

La mesure de temps haute-résolution de l'expérience LHCb avec l'asic SPIDER (Swift Pipelined Digitizer)

Ludovic Alvado, Nicolas Arveuf, Edouard Bechetoille,
Christophe Beigbeder, Dominique Breton, Didier Charrier,
Raphael De Neef, Baptiste Joly,
Zülal Kiraz, Laurent Leterrier, Jihane Maalmi, Samuel Manen,
Hervé Mathez, Christophe Sylvia, Philippe Vallerand,
Richard Vandaele

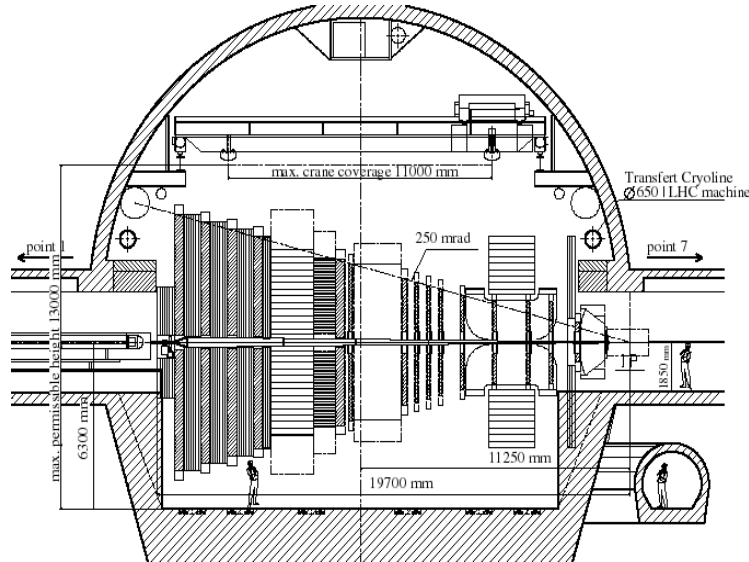


AG Pôle Ingénierie @ IJCLab - Orsay le 2 juin 2025

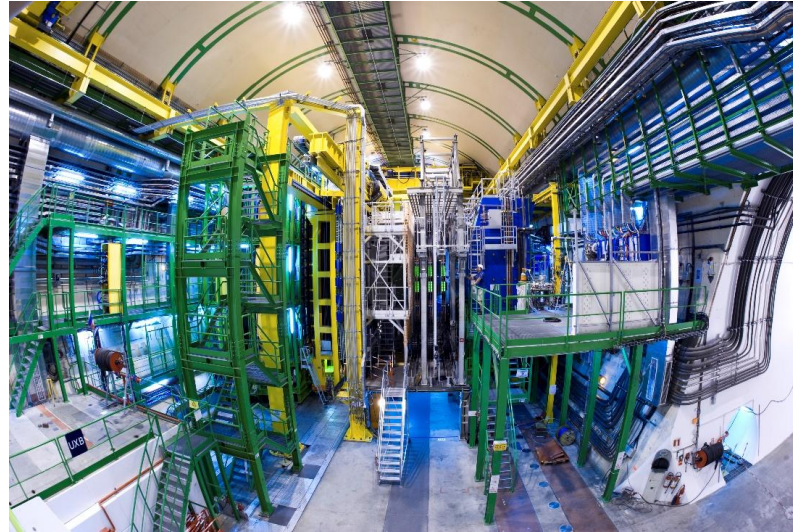
- ✓ L'expérience LHCb en bref
- ✓ La jouvance phase II de l'Ecal de LHCb
 - Motivations & besoin en mesure de temps haute resolution
 - Spécifications de la nouvelle chaine électronique
- ✓ Rappels
 - La microélectronique et l'électronique
 - Technologies / transistors
- ✓ L'ASIC SPIDER
 - La mesure de temps haute résolution
 - Principe
 - Soumission du prototype
 - Banc de tests
- ✓ Conclusion

L'expérience LHCb en bref

➤ Une des 4 grandes expériences du LHC depuis 2005



Coupe du détecteur dans la caverne

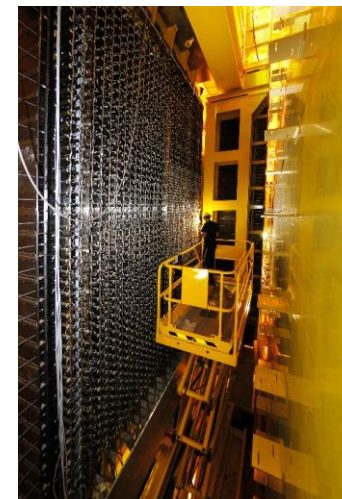


Détecteur & plateforme

- Les détecteurs HCAL et ECAL sont équipés de modules Shachlik pour les 1500 et 6000 voies d'acquisition.
 - des câbles de 10 à 20m conduisent les signaux analogiques vers les ~ 250 cartes d'acquisition (Front-End Board)
 - 10 baies et 18 châssis sont situés sur la plateforme au dessus du détecteur (radiation < 40 kRad)
 - chaque châssis héberge une carte de contrôle (3CU), jusqu'à 16 cartes FEB et des cartes de calibration.



