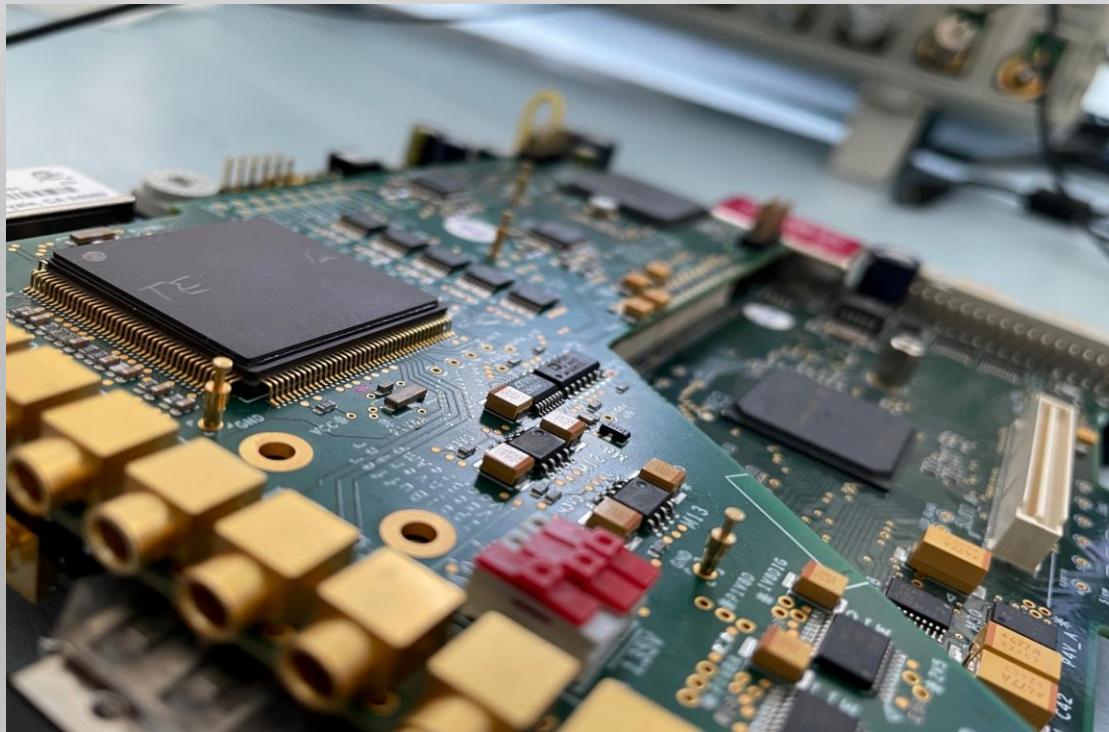


Caractérisation du circuit TEPIC : Time and Energy for Photomultipliers Integrated Circuit

De Neeff Raphaël - Service Systèmes Numériques et Acquisition / Département électronique / Pôle Ingénierie



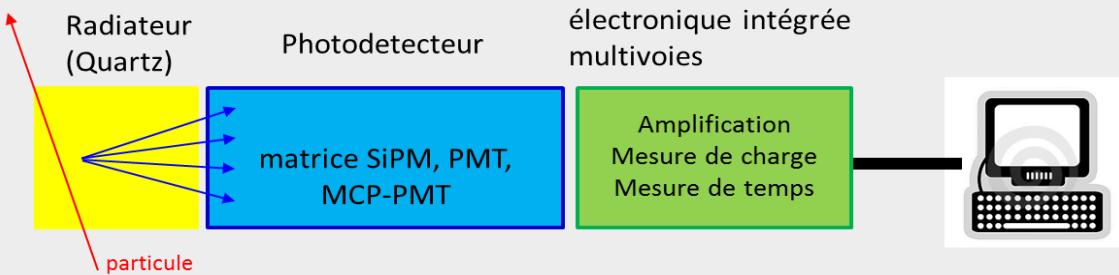
Carte électronique TEPIC.

Sommaire

- Présentation du projet TEPIC
- Schémas de principe du circuit
- Environnement de test
- Caractérisation de la partie TDC:
 - Fonctionnement du TDC de TEPIC
 - Calibration
 - Protocole de test
- Résultats

Le projet TEPIC

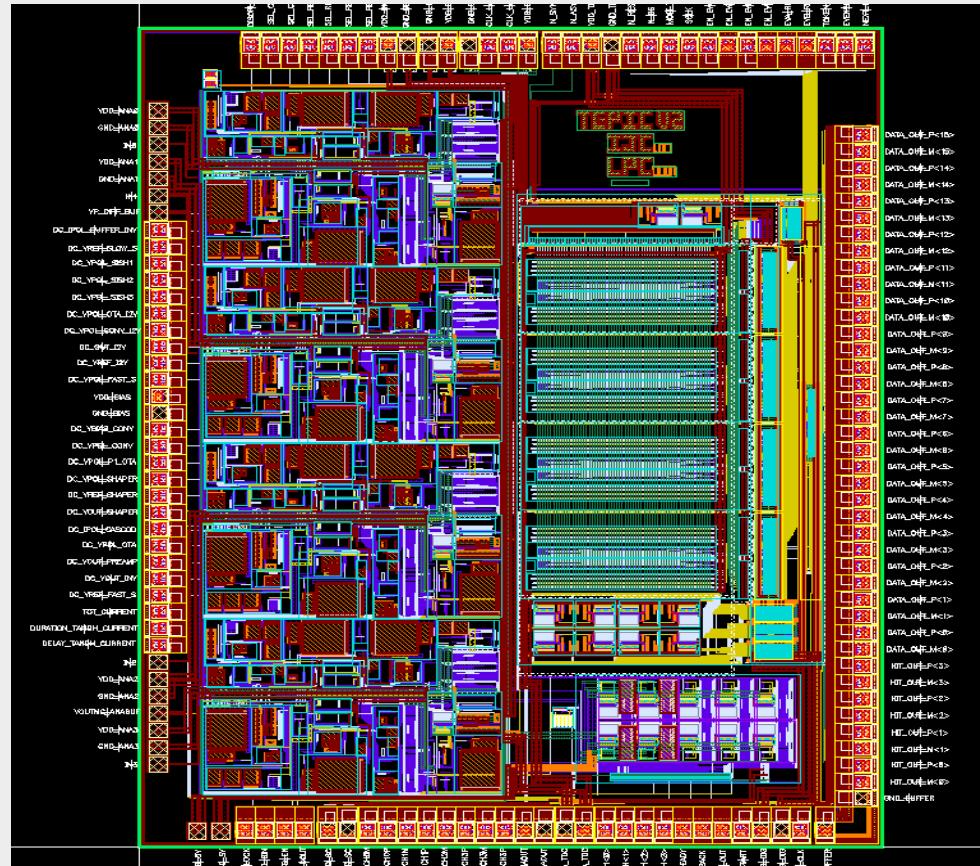
- ASIC développé pour la physique des particules, projet de R&D dédié à la lecture de photodétecteurs.



- TEPIC: “Time and Energy for Photomultipliers Integrated Circuit”.

TEPIC		
	Acteurs	Mesure
Partie analogique	IJCLab Philippe Vallerand	Préamplification (2 options) et Shaper Charge Particule
Partie numérique	LPC Caen Laurent Leterrier Sebastien Drouet	Time to digital converter (TDC) Temps d'arrivée particule

- Nombres de voies : 4
- Surface = 10 mm²
- Technologie TSI 180 nm
- Boîtier céramique QFP 160 broches 28 mm x 28 mm
- Ligne de financement: Projet Fracas (domaine médical, arrêté) et Cherenkov Lab (projet IN2P3)



Layout de la puce TEPIC.

Schéma de principe du TEPIC: détail partie analogique

➤ Schéma pour une voie (4 en tout)

- La partie amplification en tension à base d'amplificateur cascode.
- La partie amplification en courant, composée du convoyeur de courant à base de transistors MOS et de l'intégrateur RC.

