

Ecole Electronique Numérique IN2P3

Fréjus

Vendredi 30 novembre 2012

diverses approches du codage du temps
&
codage du temps par FPGA

David HEURTEAU (david.heurteau@u-psud.fr)

Robert SELLEM (robert.sellem@u-psud.fr)

Fédération de Recherche LUMAT (DTPI) – Orsay

01 69 15 75 66

01 69 15 32 13



Un codeur de temps est d'abord un codeur comme les autres

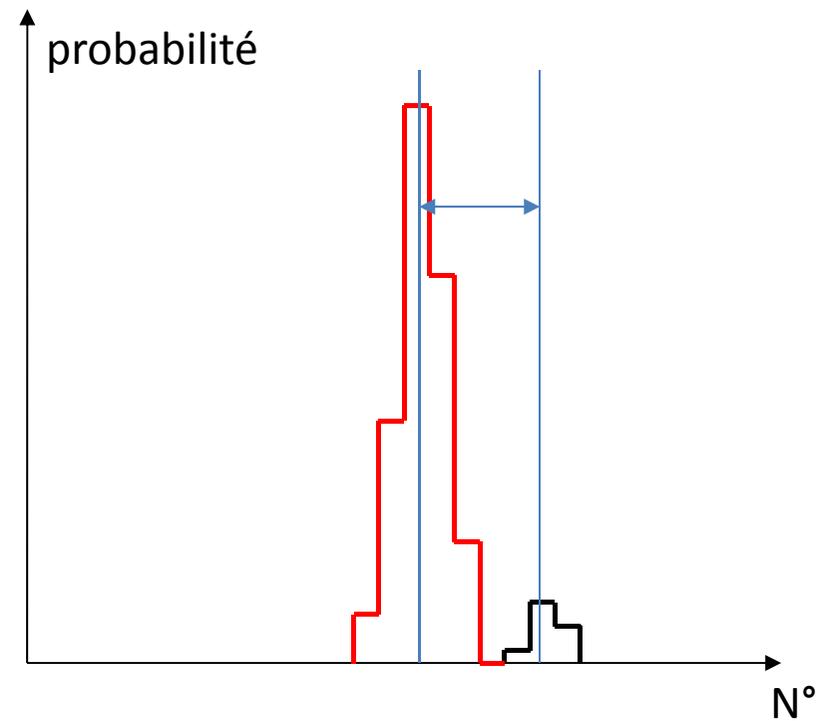
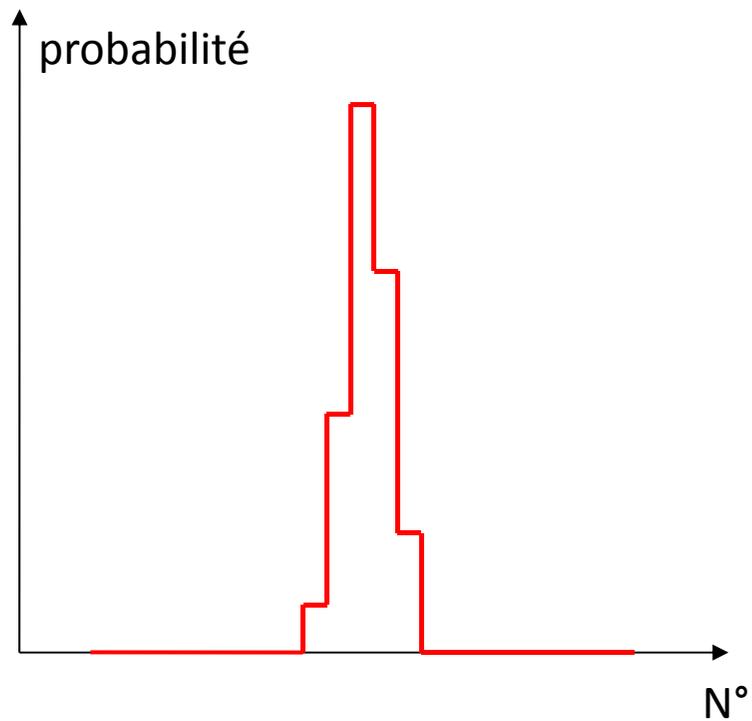
- **Résolution et pouvoir de séparation**
- **INL**
- **DNL**
- **rapidité**
- **robustesse**