Front-End Board
Upgrade 1 2022

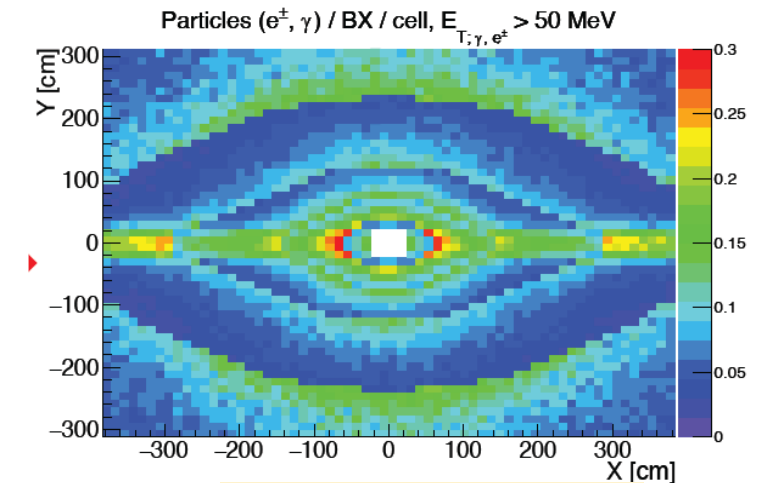
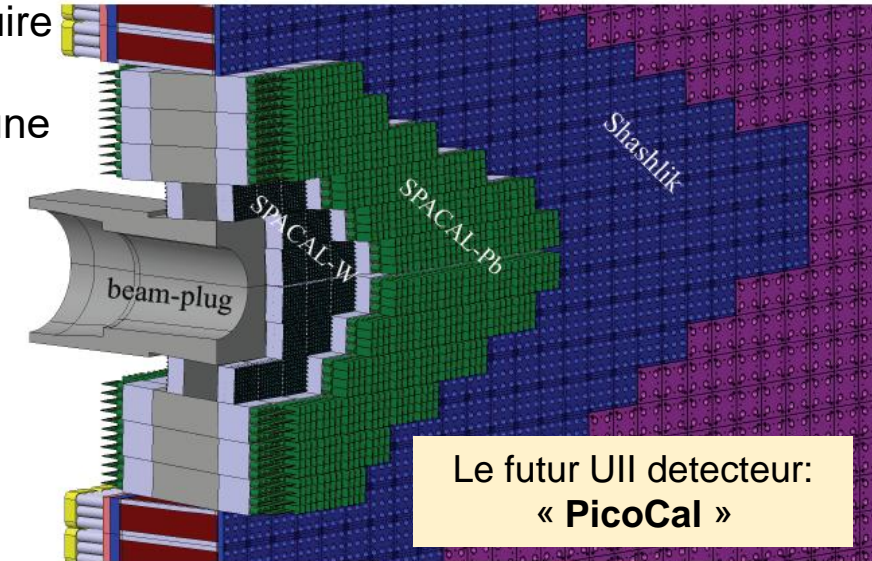
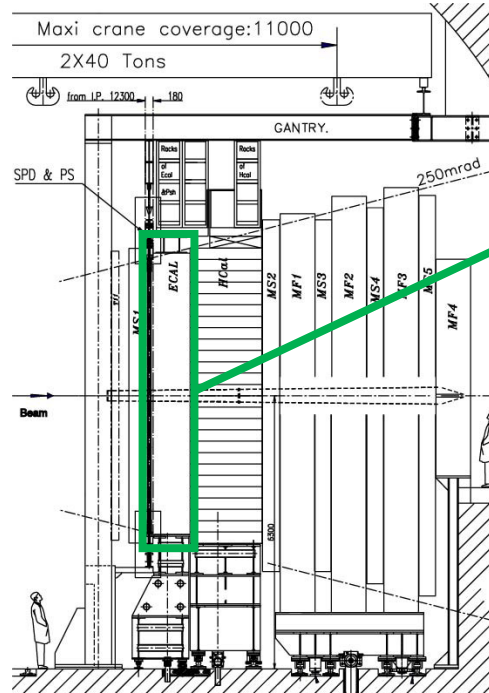
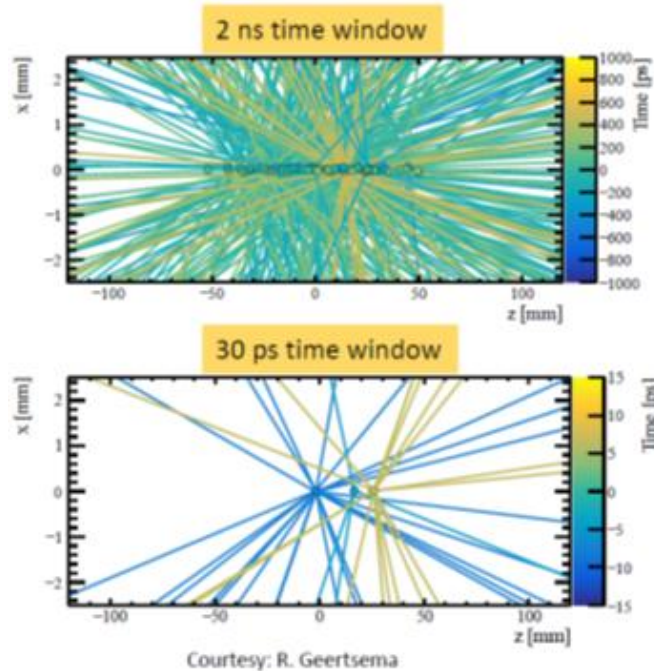


Mur de photomultiplicateurs



La jouvence phase II du calorimètre électromagnétique de LHCb

- Pourquoi cette jouvence phase II ? L'intensité des faisceaux « HL-LHC » va produire un nombre considérable d'événements qui vont s'empiler (35 fois plus à terme)
- Pour traiter ces empilements, le temps d'arrivée du signal doit être mesuré avec une résolution autour de 20 ps rms sur une gamme de 50 MeV à 5 GeV



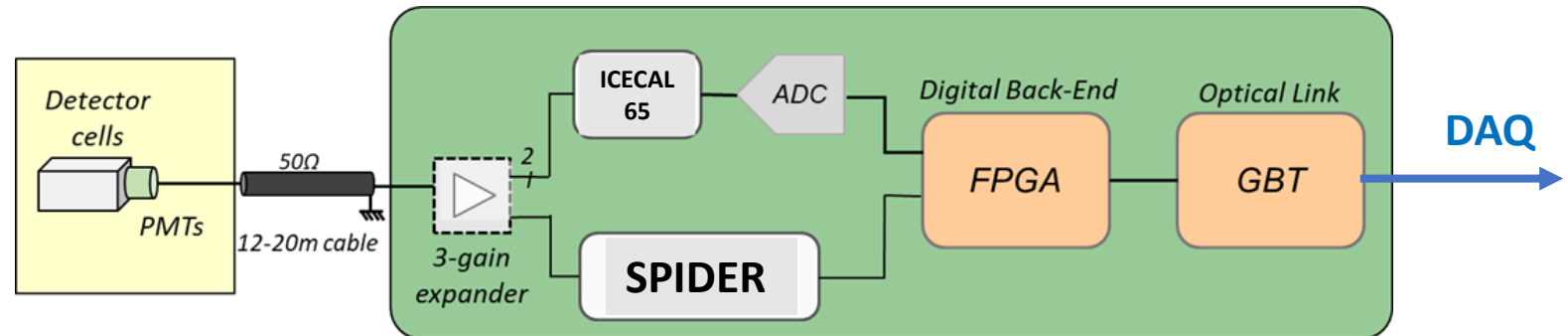
- Nouveaux types de détecteur : **module SPACAL pour la partie centrale (radiation <1MGy)** ; modules Shashlik pour la périphérie (< 40kGy),
- Nouvelle granularité de forme « rhomboic » : pour réduire le taux d'occupation par voie, la taille des modules sera réduite et donc le nombre de voies augmenté => ~30 000 voies d'acquisition