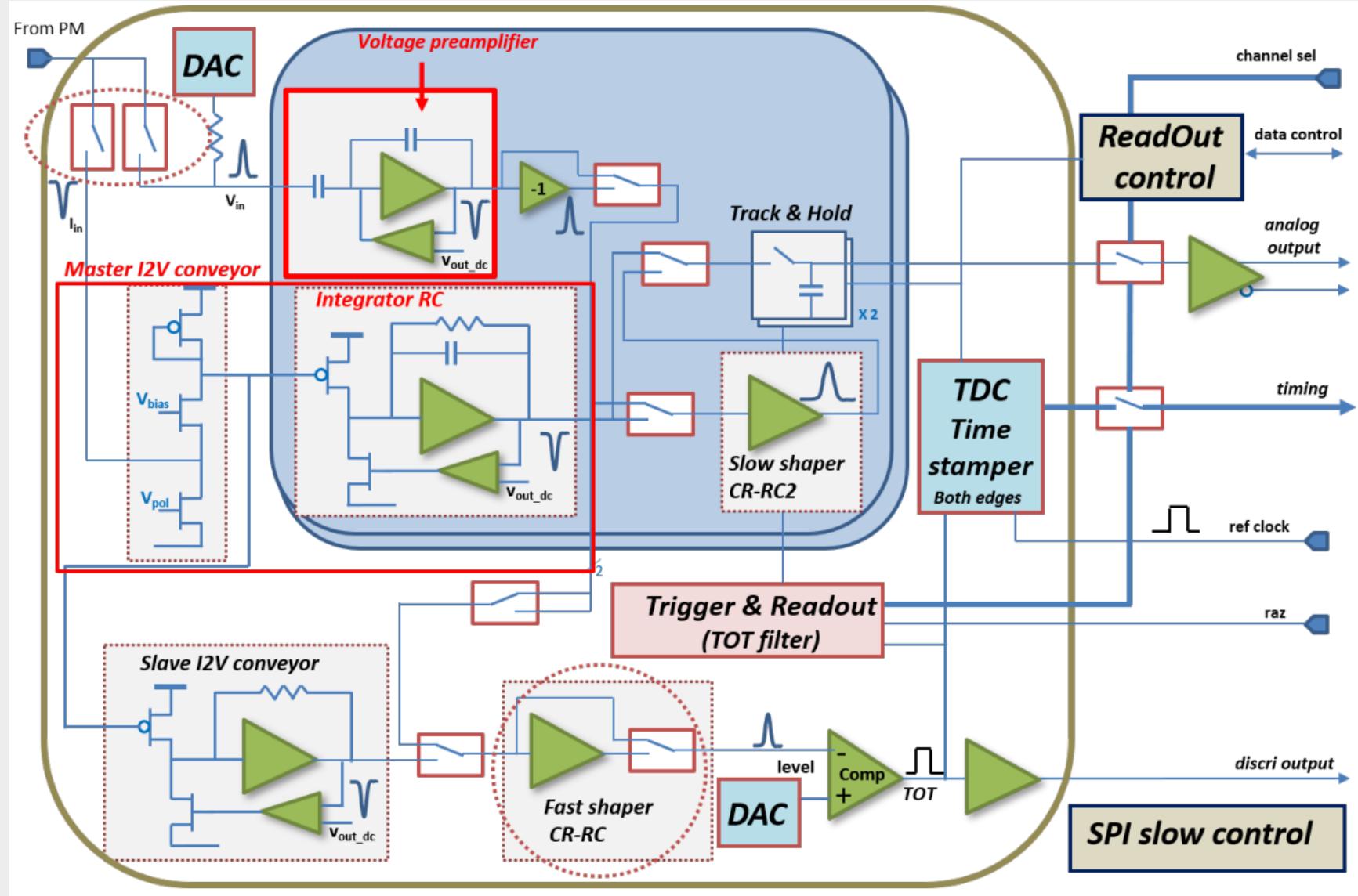
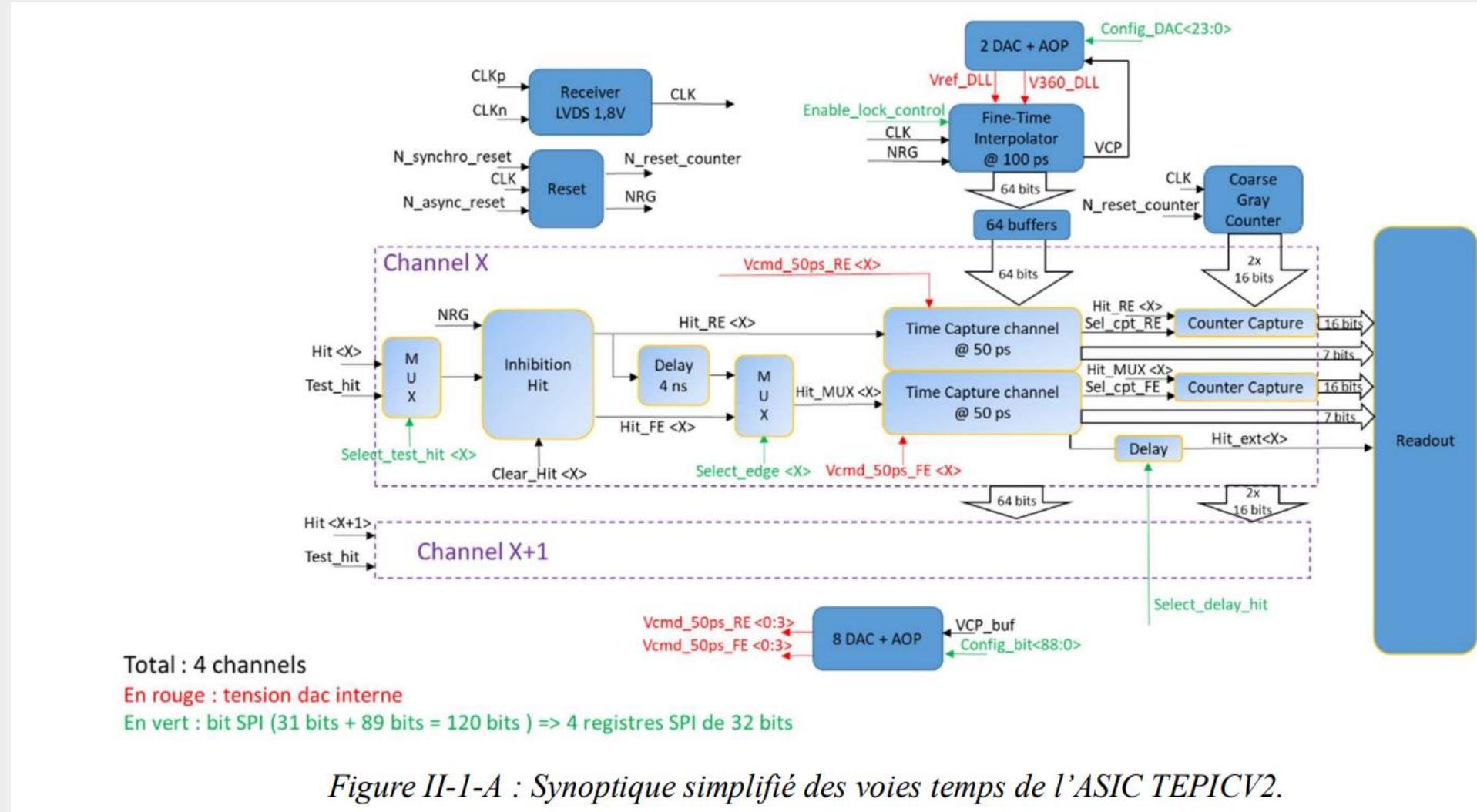


Schéma de principe de la puce TEPIC, d'après P. Vallerand.

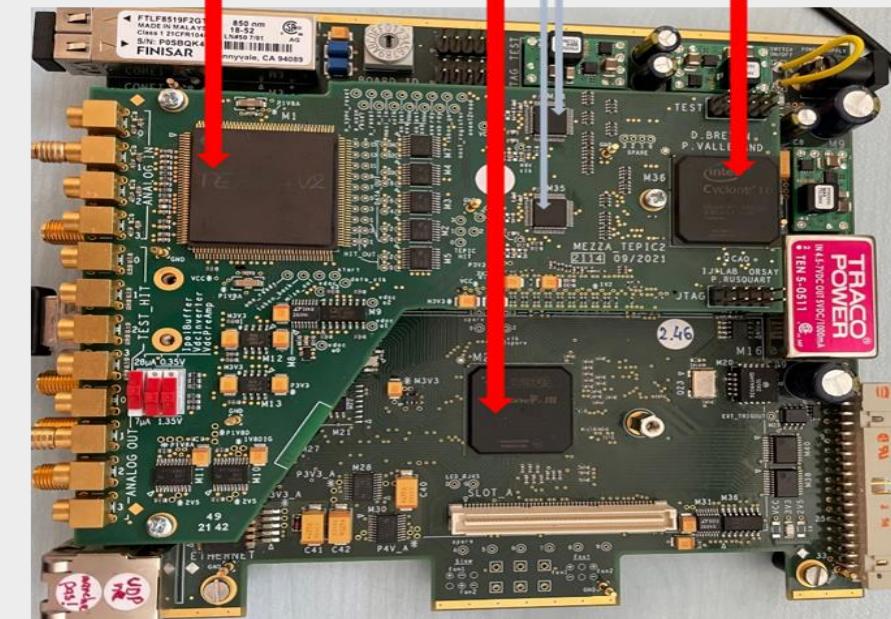
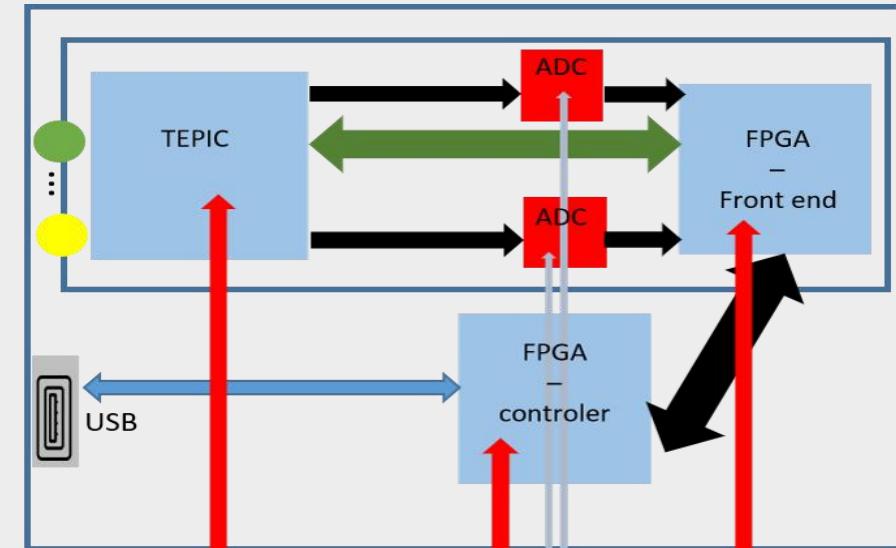
Synoptique de la partie mesure de temps: TDC



Synoptique de la voie temps du TEPIC, L. Leterrier.