mesure unique / mesure multiple

A l'IN2P3, une expérience n'est jamais constituée d'une seule mesure mais est constituée d'un nombre plus ou moins grand de micro-expériences, dont l'utilisateur fait la statistique en constituant des histogrammes traduisant des probabilités.

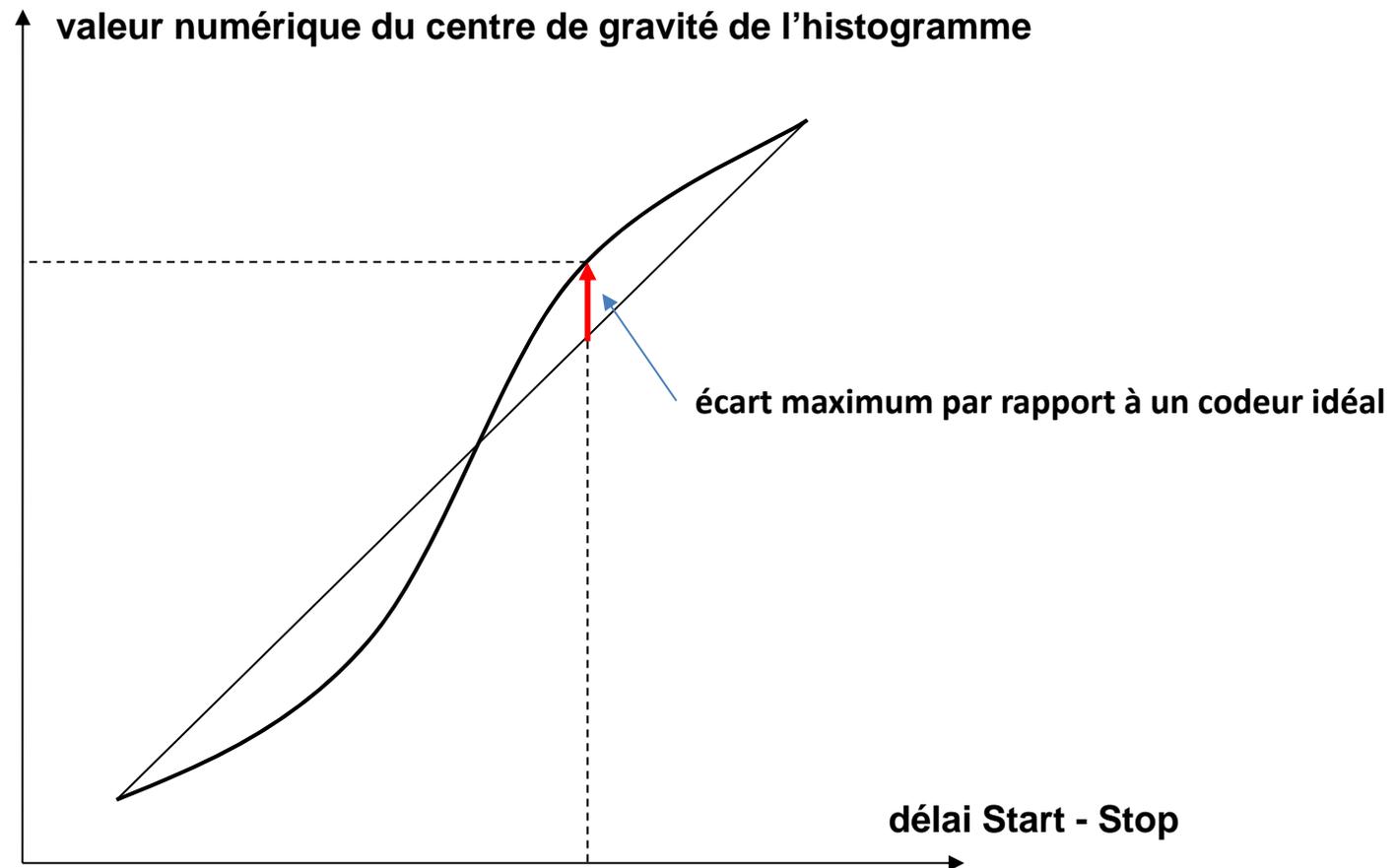
Dans la suite de l'exposé, nous caractériserons toujours un Codeur de Temps en mesure multiple, c'est-à-dire que nous raisonnerons toujours sur des histogrammes.

