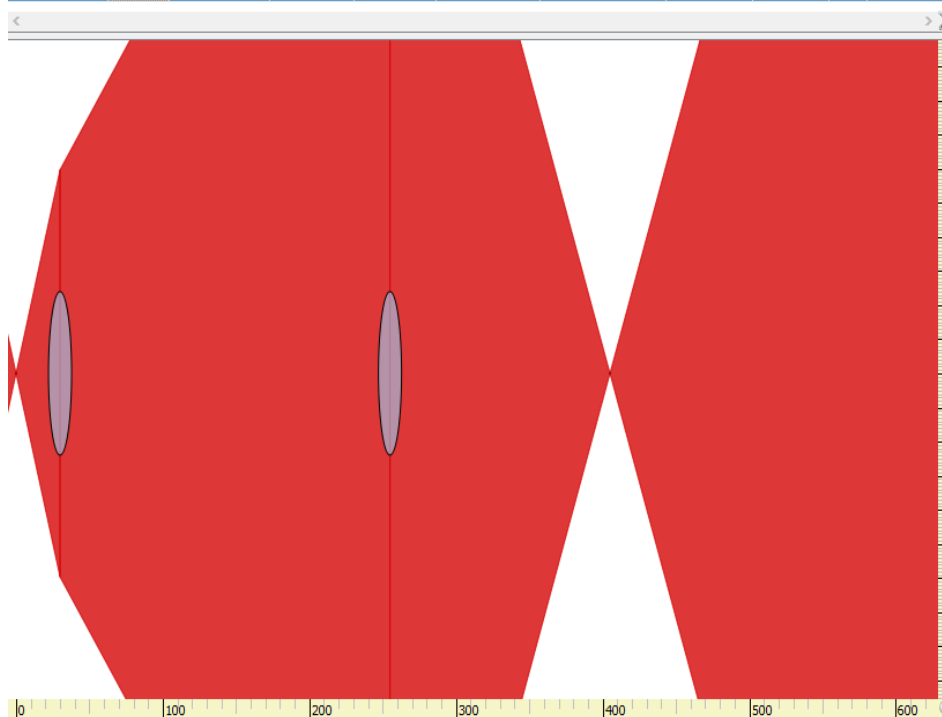


Diode laser NKT Photonics

- 1056.4 ± 7.4 nm
- 7 nW av. Power
- 150 mW peak intensity
- 0 – 40 MHz
- 35 ps pulse width (FWHM)
- Jitter RMS = 10.8 ps
- Fiber MFD: $5.3 - 6.4 \mu\text{m}$ @ 980 nm

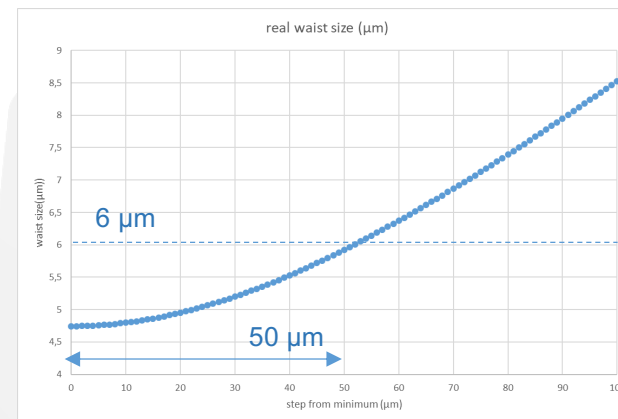


Optique	Position (mm)	Position relative (mm)	Propriétés	Waist (μm)	Position du waist (mm)	Longueur de Rayleigh (mm)	Divergence (mrad)	Sensibilité (%/mm ²)	Nom	Vérouillage
Faisceau incident	0		$n = 1, M^2 = 1$	3.38	0	0.0339875	99.1224	21637.5	w0	absolu
Lentille	30	30	$f = 50$ mm	8.44999	-44.9996	0.212421	39.7584	15268.4	L1	aucun
Lentille	255	225	$f = 100$ mm	4.225	405	0.0531055	79.3914	4986.12	L2	aucun