Environnement de Test de l'ASIC TEPIC

- **Carte Mezzanine** conçue par D. Breton en collaboration avec Ph.Vallerand.
 - Carte compatible avec les cartes mères (**MezzaMother**) utilisées dans d'autres projets (WaveCatcher, Sampic, ILC ...)
 - Accès par USB et librairie **LALUsbML** (Chafik Cheikali).
- CAO (Routage) : P.Rusquart
- Câblage de la carte à IJCLab par le **Service CAO Prototypage et Réalisation**: J.Favre et B.Debennerot
- Firmware : J.Maalmi
- **Logiciel de contrôle et acquisition** : R. De Neeff avec l'aide de J.Maalmi



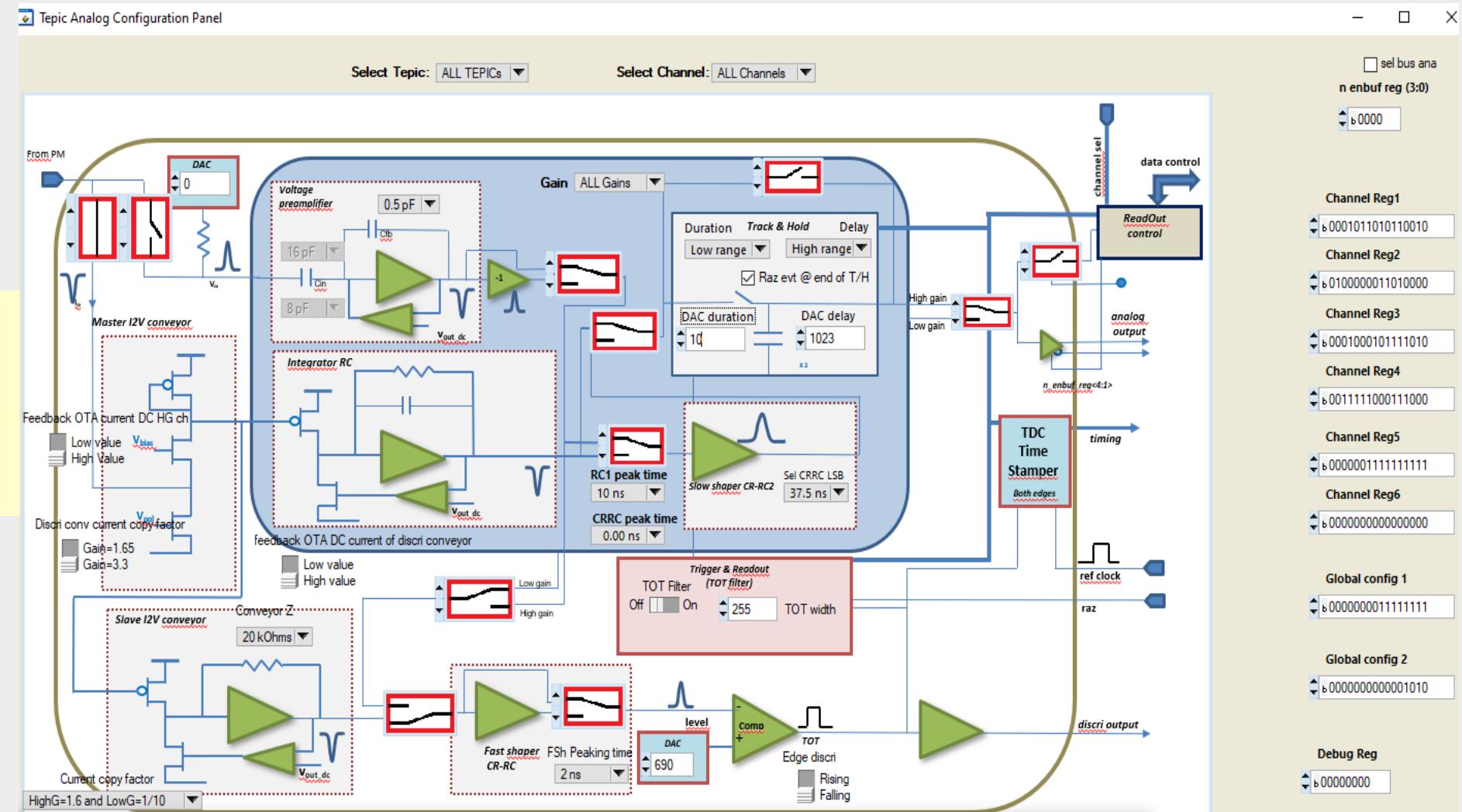
Carte mezzanine TEPIC sur carte mère MezzaMother.

Logiciel de contrôle et d'acquisition (1/3)

- Utilisation de l'environnement LabWindows/CVI, en langage C

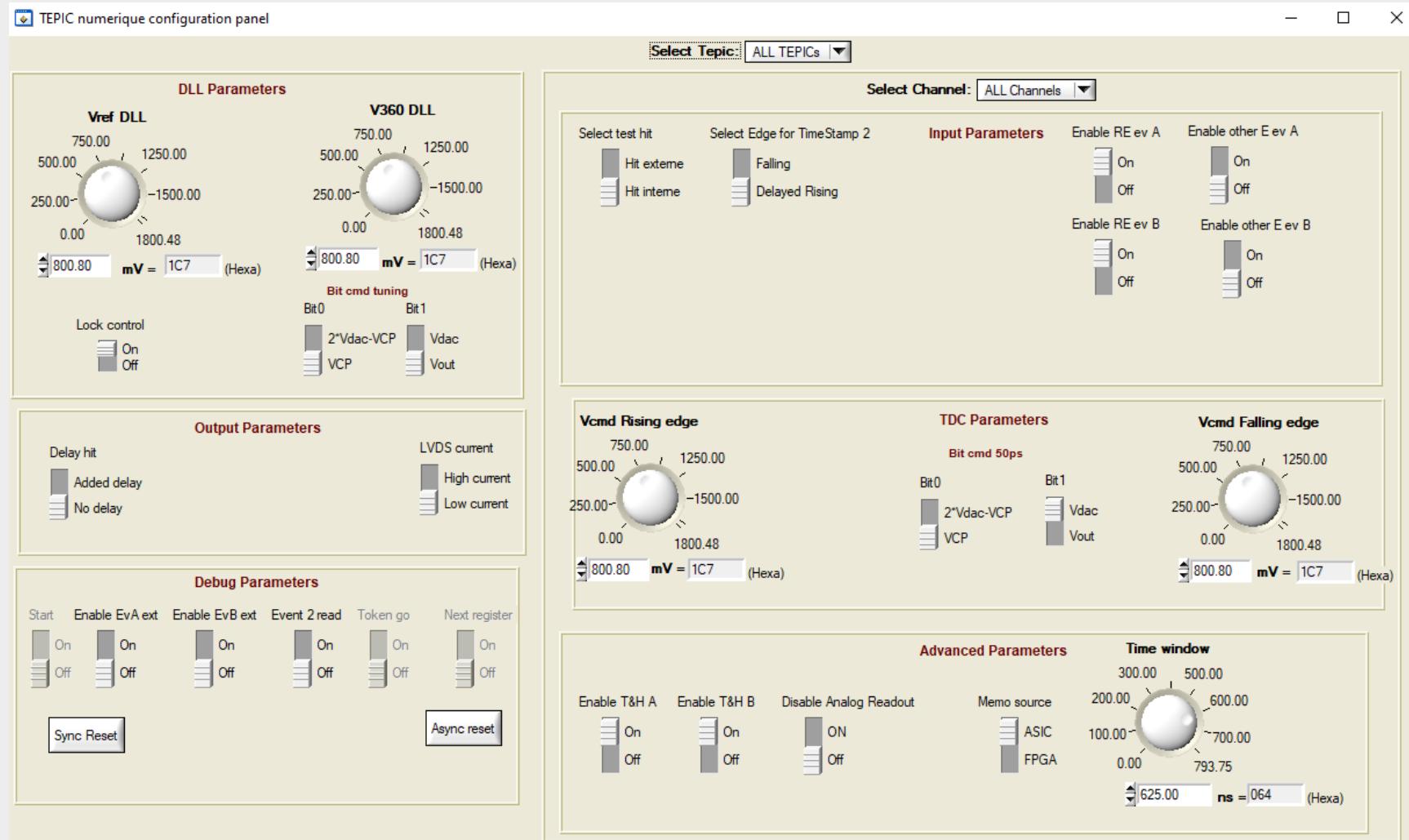
Panneau graphique de la partie analogique qui reprend la schéma de principe :