la Résolution (ou encore la précision du convertisseur)

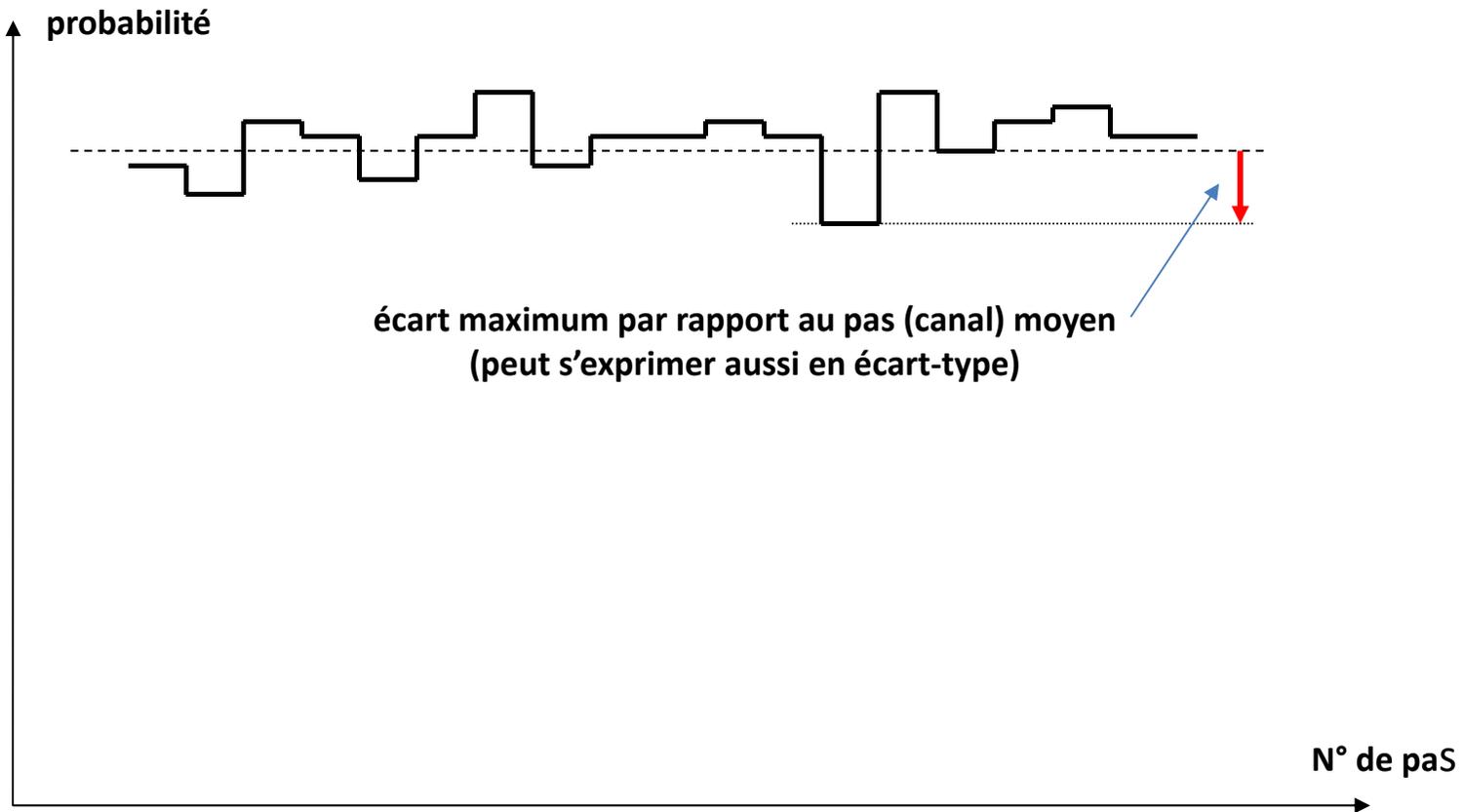


mieux : le pouvoir de séparation

I'INL (ou encore la justesse du convertisseur)



la DNL



C'est le paramètre le plus difficile à maîtriser (*valeur souhaitable : ~4%*)

➤ **la rapidité** : délai au bout duquel le codeur peut coder à nouveau
(« double hit resolution », à ne pas confondre avec le pouvoir de résolution)
(à ne pas confondre avec le débit moyen d'acquisition des données)

➤ **la robustesse** : qualifie la sensibilité du codeur aux variations de
Température et Alimentations
notamment : nécessite-t-il des re-calibrations régulières

Référence

EMC