La nouvelle chaine de lecture du PicoCal

➤ Exigence de mesurer l'énergie et le temps d'arrivée des particules

➤ Mesure d'énergie

- Mesure périodique sur 12 bits à 40MHz
- Grande gamme dynamique de mesure : **50 MeV to 100 GeV**
- ASIC double gain **ICECAL65** (évolution de **ICECAL** avec 2 gains/voie)



➤ Mesure de temps - ASIC SPIDER

- Mesure sélective par seuil : taux de comptage variable selon l'exposition de chaque cellule de détection, jusqu'à **10MHz max**
- Résolution en temps visée **15 ps pour $E_T = [1-5 \text{ GeV}]$ pour distinguer les interactions multiples**
- Gamme de mesure de temps **$E_T = [50 \text{ MeV} - 5 \text{ GeV}]$**
- Temps de montée des signaux entre **1.5 ns et 2.5 ns**

La microélectronique

➤ Qu'est-ce que c'est ?

Micro-électronique ↔ **Electronique**
(Spécialité de l'électronique)

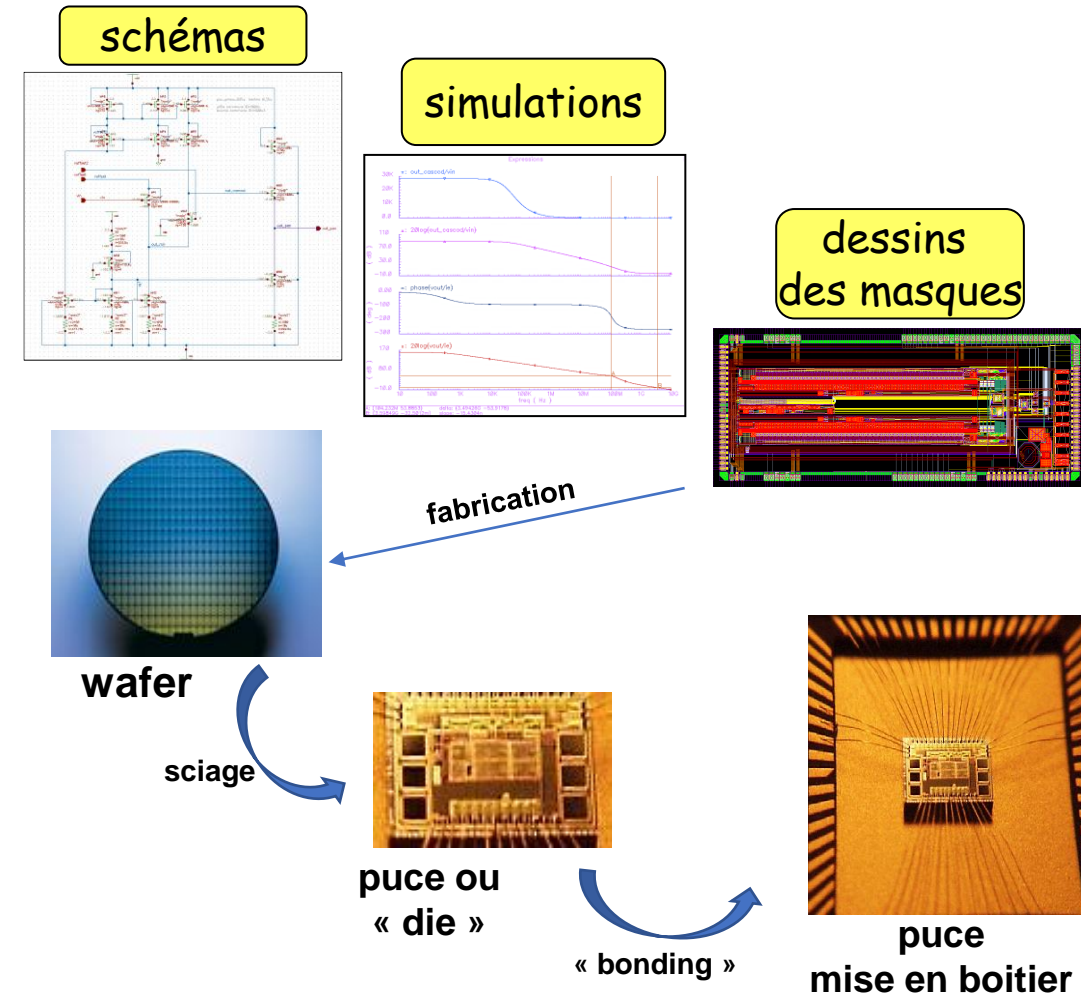


circuit intégré
(ASIC= Application Specific Integrated Circuit)



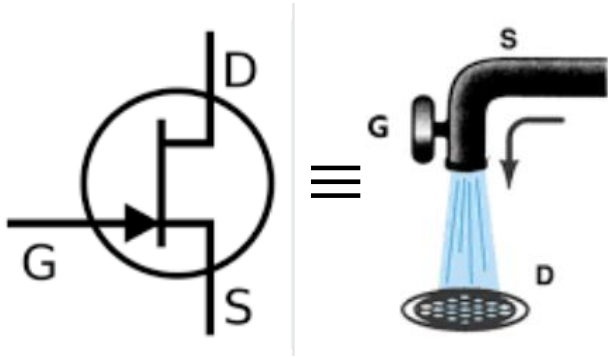
carte électronique

➤ De la conception à la fabrication des asics

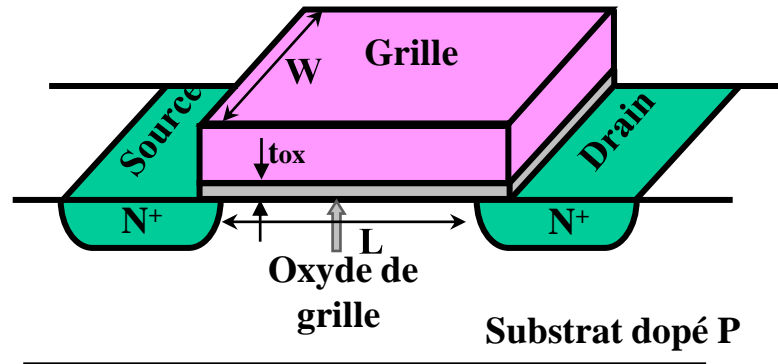


Le transistor

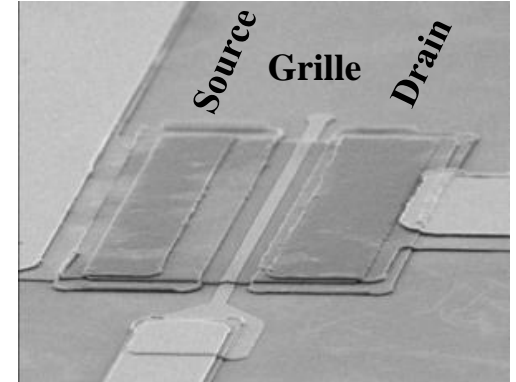
- L'élément de base en microélectronique. Dispositif semi-conducteur à 3 électrodes actives utilisé comme interrupteur ou amplificateur