→ Facile d'utilisation et de compréhension



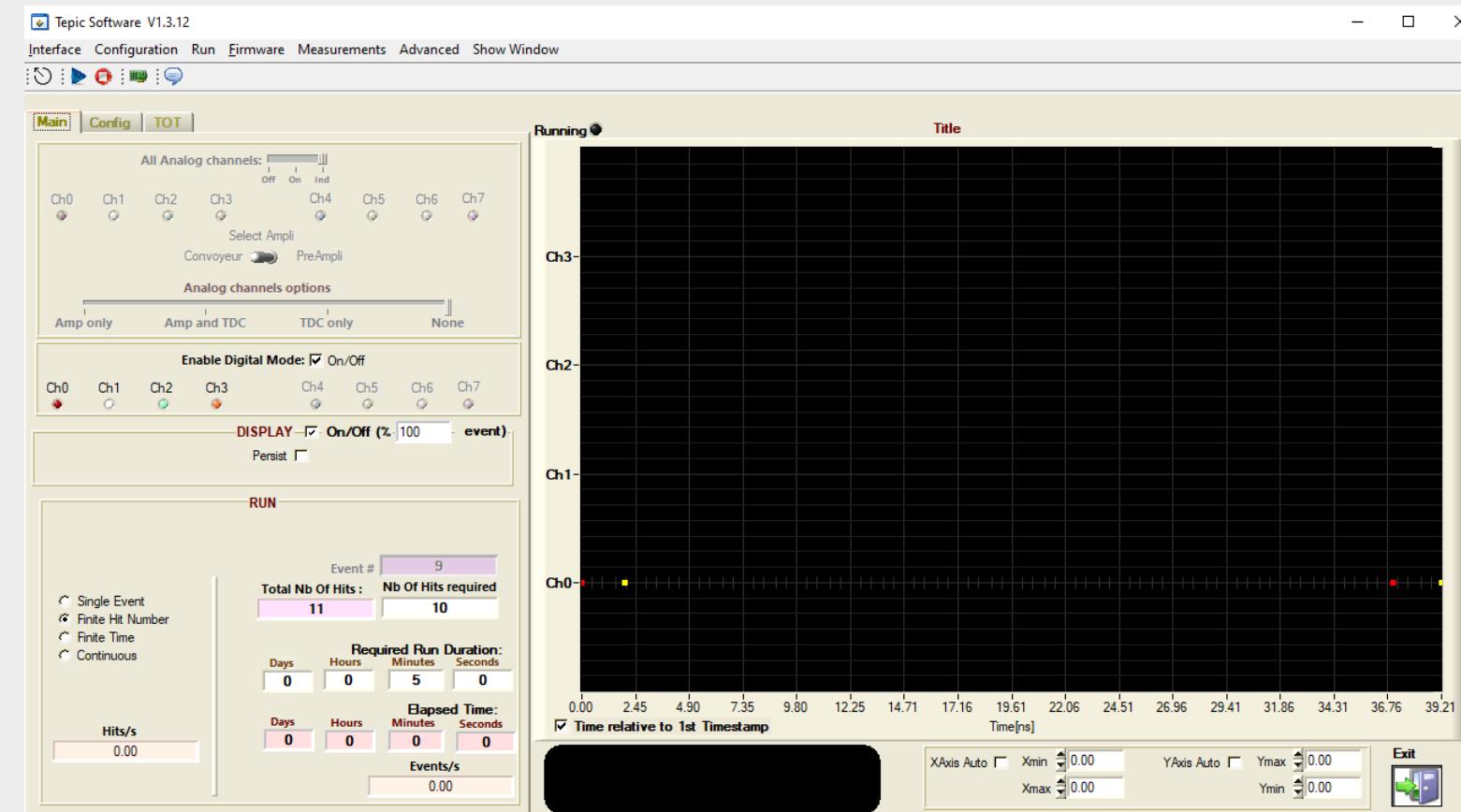
Interface graphique pour le contrôle de la partie analogique.

Logiciel de contrôle et d'acquisition (2/3)

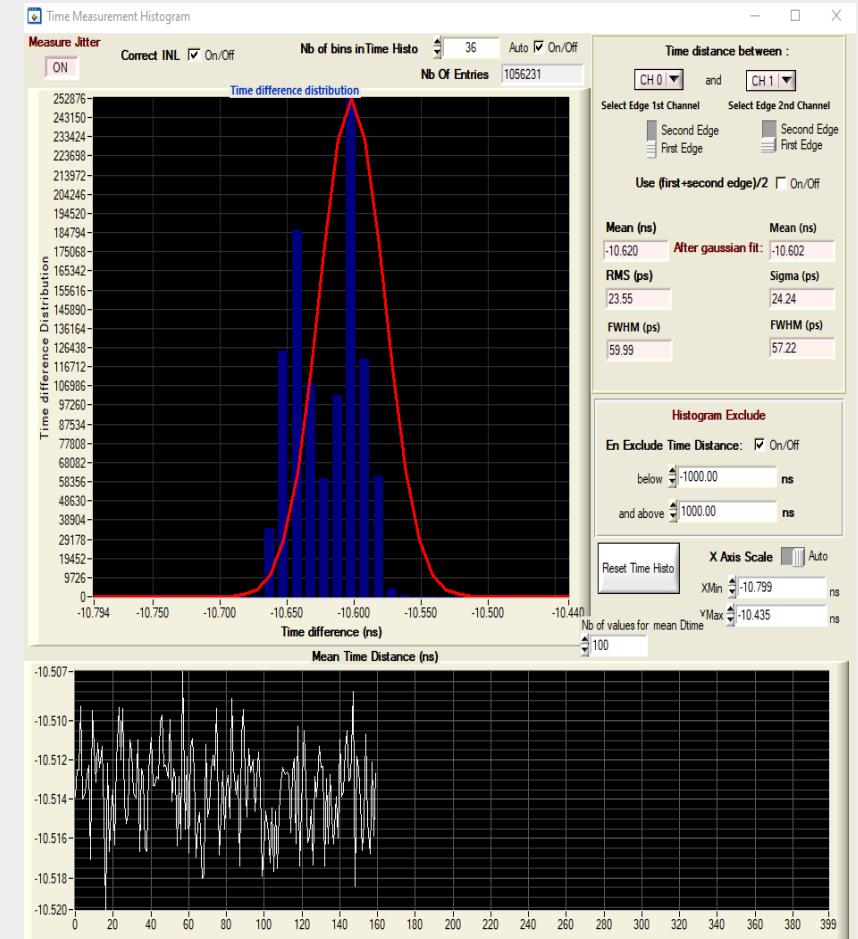


Panneau de configuration de tous les paramètres
de la partie numérique du circuit

Logiciel de contrôle et d'acquisition (3/3)



Panneau principal avec visualisation des données
« temps »



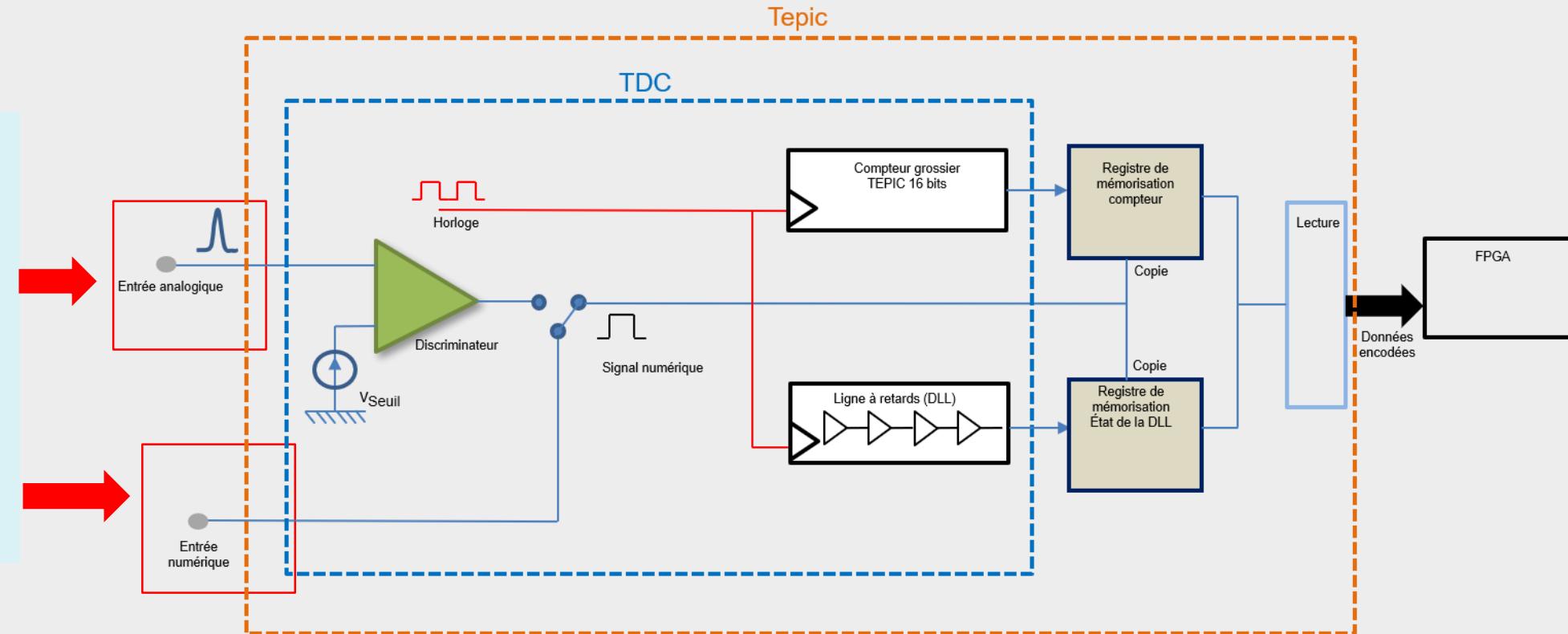
Panneau d'histogramme de mesure de temps
et StripChart