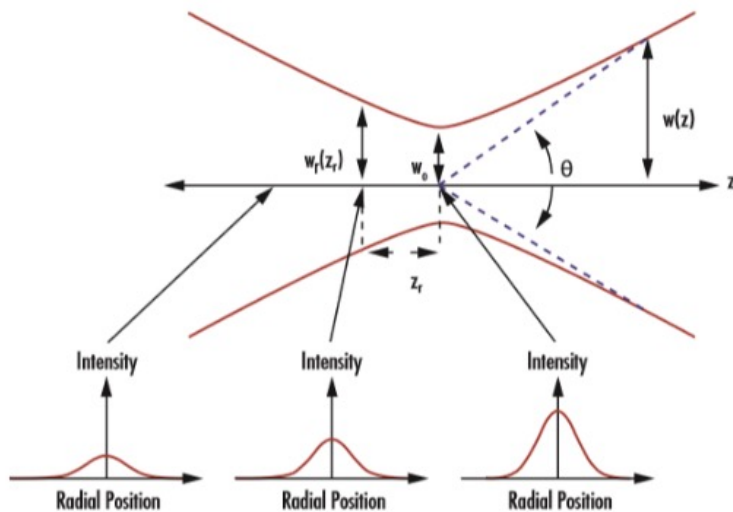
- 2 lentilles convergentes : distance de travail optique – capteur o(10cm)
 - [1] $D=25$ mm, $f = 50$ mm; [2] $D = 50$ mm, $f = 100$ mm
- Simulation optique de notre système avec Gaussian Beam
- Disque Airy (diffraction) =

$$= 2.44 * 1.056 \mu\text{m} * (100\text{mm}/50\text{mm}) = 5.15 \mu\text{m}$$
- Taille théorique du spot : rayon $\lesssim 8 \mu\text{m}$ (dans $50 \mu\text{m}$)



Taille réelle?
Il faut mesurer !!

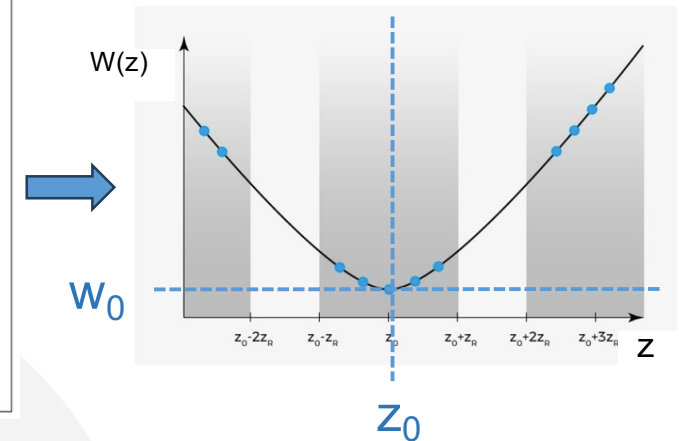
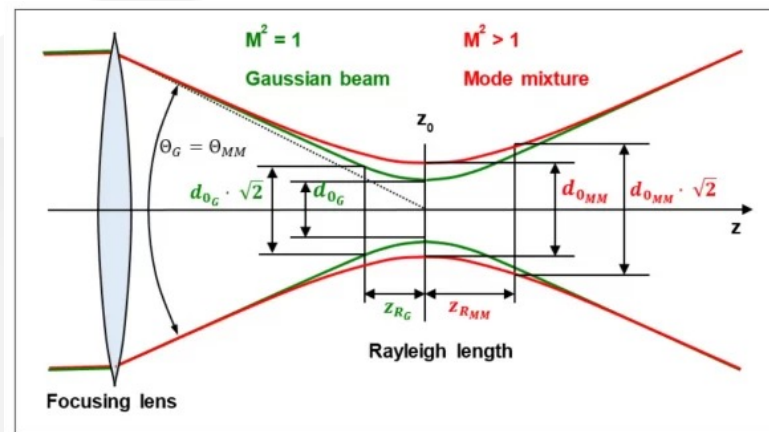
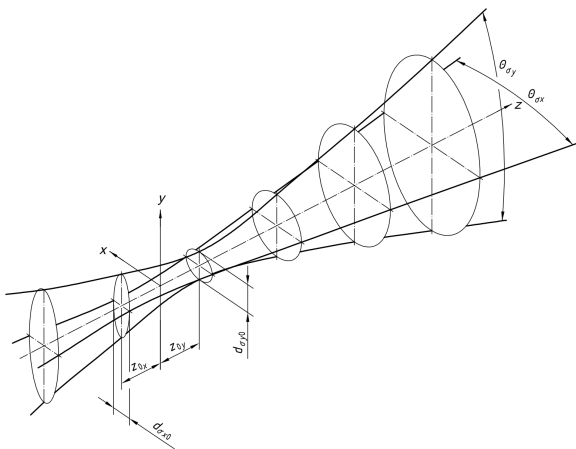
- Laser: amplification de la lumière dans une cavité résonante des dimensions limitées
- Mode fondamental de propagation dans l'espace libre pour une onde à étendue transverse limitée → mode gaussien ou mode TEM₀₀
- Le faisceau Gaussien présente, à une certaine distance, une section minimale (le "waist" du mode) → **C'est notre spot pour scanner la region inter-électrode !**