Ex du transistor MOS



L : longueur de canal ; W : largeur de canal



transistor MOS

- Evolution technologique : diminution de la taille pour accroître la densité des asics

Réduction des dimensions :

- Longueur du canal : **45nm**
- Épaisseur d'oxyde t_{ox} : **15Å**

gains



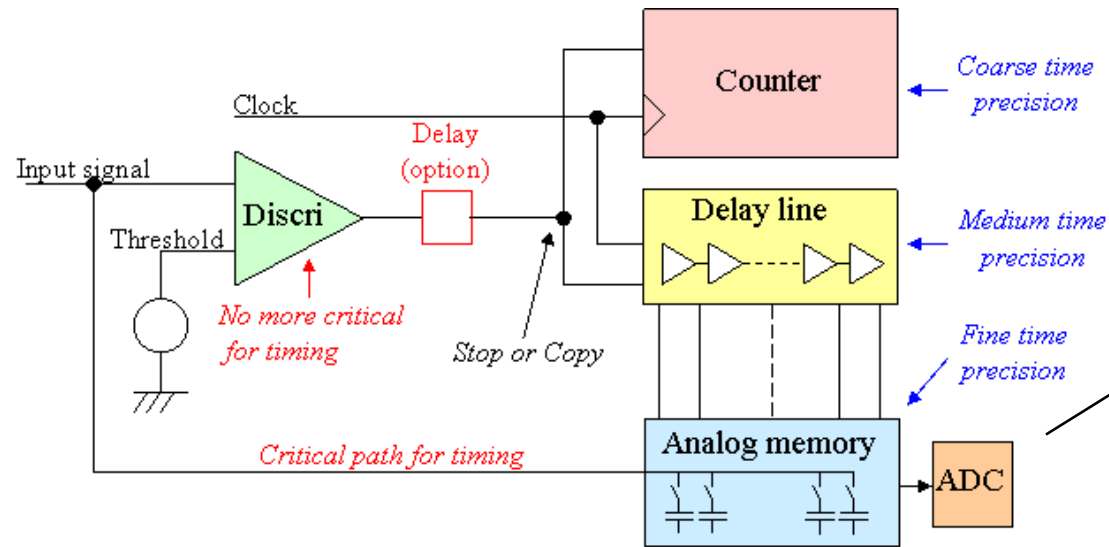
- Réduction des tensions d'alimentation
 - Réduction de la puissance dissipée
- Amélioration de la vitesse en $1/L^2$
 - gain : $g_m \propto W/L$
 - Vitesse : $F_T = g_m/C \propto 1/L^2$
- Réduction des coûts
 - Augmentation de la densité d'intégration

**des milliards de transistors
sur une puce**

Mesure de temps à haute résolution

➤ Concept du « TDC à analyse de forme » = « Waveform Time to Digital Converter »

Concept breveté par LAL/IRFU en 2009 : association d'un TDC à DLL et d'un digitizer à base d'une mémoire analogique circulaire comme implémenté dans l'ASIC SAMPIC



~ps Interpolation

Calcul du temps fin basé sur un algorithme d'interpolation appelé : « Discriminateur à fraction constante numérique »



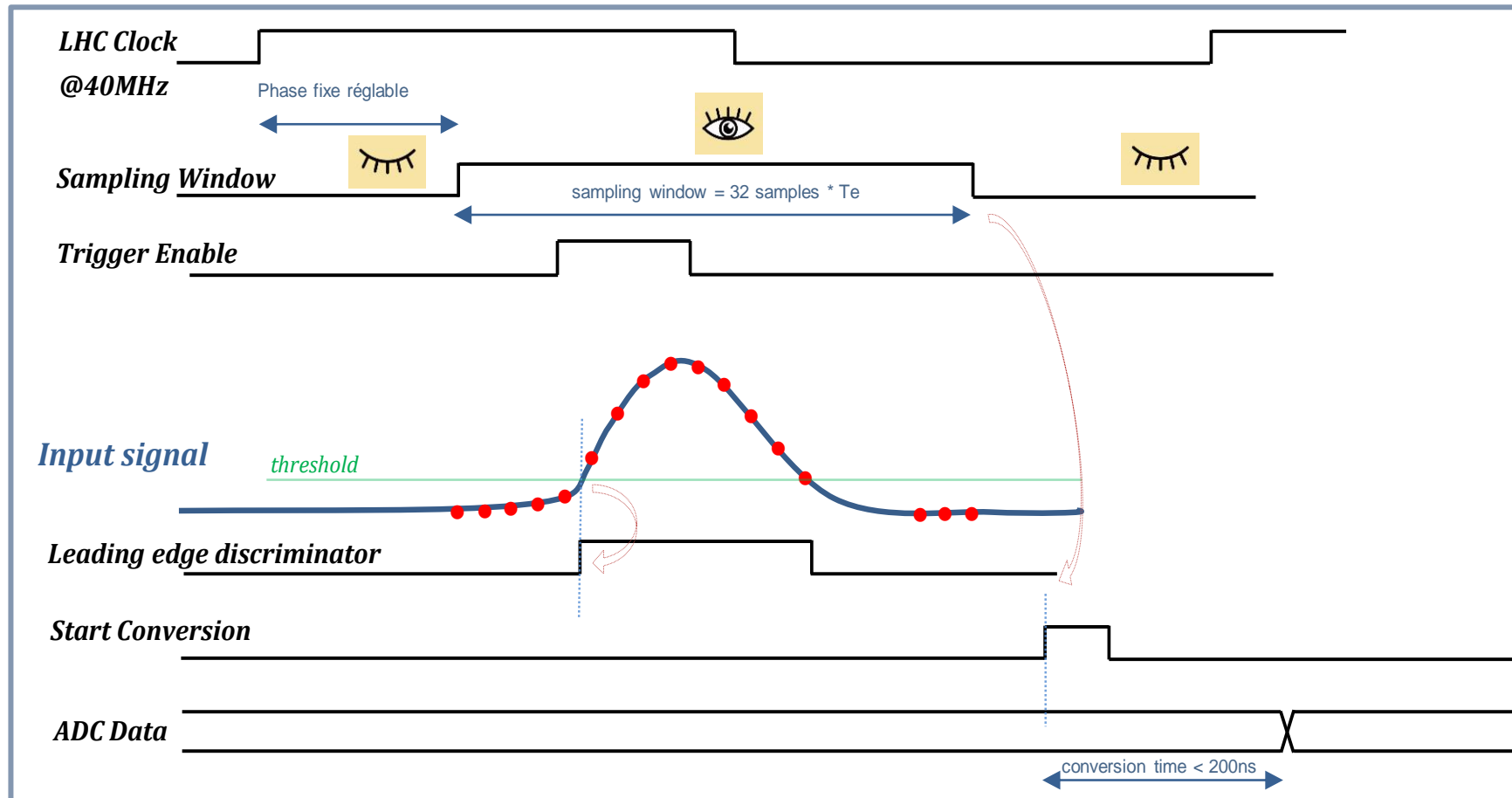
résolution obtenues de quelques picosecondes RMS