Principe de Fonctionnement d'un TDC à DLL

- But du TDC:** Capturer le temps d'arrivée d'un signal numérique, comme un « **chronomètre** »

Dans le circuit, il y a deux manière d'envoyer un signal numérique au TDC:

1. Hit provenant de la partie analogique, à la sortie du discriminateur.
1. Hit provenant de l'entrée 'Test' du circuit connectée à une entrée externe de la carte



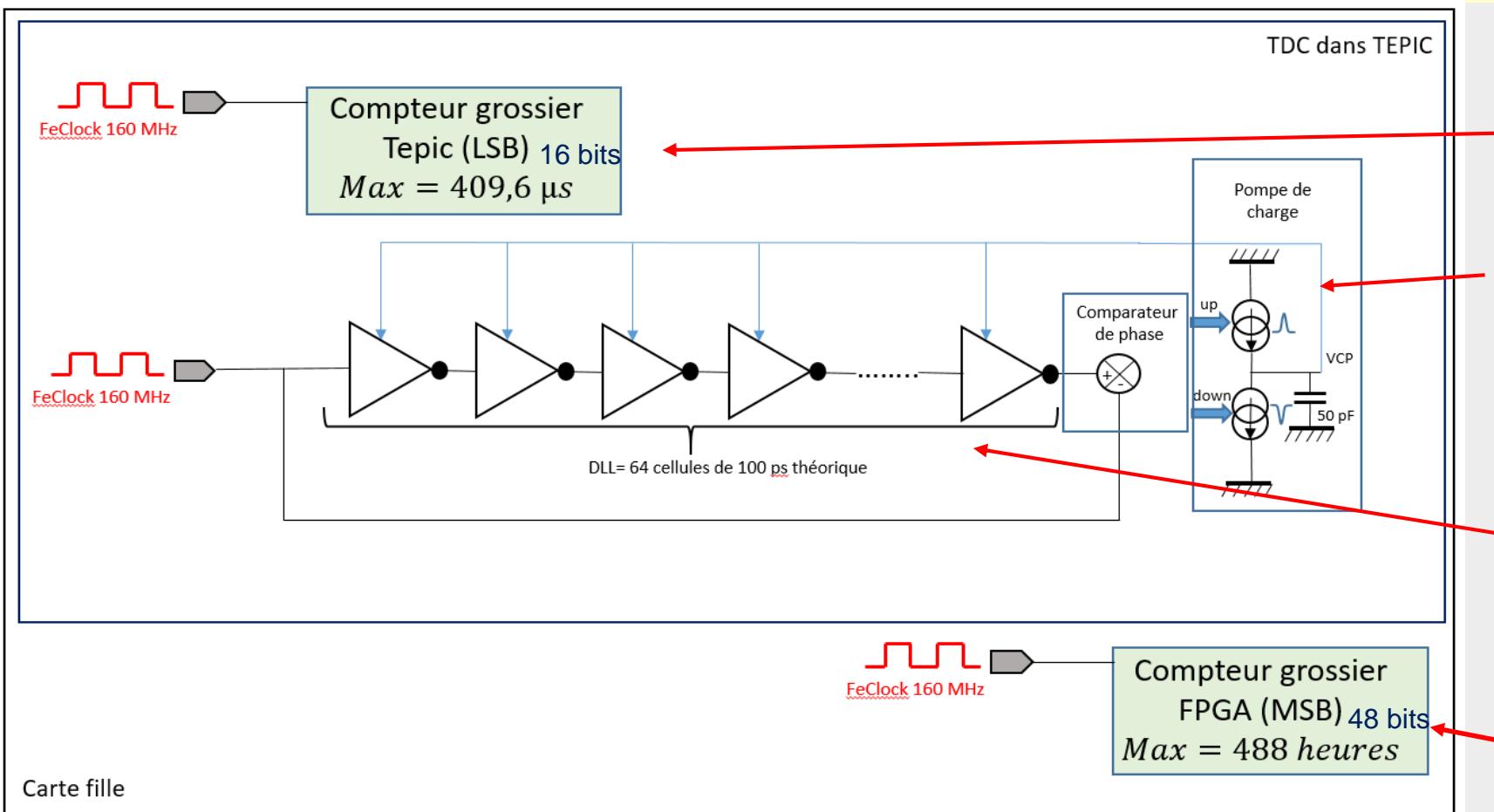
A l'arrivée du signal numérique :

1. On mémorise l'état du **compteur grossier** (pas de 6,25 ns, si horloge d'entrée = 160 MHz)
2. On mémorise l'état de la **DLL** (qui donne le **pas fin**)

Fonctionnement de la DLL (Delay Line Loop)

La ligne à retards (DLL) est **asservie à l'horloge** qui est à son entrée:

- On force, grâce au **comparateur de phase et à la pompe de charge**, le fait que la **somme de tous les retards** soit égale à **une période horloge**. Chaque « retard » est alors égal à : $\frac{T_{Horloge}}{\text{nombre de retards de la DLL}}$
- La DLL permet donc d'**interpoler** à l'intérieur du pas de l'horloge et donner un **pas fin** (~97ps).



Compteur grossier dans le TEPIC (sur 16 bits)

Le Comparateur de phase + pompe de charge

La ligne à retards rebouclée : 64 portes NAND.

$$\tau_{\text{ligne}} = T_{\text{Horloge}} = 6,25 \text{ ns}$$

$$\tau_{\text{cellule théo}} = \frac{T_{\text{Horloge}}}{64} \sim 97 \text{ ps}$$

Compteur grossier dans le FPGA (sur 48 Bits): il étend le champ de bits du compteur grossier du TEPIC

Principe du « double hit » du TDC de TEPIC

But : affiner encore plus le pas de la DLL ?

On **retarde le signal** numérique avec un **délai fixe** égal à peu près à ~ 50 ps (moitié du pas de la DLL) et on **recapture** une deuxième fois l'état de la DLL.

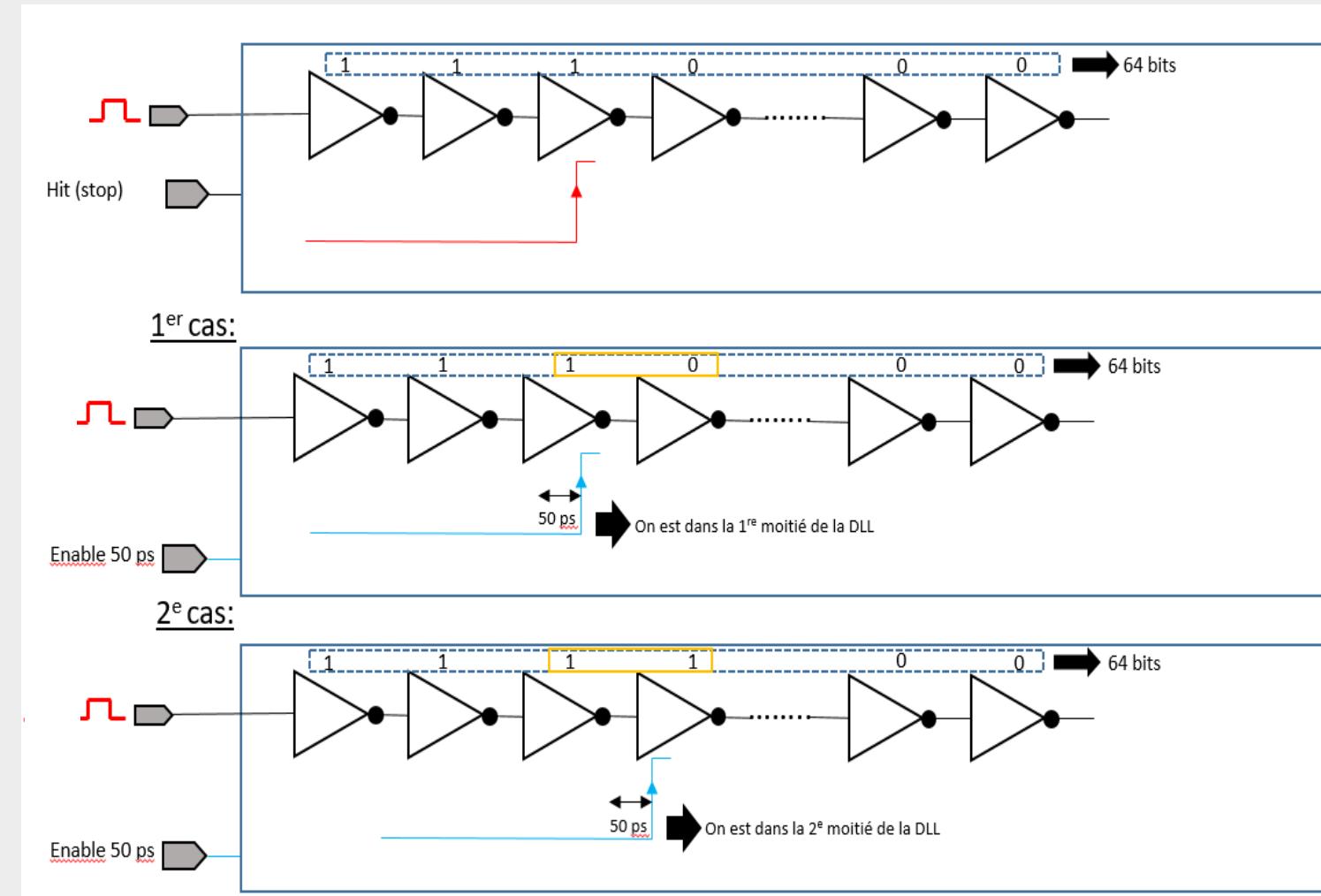
Etat de la DLL = l'endroit où se trouve l'horloge au moment de la capture.