les 2 grandes approches du codage du temps

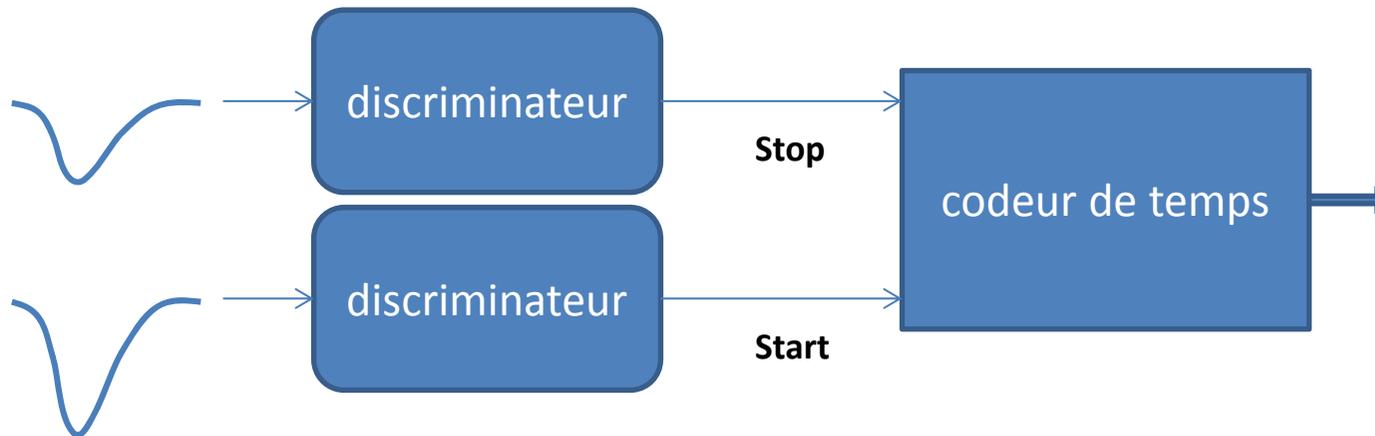
I- SANS UTILISATION DE LA FONCTION DISCRIMINATEUR

II- AVEC UTILISATION DE LA FONCTION DISCRIMINATEUR

I- SANS UTILISATION DE LA FONCTION DISCRIMINATEUR

- ✓ il s'agit du codage échantillonné du signal analogique suivi d'un traitement numérique approprié
- ✓ (très) peu de chiffres caractérisant le codage en temps
et c'est normal : les performances sont « dépendantes du signal »
- ✓ la qualification « TDC par FPGA » n'aide pas à la compréhension
- ✓ or il y a bien des domaines à l'IN2P3 qui utilisent une mesure de temps à partir de signaux qui ne demandent pas de reconnaissance de forme particulière