- Un compteur donne le temps dit grossier du premier échantillon
- Une chaîne de retards donne la précision en temps des échantillons
- La numérisation du signal donne accès à la forme d'onde...

Inconvénient majeur : limité à des taux de comptage de qq 100kHz, temps mort important avec 1 seule banque mémoire

Le principe de SPIDER

- Contrairement à une mémoire circulaire, **SPIDER est dédié aux collisionneurs et enregistre le signal à chaque croisement faisceau et durant une fraction de temps programmable**



- Possible car le temps de vol entre le vertex et chaque cellule de détecteur est prédictible
- Réduction du nombre de cellules mémoires par rapport à une mémoire circulaire
- Lecture "intelligente" permet de lire seulement les échantillons utiles
- Phases ajustables par rapport à l'horloge LHC :
 - **Fenêtre d'échantillonnage**
 - **Fenêtre de validation du trigger**

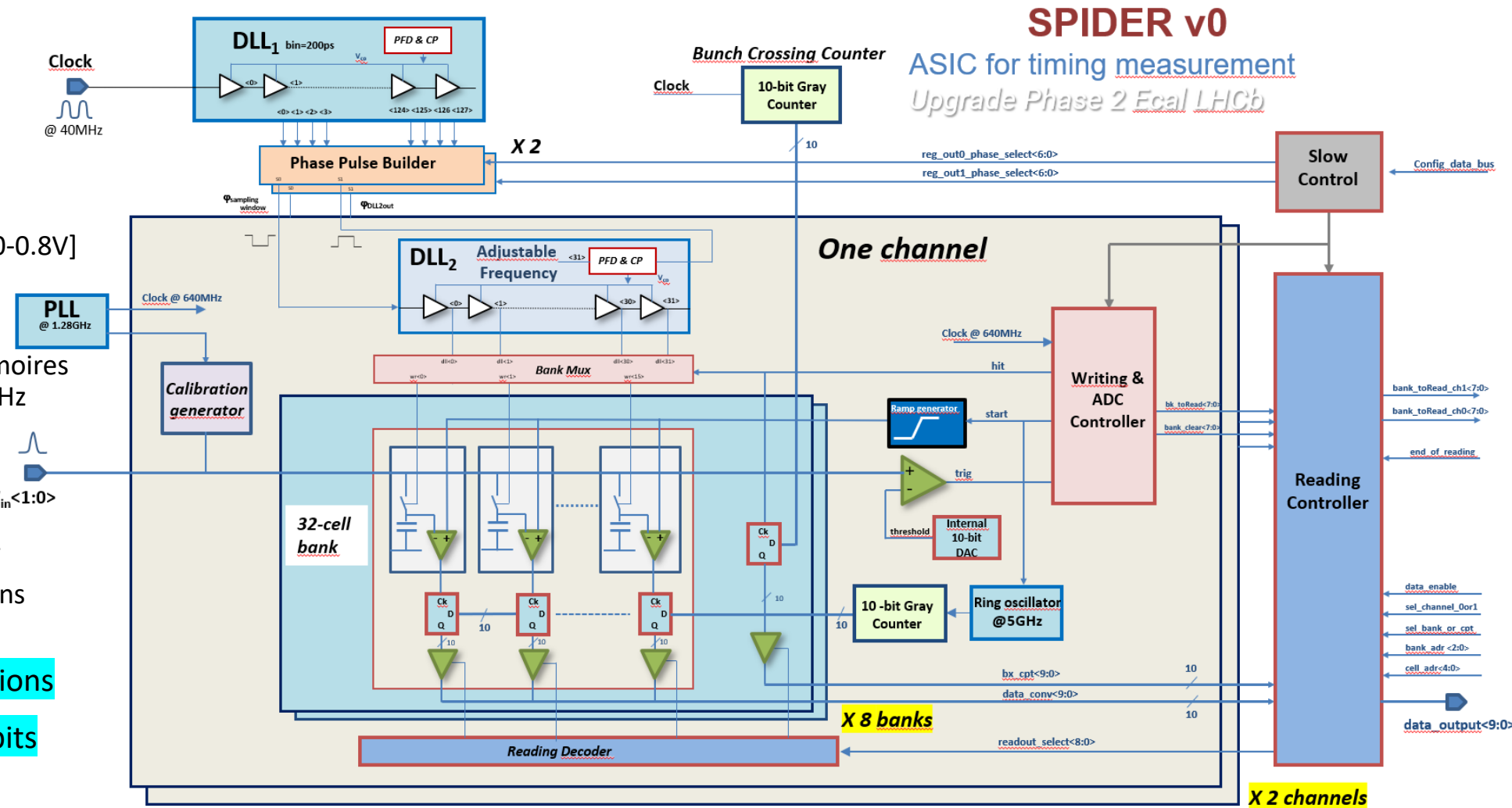
La version prototype de SPIDER

➤ Spécifications de l'architecture du prototype de 2 voies ("V0")

- TSMC 65nm, VDD 1.2V
- 2 voies auto-déclenchés
- Distribution d'horloge & DLLs
- Cellule mémoire
 - Etage de type "bootstrap" ; [0-0.8V]
 - Bruit < 0.5 mV
- Système "Multi-banques"
 - 8 banques de 32 cellules mémoires
 - Echantillonnage de 1.6 à 20GHz
- ADC Wilkinson 10 bits@5 GHz
 - Compteur rapide pour limiter le temps de conversion à 200ns
- PLL et DAC + buffer for calibrations
- Bus commun de lecture de 10 bits