- 1^{er} cas:
si $t_{1\text{ere capture}} \in [0; 50]$ ps, de la **cellule i**
 $\Rightarrow t_{2\text{e capture}} \in [50; 100]$ ps, de la **cellule i**

Dans ce cas, l'état de la DLL **ne change pas** entre les deux captures

- 2^e cas:
si $t_{1\text{ere capture}} \in [50; 100]$ ps, de la **cellule i**
 $\Rightarrow t_{2\text{e capture}} \in [0; 50]$ ps, de la **cellule i + 1**

Dans ce cas, l'état de la DLL **change** entre les deux captures



Description du principe de « double hit » ou double échantillonnage de la DLL

Grâce au double échantillonnage de la DLL, on descend le pas du TDC à ~ 50 ps!

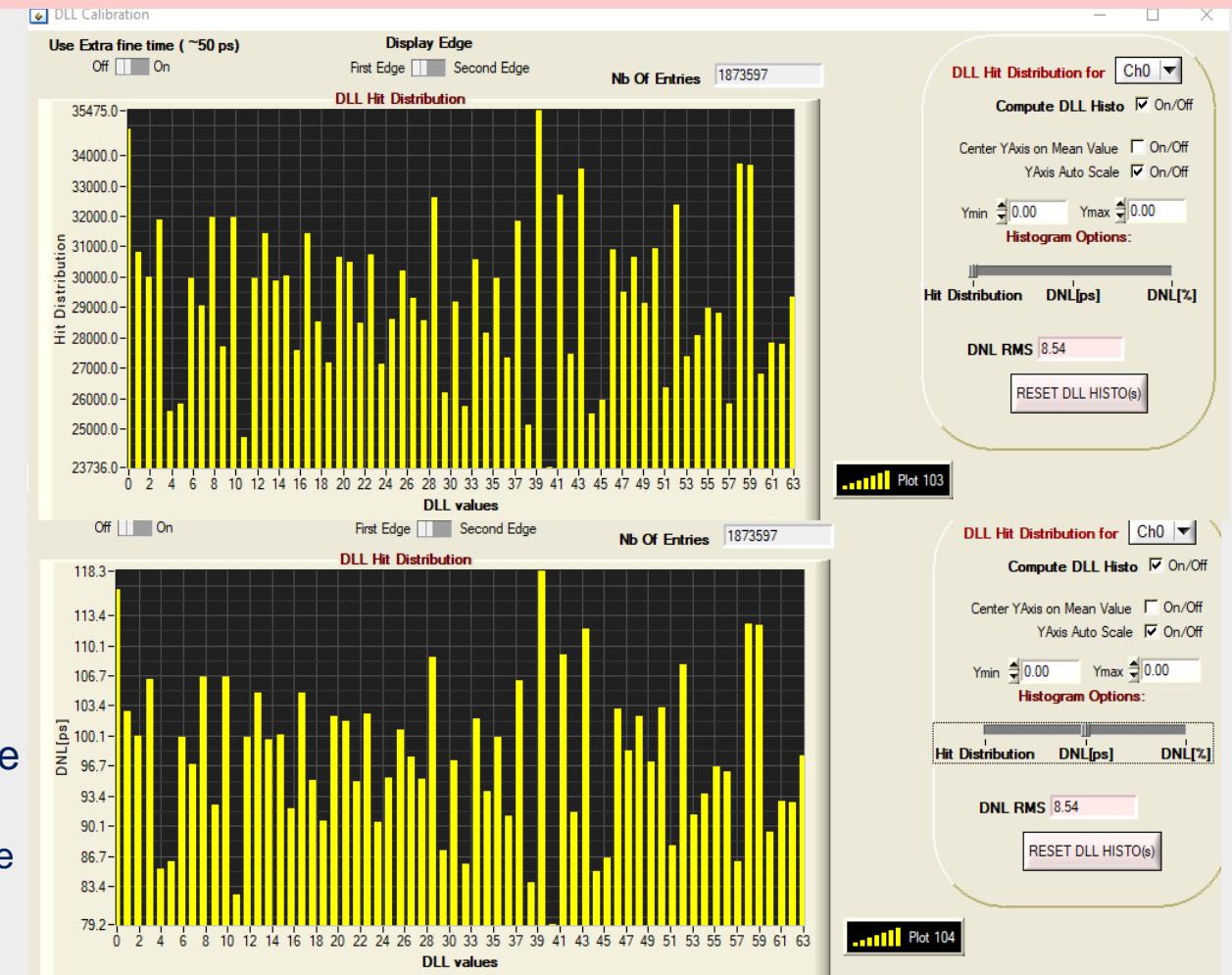
Calibration de la DLL : mesure de la DNL

Au vu des disparités liées à la gravure du silicium, ainsi que des dispersions des tensions d'alimentation dans le circuit, toutes les cellules à retard n'ont pas un retard **parfaitement égal au retard théorique** attendu qui est: $\tau_{cellule \text{ théo}} = 97,65 \text{ ps} (\sim 100 \text{ ps})$

=> On appelle la disparité dans la valeur des retards de la DLL : **la Non Linéarité Différentielle (DNL)**

- Pour estimer le retard de chaque cellule expérimentalement on utilise une **méthode statistique**:
 - Envoi de hits asynchrones de l'horloge du circuit provenant d'un générateur
- Le taux de remplissage de chaque cellule est directement proportionnel à la valeur de son retard: en effet plus le retard est grand, plus la cellule sera touchée et inversement.
- On réalise un **histogramme** représentant la distribution des hits en fonction de la cellule à retard touchée.
- On traduit cette distribution en « picosecondes », sachant que la somme de tous les retards doit être égale à $T_{Horloge}$
 - On en déduit le délai de chaque cellule à partir de son nombre de hits enregistrés

$$\tau_{cellule \text{ } i \text{ exp}} = \frac{\text{Nb hits reçus par cellule } i}{\text{Nb hits total sur DLL}} \times T_{Horloge}$$



Histogramme de la distribution des hits reçus sur chaque cellule de la DLL (en nombre de hits et en ps) RMS : 8, 5ps !!

Calcul de l'INL (Non linéarité Intégrale)

- Comme la somme des retards de chaque cellule doit valoir $T_{horloge}$, en théorie on doit avoir pour la cellule 0 :

$$Delay_{cellule\ 0\ theo} = \frac{T_{horloge}}{64} \quad (6)$$

Or on mesure une certaine DNL (ou délai) en réalité, on en déduit donc la correction à apporter :

$$INL_{cellule\ 0} = \frac{T_{horloge}}{64} - DNL_0 \quad (7)$$

- Pour la cellule 1, on a un délai théorique de :

$$Delay_{cellule\ 1\ theo} = 2 \cdot \frac{T_{horloge}}{64} \quad (8)$$

- Pour la correction de la cellule 1, on doit rajouter la correction de la cellule 0 (cumul des erreurs) :

$$INL_{cellule\ 1} = 2 \cdot \frac{T_{horloge}}{64} - (DNL_0 + DNL_1) \quad (9)$$

- On peut donc inférer une formule par récurrence pour chaque cellule de la ligne à retard :

$$\forall n \in [[0; 63]], INL_{cellule\ n} = (n+1) \cdot \frac{T_{horloge}}{64} - \sum_{k=0}^n DNL_k \quad (10)$$