- Waist (w_0) = rayon minimale contenant $1/e^2$ de l'intensité
- Distance de Rayleigh (Z_R) = distance où le spot double sa surface (ou le rayon augmente d'un facteur $\sqrt{2}$)

- Mais dans la réalité le mode fondamental est mélangé à d'autres modes de propagation et le faisceau n'est pas parfaitement Gaussien

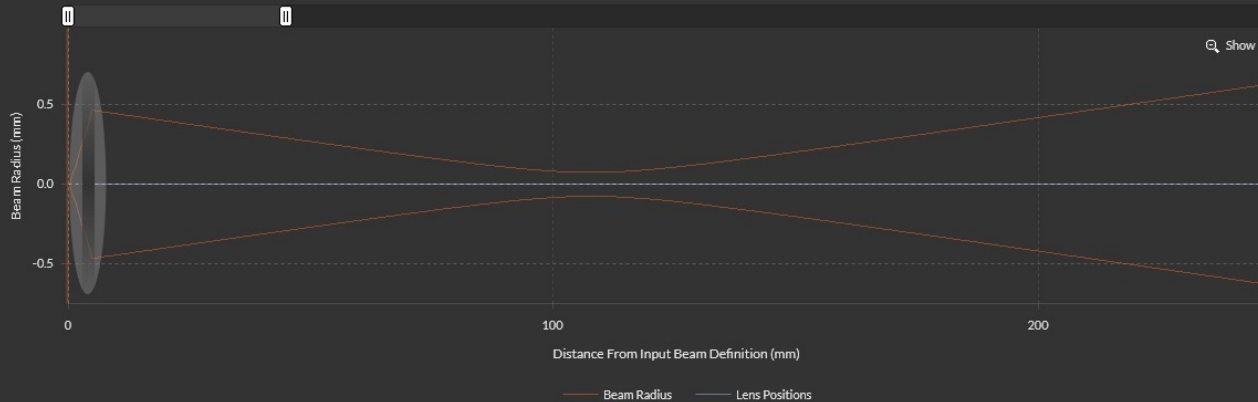
→ Facteur de qualité du faisceau $M^2 > 1$ ($M^2 = 1$ pour un faisceau Gaussien), **qu'il faut mesurer**