Future version V1:

- 8 voies, lecture par lien série à 2.56 Gb/s par voie, ASIC-driven (mode "push")



La collaboration SPIDER

- “Projet R&T” @ IN2P3, 2021-2023 (RS: P. Robbe & RT: C. Beigbeder)
- Passage prévu en “master projet” à partir de fin 2025 : revue KDP @IN2P3 fin juin
- 5 laboratoires de l’IN2P3, co-coordonateurs pour le développement de SPIDER : P. Vallerand & B. Joly
- Organisation en 7 WPs
- Réunions bi-mensuelles



**Prototype soumis
début 2025 pour un
coût de 50k€**



C. Agapopoulou
C. Beigbeder
D. Breton
R. De Neeff
Z. Kiraz
J. Maalmi
P. Robbe
C. Sylvia
P. Vallerand



N. Arveuf
G. Blanchard
B. Joly
F. Jouve
V. Tisserand
R. Vandaële



L. Alvado
L. Leterrier



E. Béchetille
H. Mathez

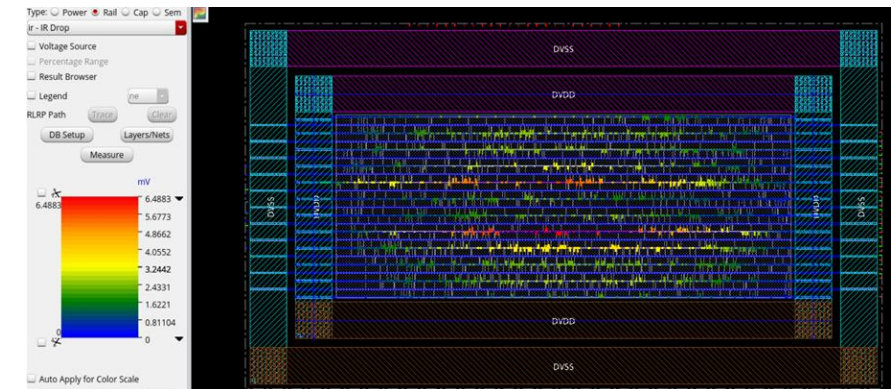
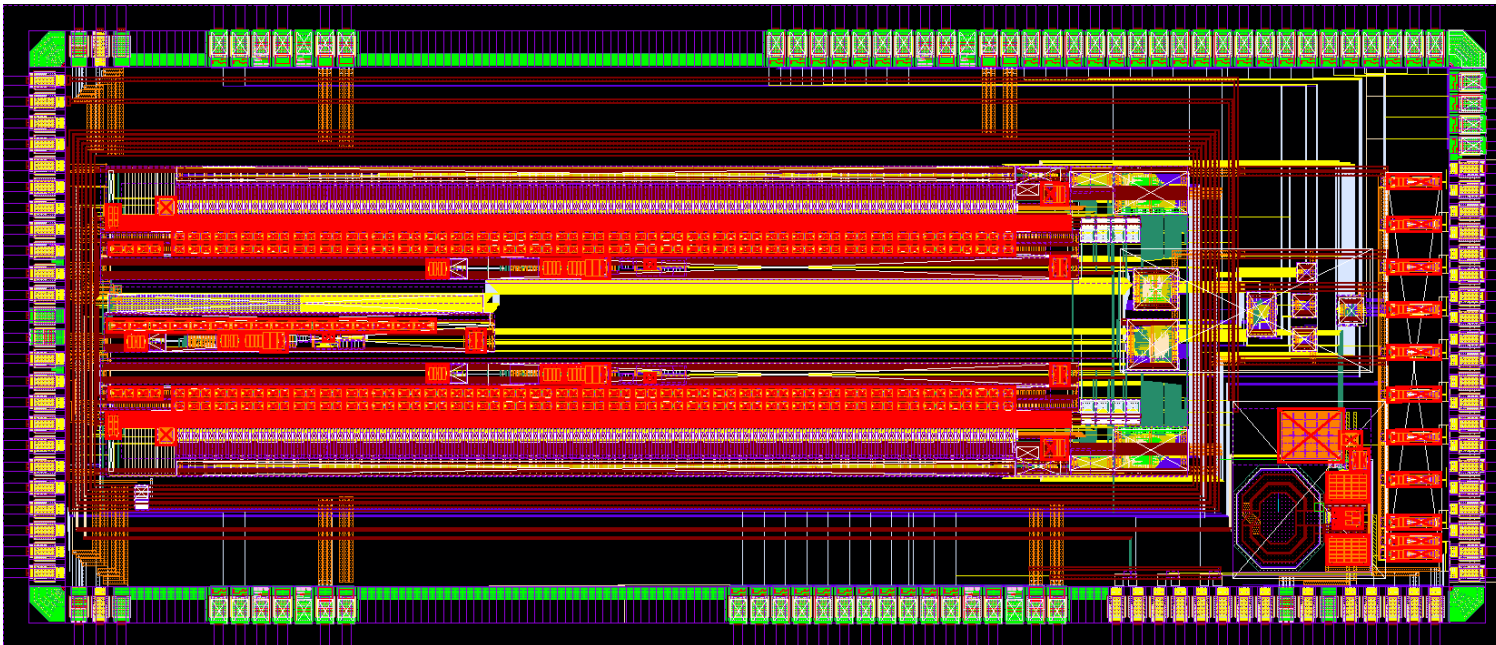
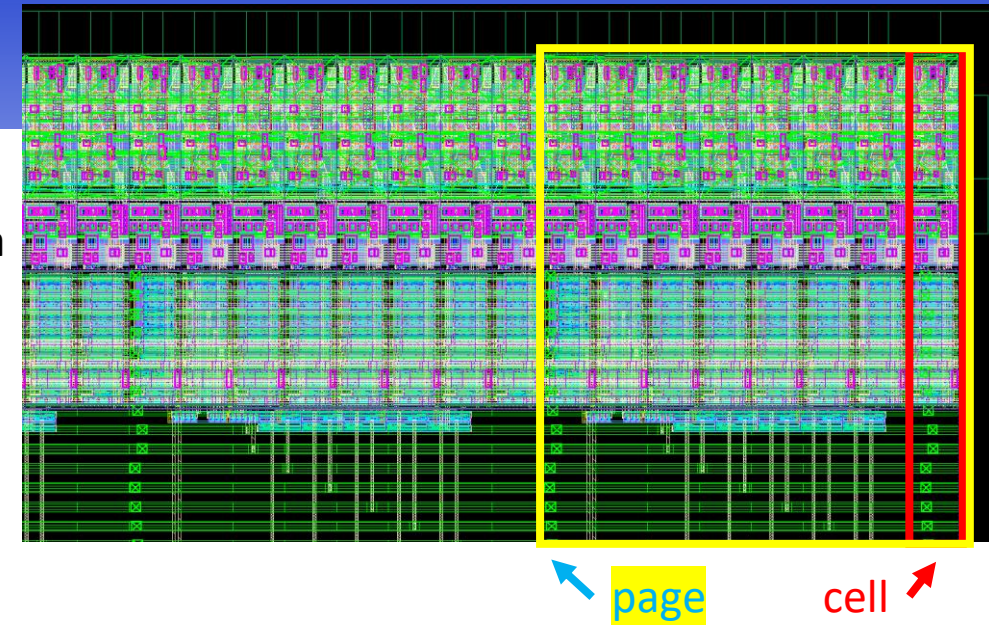