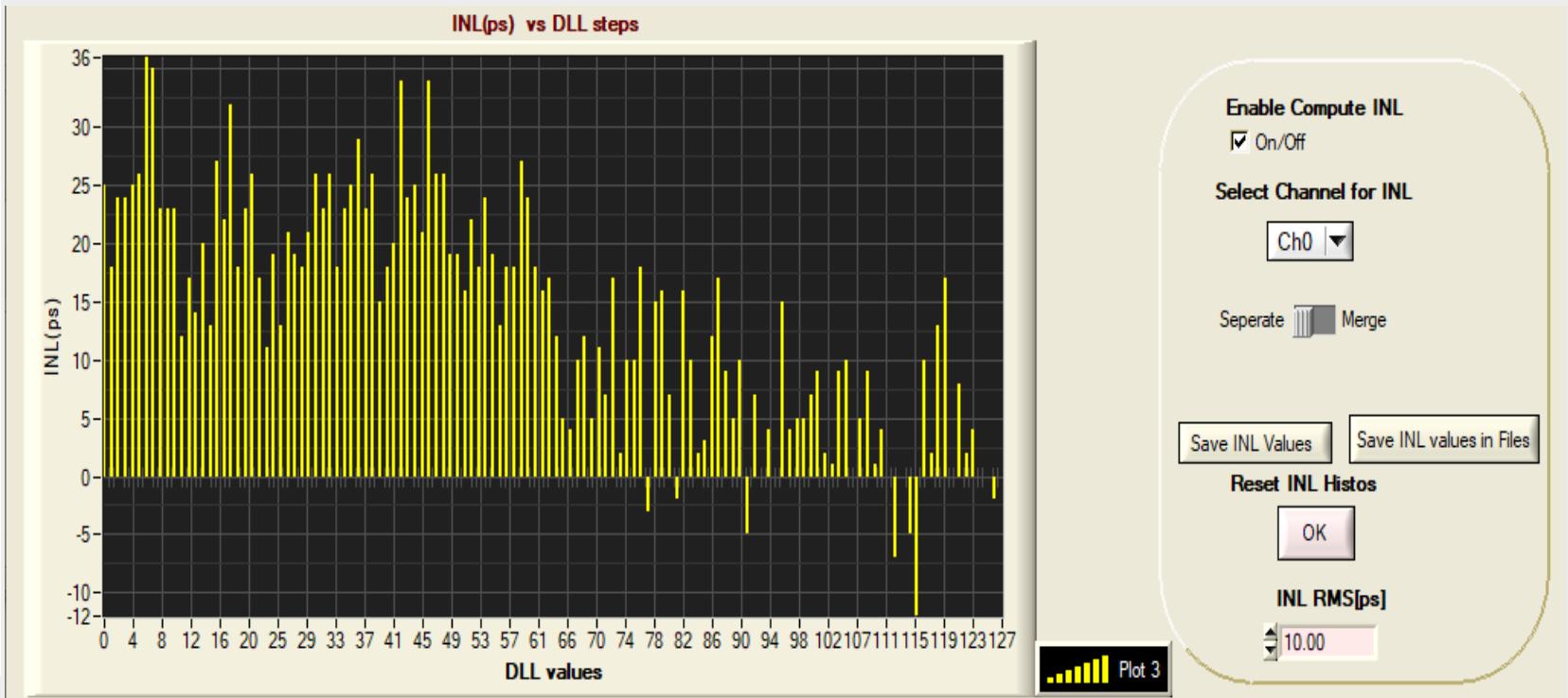
Si le pas de 50 ps est activé :

$$\forall n \in [[0; 127]], INL_{cellule\ n} = (n+1) \cdot \frac{T_{horloge}}{128} - \sum_{k=0}^n DNL_k \quad (11)$$

Cette somme représente une approximation de l'aire sous la courbe de l'INL, c'est donc une approximation de l'intégrale.

- Grâce aux délais mesurés pour chaque cellule de la DLL, on **calcule la correction à apporter** à chaque mesure de temps, en fonction de la cellule à retard touchée.

➤ Cela revient à calculer la **Non Linéarité Intégrale (INL)**



*INL (ps) en fonction du numéro de la cellule à retard de la DLL,
RMS ~ 10ps !*

Protocole de mesure de la résolution en temps du TDC

Caractérisation du TDC : mesure de la résolution en temps, grâce à la mesure de Δt entre deux signaux.

Paramètres du signal	
Amplitude(V)	4
f (kHz)	100
T monté(ns)	0,8
T descente (ns)	0,8
Largeur (ns)	100

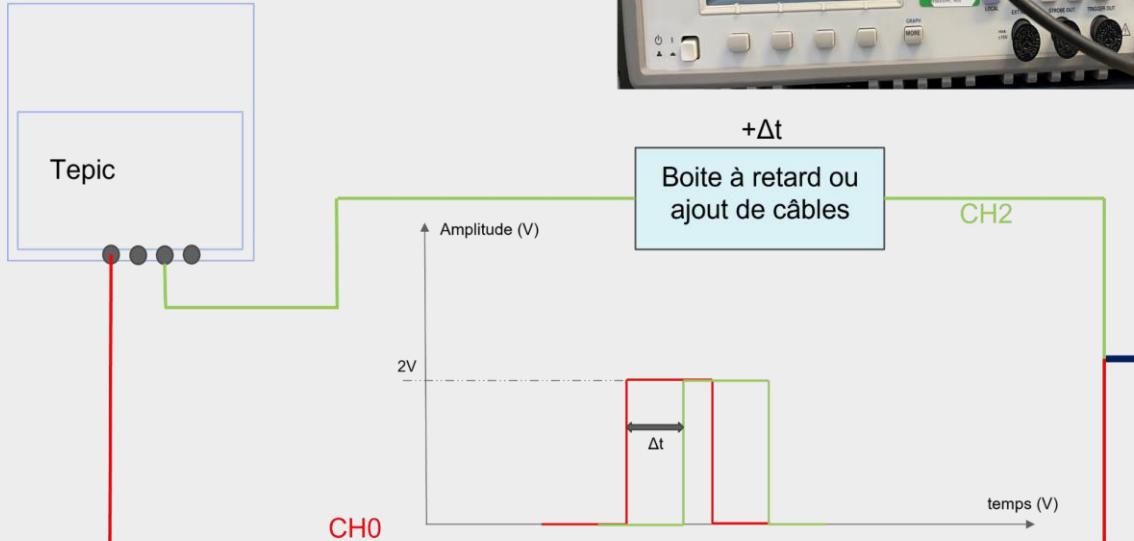
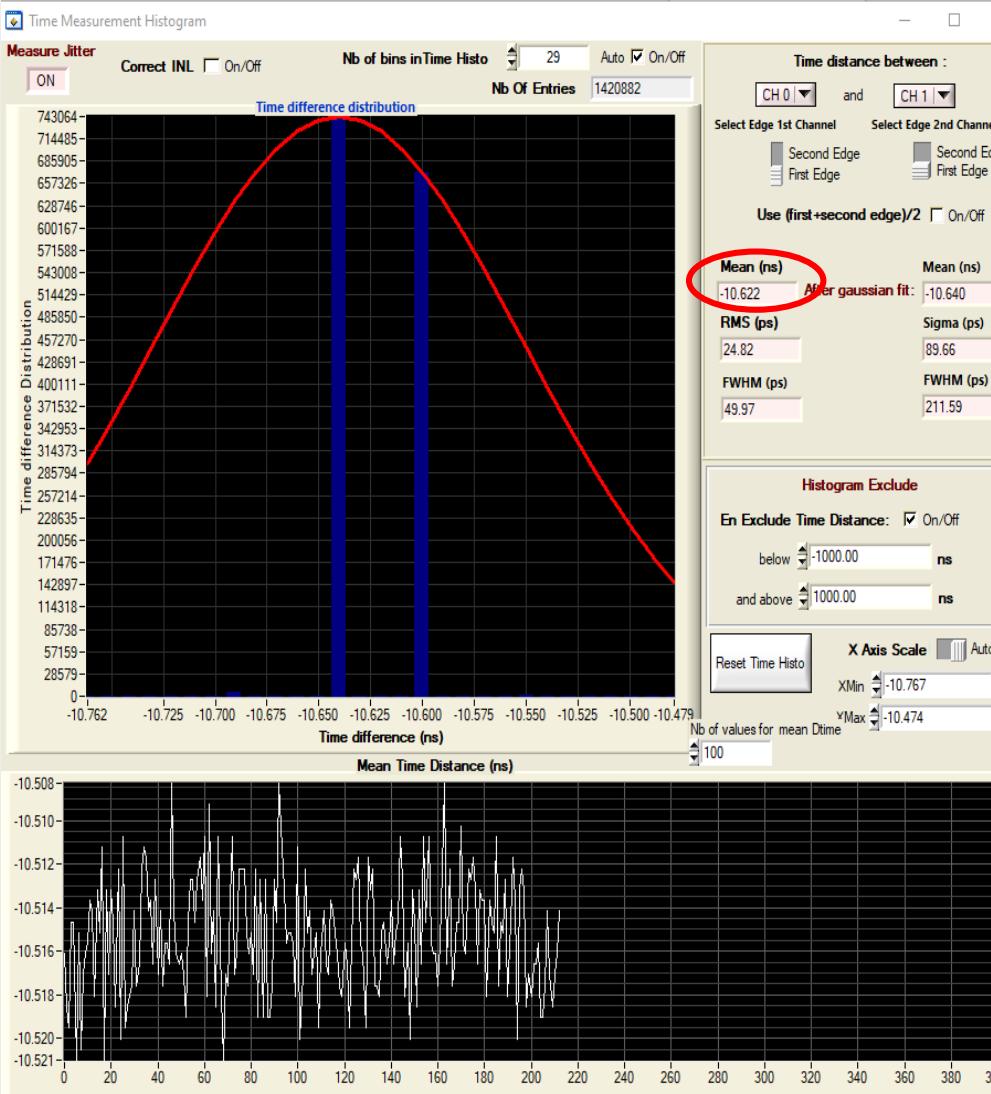


Schéma du banc de mesure de Δt .