$$w^2(z) = w_0^2 + \left(\frac{\lambda M^2}{\pi w_0^2} \right)^2 (z - z_0)^2$$

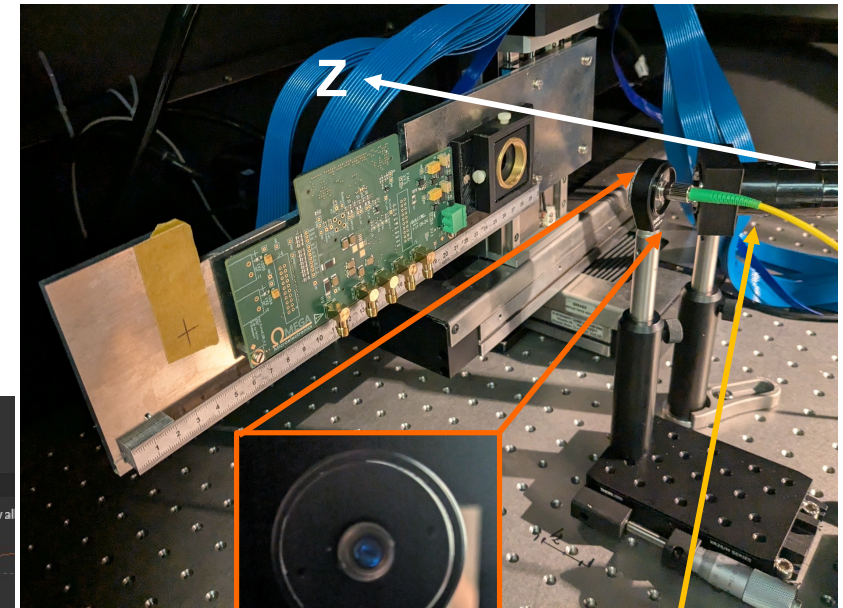
- Dans configuration de scan, le spot est trop petit ($\sim 10\mu\text{m}$) pour avoir une bonne mesure du waist (taille pixel CMOS $3.75\mu\text{m}$)
- Système avec seulement un collimateur ($f = 4.5\text{ mm}$) pour avoir un waist plus grand ($r = 75\mu\text{m} \sim 20\text{ pixels}$), à une distance tel qu'on puisse mesurer ~ 5 distances de Rayleigh autour du waist $\rightarrow 17 \times 5\text{ mm} = 85\text{ mm}$, ok pour rapprochement CMOS – collimateur

Gaussian Beam Propagation



Note: this calculation is only valid for paraxial rays and where the thickness variation across the lens is negligible.

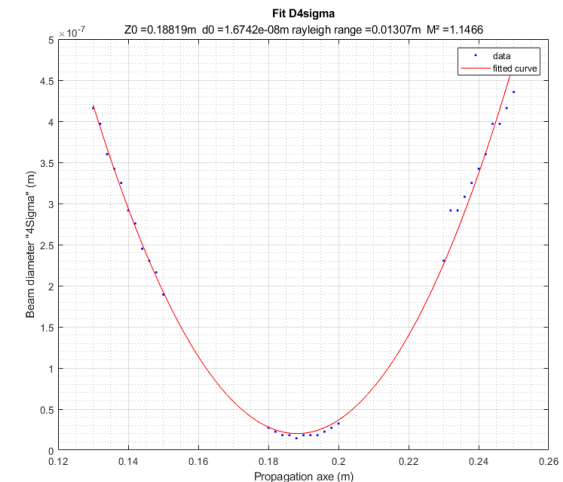
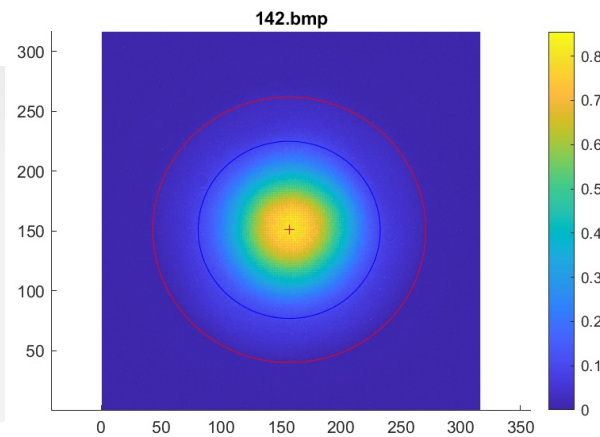
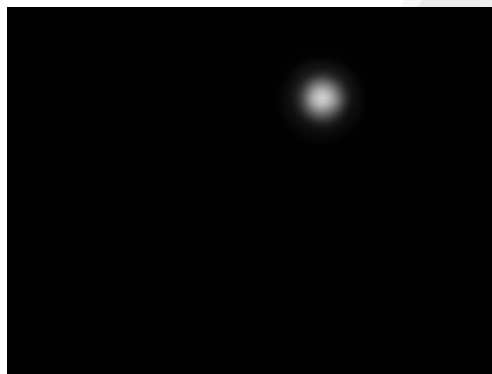
Lens Element	Beam Diameter At Optic (mm)	Beam Divergence (mRad)	Rayleigh Range (mm)	Beam Waist Diameter (mm)	Beam Waist Location (mm)
1	0.931	8.927	16.795	0.15	102.883