D. Charrier



Design du « Layout »

- Chaque voie est composée => $8 \times 32 = 256$ cellules d'échantillonnage
- Basé sur des pages où les 8 banques sont entrelacées. Longueur totale de la mémoire : 2,8 mm
- Distribution verticale des canaux avec de nombreux niveaux hiérarchiques.
- Notre philosophie : simulations post-layout approfondies pour vérifier : intégrité des signaux critiques, temporisation, couplages
- Optimisation pour réduire la consommation et les transitoires de courant sur les V_{DD}



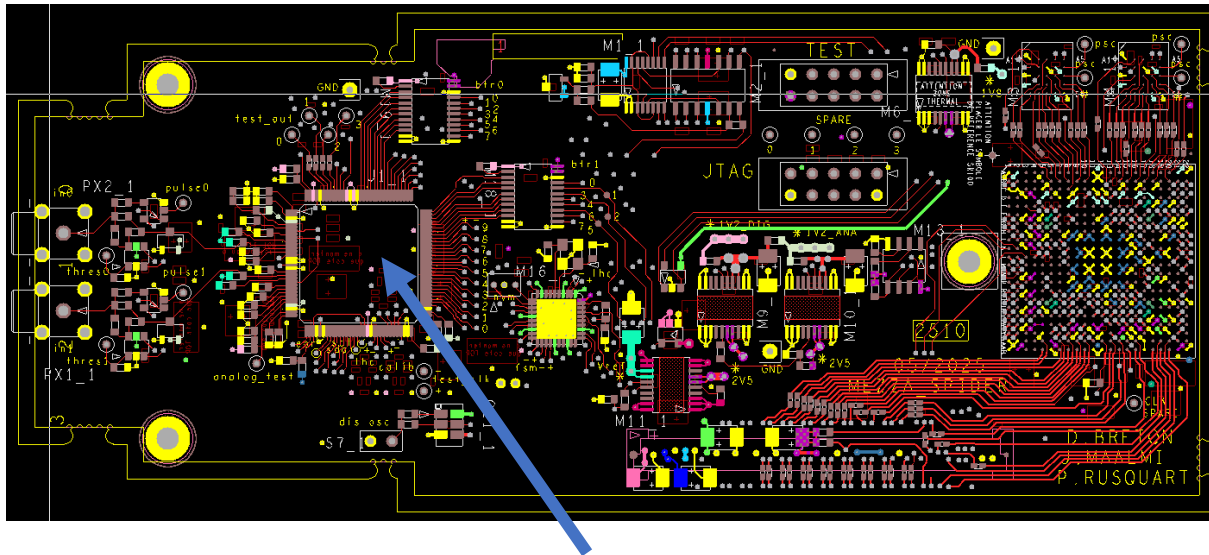
- **V0 soumise début 2025: 2 x 5 mm²**
- **Premier tests prévus à partir de juin**
- **2 bancs de tests sont actuellement en cours de finalisation en parallèle @ IJCLab et LPC Clermont"**

Banc de tests de l'asic SPIDER

- Basé sur les modules de tests WaveCatcher et SAMPIC :
association d'une carte mère avec toutes les interfaces + carte mezzanine dédiée
- Nous avons développé une nouvelle carte mezzanine pour accueillir Spider
- SPIDER sera encapsulé dans un boîtier de type QFP128 avec un pas de 400µm.