- Envoi d'un pulse venant du générateur (asynchrone par rapport à l'horloge du TEPIC)
- Ce pulse est divisé en deux et envoyé sur deux câbles de **longueur différente**. (afin de créer un **différence de temps** sur l'arrivée des signaux)
- On, envoie ces pulses sur les entrées numériques de la carte de test.
- Cela induit un retard de propagation et donc un Δt entre les deux signaux.
- Production de l'histogramme des mesures pour différentes valeurs de Δt

Exemple d'Histogramme pour $\Delta t \sim 10\text{ns}$



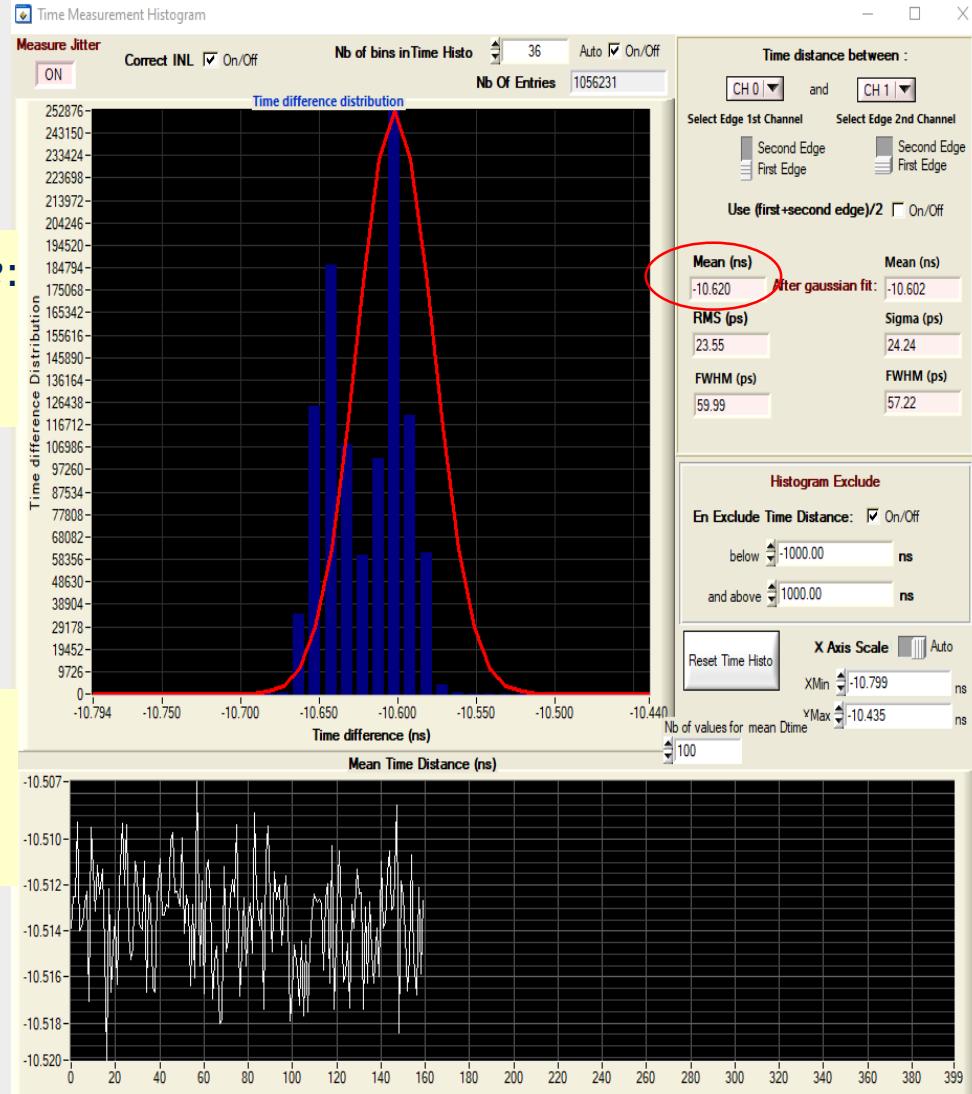
Histogramme de la mesure de Δt , sans correction d'INL. \rightarrow RMS 24,8 ps

Pour une mesure sur une voie:

$$\text{Résolution théorique: } \frac{LSB}{\sqrt{12}} \approx 14,4 \text{ ps}$$

Pour une différence de temps entre deux voies :

$$\text{Résolution théorique } \frac{LSB}{\sqrt{12}} \times \sqrt{2} \approx 20 \text{ ps}$$

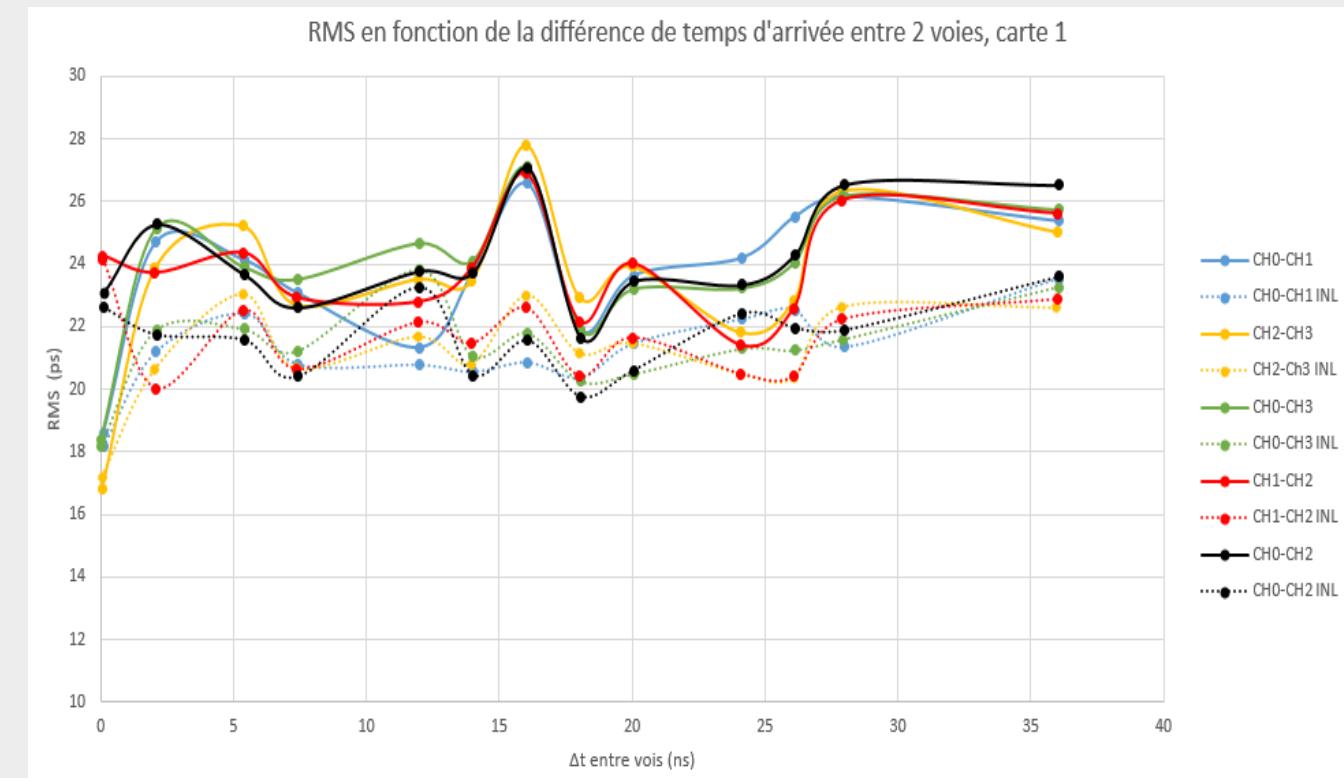


Histogramme de la mesure de Δt , avec correction d'INL. RMS \rightarrow 23,5 ps

Résolution du TDC (RMS) en fonction de Δt

- Le RMS représente l'**écart type** de Δt (ou « jitter » de la mesure).
- On observe une diminution du RMS quand on utilise la correction INL (entre 1 et 6ps)
- On s'approche de la valeur théorique (~20 ps rms)
- On voit que même sans correction la mesure de temps est déjà très bonne (max 28 ps), ce qui traduit le fait que les cellules à retards sont très proches du délai théorique (~100 ps) et très stables.

$$\sigma(RMS) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}}$$



RMS de la différence de temps en fonction de Δt avec et sans correction d'INL

Conclusion

- J'ai travaillé pendant sur la caractérisation du circuit TEPIC, ce qui m'a permis de comprendre une chaîne électronique complète : de l'étage de pré-amplification, à la mesure de temps et l'acquisition de données.
- Les performances du TDC de TEPLIC sont excellentes: entre 18 – 24 ps rms sur la mesure de différence de temps.
- Ce TDC a également été implémenté en 130 nm dans un autre ASIC, appelé DiamASIC (projet R&T transverse IN2P3) dédié à la lecture de détecteurs diamants. Un circuit intégrant l'ensemble de la chaîne : amplification + discriminateur + TDC, sera prochainement soumis (en 2024)

Merci de votre attention