Sortie laser fibrée

Collimateur

- 33 images, 3 zones dans $z = 130 - 250$ mm avec $\Delta z = 2$ mm (waist autour 180 mm)
- Traitement des images et analyse avec Matlab (V. Chaumat)
 - Traitement de l'image (seuil)
 - ROI de l'image à $\pm 5\sigma$ du barycentre
 - Détermination du diamètre du spot D4sigma (ISO 11146-1) en X et Y (image elliptique)
 - Plot rayon vs. Z et fit hyperbolique pour déterminer diamètre (d_0) et position (z_0) du waist, M^2 et la distance de Rayleigh (z_R)
 - Analyse en cours !!!



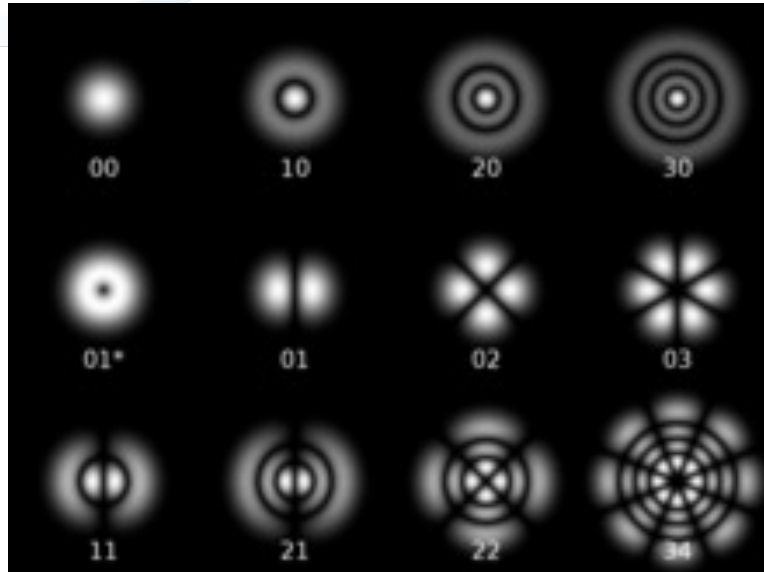
$D_0 = 167 \mu\text{m}$, $M^2 = 1.14$

- Nous sommes en train de faire la mesure du facteur de qualité M^2 qui permet de connaître les caractéristiques du faisceau... pour après :
 - Installer la configuration nominale pour le scan du AC-LGAD: 2 lentilles convergentes qui donnent un waist petit ($r \sim 8 \mu\text{m}$)
 - Processus itératif: à chaque position des lentilles, on fait un scan pour trouver la taille du spot (w_0) et sa position (z_0), avec la même méthode. Connaître le facteur M^2 permet d'obtenir des valeurs plus précises de w_0 , z_0 dans le fit.
 - La position du waist est importante pour positionner à cet endroit le capteur AC-LGAD.
 - La taille du spot nous permet de connaître la localisation de l'interaction et la comparer avec la position déterminée avec le AC-LGAD (méthode du barycentre).