D. Breton
J. Maalmi
R. De Neeff



PCB carte mezzanine -SPIDER v0

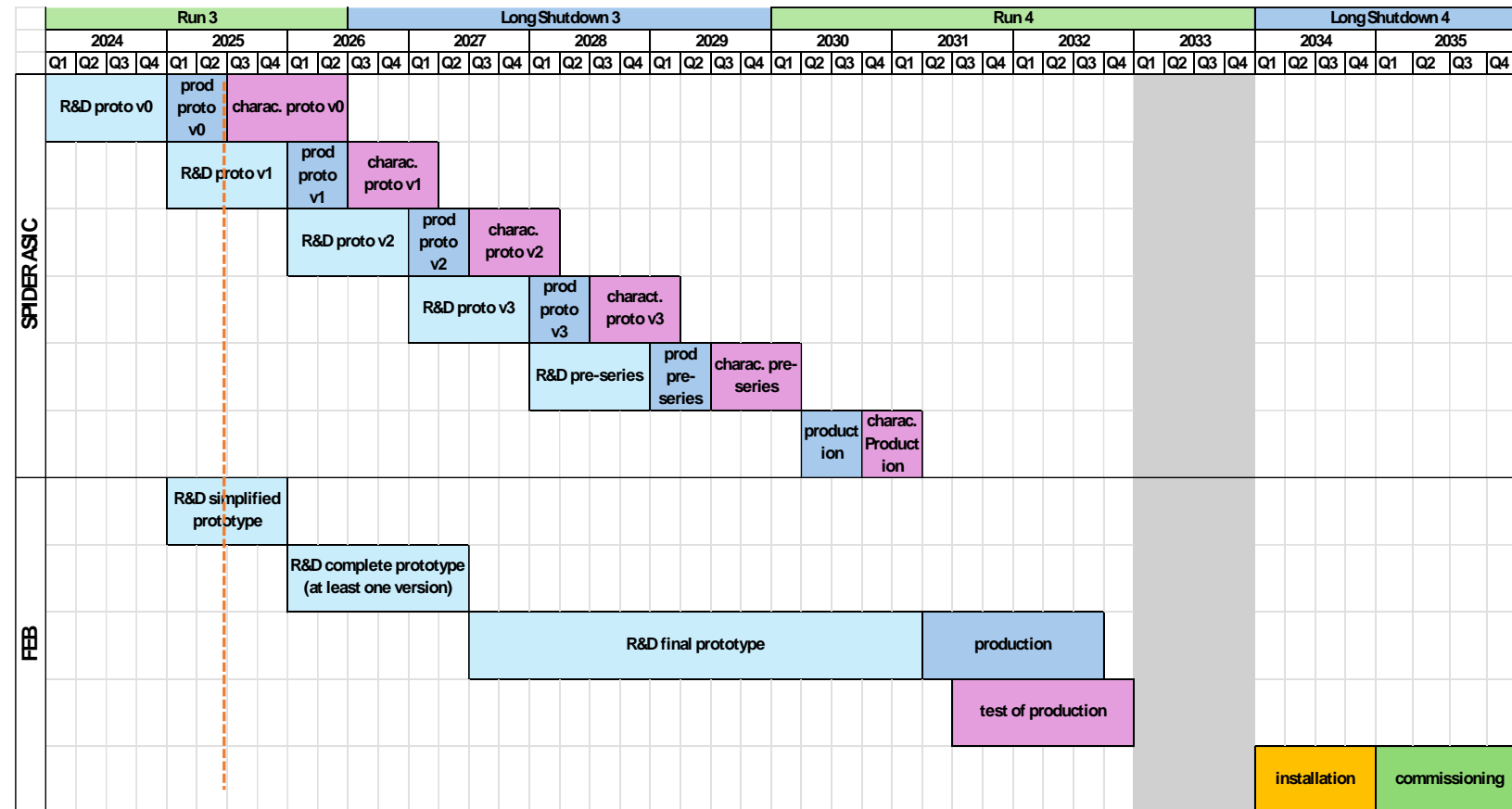


Module de tests =
carte mère + carte mezzanine

Calendrier de développement

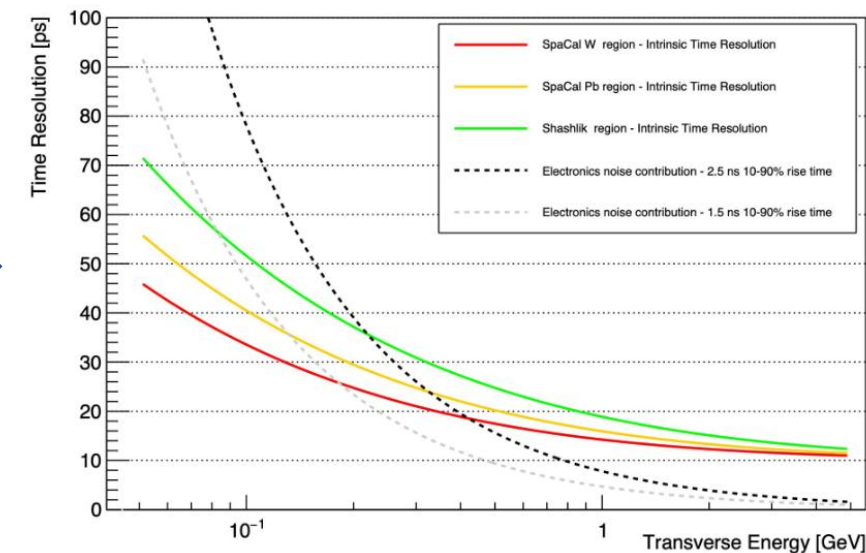
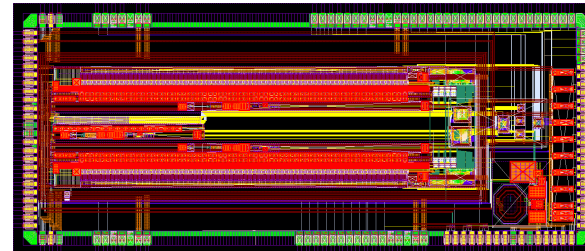
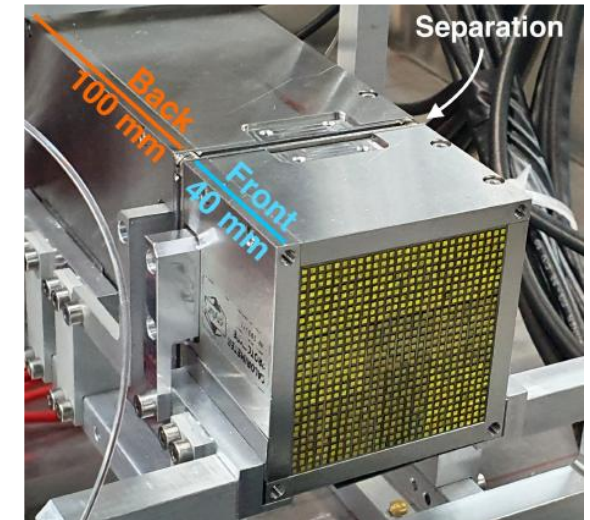
➤ Plan basé sur environ 1 cycle de fonderie par an de 2024 à 2029 soit 2 prototypes à 2 canaux et 3 prototypes à 8 canaux

- **SPIDER V0** (prototype à 2 canaux), conception 2023-2024, test 2025-2026
- **V0 bis** si nécessaire (prototype à 2 canaux avec corrections)
- **V1 (8 canaux)**
- **V2** (8 canaux + tolérance aux radiations + optimisations)
- **V3** (+ objectif de « rendement »)
- **2028** : test du V3 ; conception de la préproduction
- **2029** : caractérisation de la préproduction
- **2030** : production de SPIDER (30 000 canaux, production des cartes d'acquisition)
- **2031-2032** : production et test des cartes
- 2034 : installation
- 2035 : mise en service



Conclusion

- La R&D des détecteurs progresse et se rapproche des objectifs visés en termes de résistance aux radiations et de performance temporelle.
- **La large gamme dynamique de mesure** sur la partie basse de la gamme d'énergie représentent **un double défi pour la mesure du temps**.
- Développement d'une **nouvelle architecture de SPIDER à l'état de l'art** optimisée pour:
 - traitement des forts taux de comptage $\sim 10\text{MHz}$
 - capable de sélectionner les échantillons numériques pour rendre le flux de lecture des données supportable par l'acquisition
- SPIDER devrait être utilisable avec tout type de détecteur rapide sur un collisionneur à 40 MHz.
 - L'échantillonnage peut aller jusqu'à 20 GS/s pour des signaux très rapides
 - Pour **Picocal**, la meilleure résolution temporelle possible dépendra directement du temps de montée du signal
- Il reste encore beaucoup de chemin à parcourir...
 - Mais c'est déjà un grand pas en avant !



Merci de votre attention.