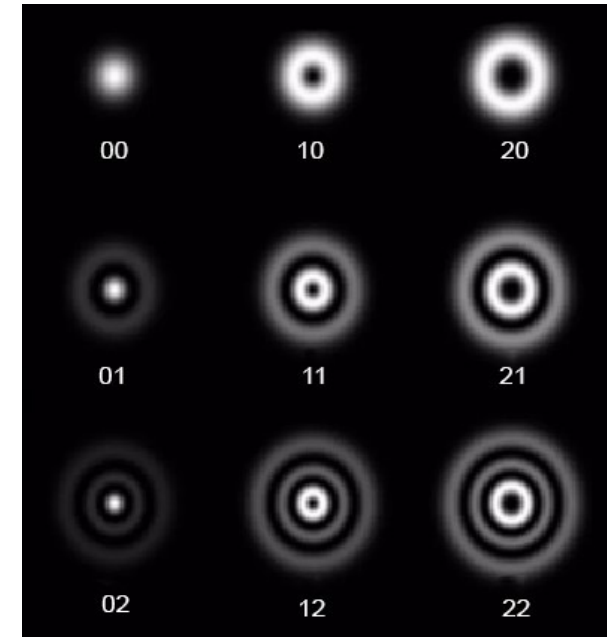
- **Système basé sur un serveur web (O. Brand - Foissac):**

- À présent IHM + daemon (serveur web) pour pilotage des tables de translation: commande des déplacements et requête de position (sans mémorisation ni stockage)
- En cours : rajout de la surveillance de l'intensité du faisceau avec une photodiode et de l'acquisition des signaux AC-LGAD + EICROC
- Passage vers automate à états (multithread): gestion des commandes et sauvegarde de l'état de l'ACQ
 - IHM + Daemon (web) + horloge interne qui réveille le daemon avec une commande spécifique
 - Position XYZ, timestamp, intensité photodiode, signaux AC-LGAD + EICROC
 - État à répéter dans la séquence (p. ex. position XYZ) ou sauvegarde des données dans un fichier
- Intégration d'un scénario (= séquence de mesures)

- Mise en place d'un banc test laser pour mesures de caractérisation de capteurs semi-conducteurs
 - Complémente les équipements de caractérisation existantes dans le plateau technique PSI: station sous pointes et source beta ^{90}Sr
- Renforcement à IJCLab de la R&D sur les détecteurs silicium
 - Collaboration dans le cadre du TYL-FJPPL avec KEK/Tsukuba pour développement LGADs
 - Lancement d'une R&T « Time & Track » qui rejoint les études AC-LGAD avec une éventuelle participation au projet DRD3 «Development of TI-LGADs for 4D Tracking » avec LPNHE (proposé par A. Macchiolo, ETH Zurich)
 - Au début caractérisation, à moyen terme conception (Silvaco)



Dans un laser à symétrie cylindrique, les modèles de mode transversal sont décrits par une combinaison d'un faisceau profil gaussien avec un polynôme de Laguerre. Les modes sont désignés TEM_{pl} où p et l sont des nombres entiers d'étiquetage des ordres radiaux et le mode angulaire, respectivement. Le mode gaussien fondamental d'un laser peut être choisi en plaçant une ouverture dimensionnée de manière appropriée dans la cavité laser.



Transverse modes in a laser

In a laser, the light is typically confined to a single transverse mode, i.e., the light wave oscillates in a single plane perpendicular to the direction of propagation. This is important for achieving the high levels of coherence and intensity that make lasers so useful in a variety of applications. In some cases, the laser can experience mode mixing, where different transverse modes are excited and interfere with each other. The different transverse modes in a laser is depicted in figure 1.