II- AVEC UTILISATION DE LA FONCTION DISCRIMINATEUR



- ✓ Le codeur est précisément caractérisé car ses performances sont indépendantes des signaux analogiques ; il est donc parfaitement prédictible
et c'est normal : on a repoussé la reconnaissance de forme sur les discriminateurs
- ✓ Appelons TDC un codeur de temps à entrées logiques

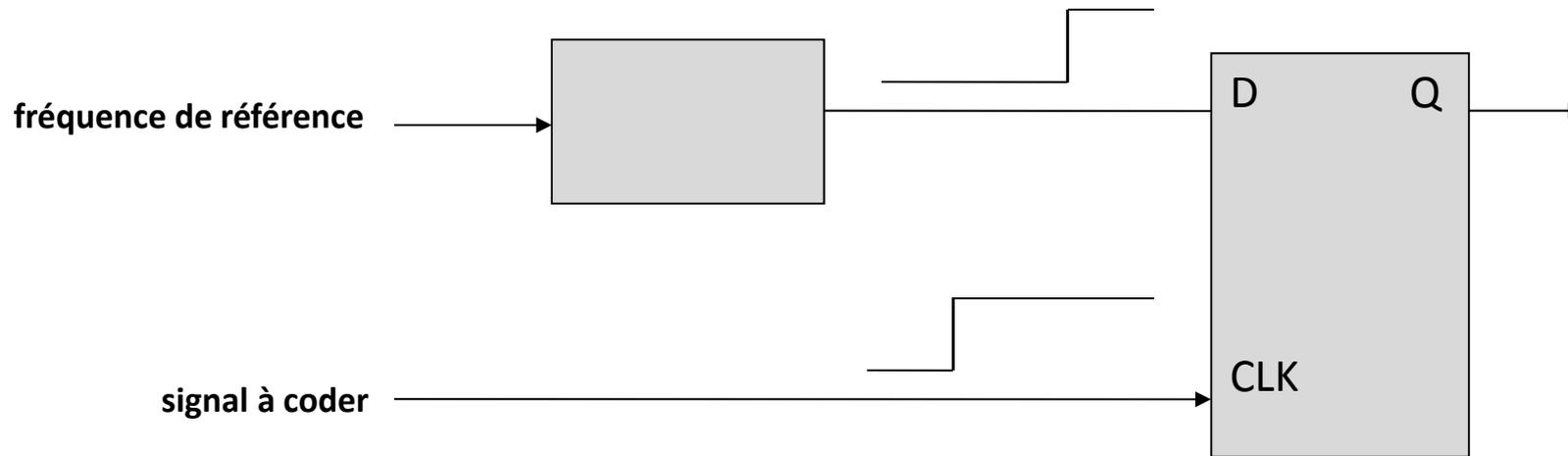
les 3 technologies de TDC

- ✓ technologie « entièrement analogique »
ne correspond pas aux besoins de l'IN2P3
- ✓ technologie « mixte »
implique le développement d'un ASIC ; à envisager avec prudence
- ✓ technologie « entièrement numérique »
ASIC ou FPGA
- ✓ Grace à ses ressources propres, pour les familles Xilinx en tout cas, les FPGA permettent d'implémenter **facilement** des TDC numériques très **performants** :
les compétences de l'électronicien suffisent
les échanges avec les expérimentateurs sont apaisés

4 mécanismes à la base d'un TDC avec une technologie numérique

- ✓ **établir une césure (-> résolution)**
- ✓ **déterminer un pas (-> DNL)**
- ✓ **développer un Interpolateur**
- ✓ **travailler en Echelle Glissante**

1^{ère} étape : établir une césure

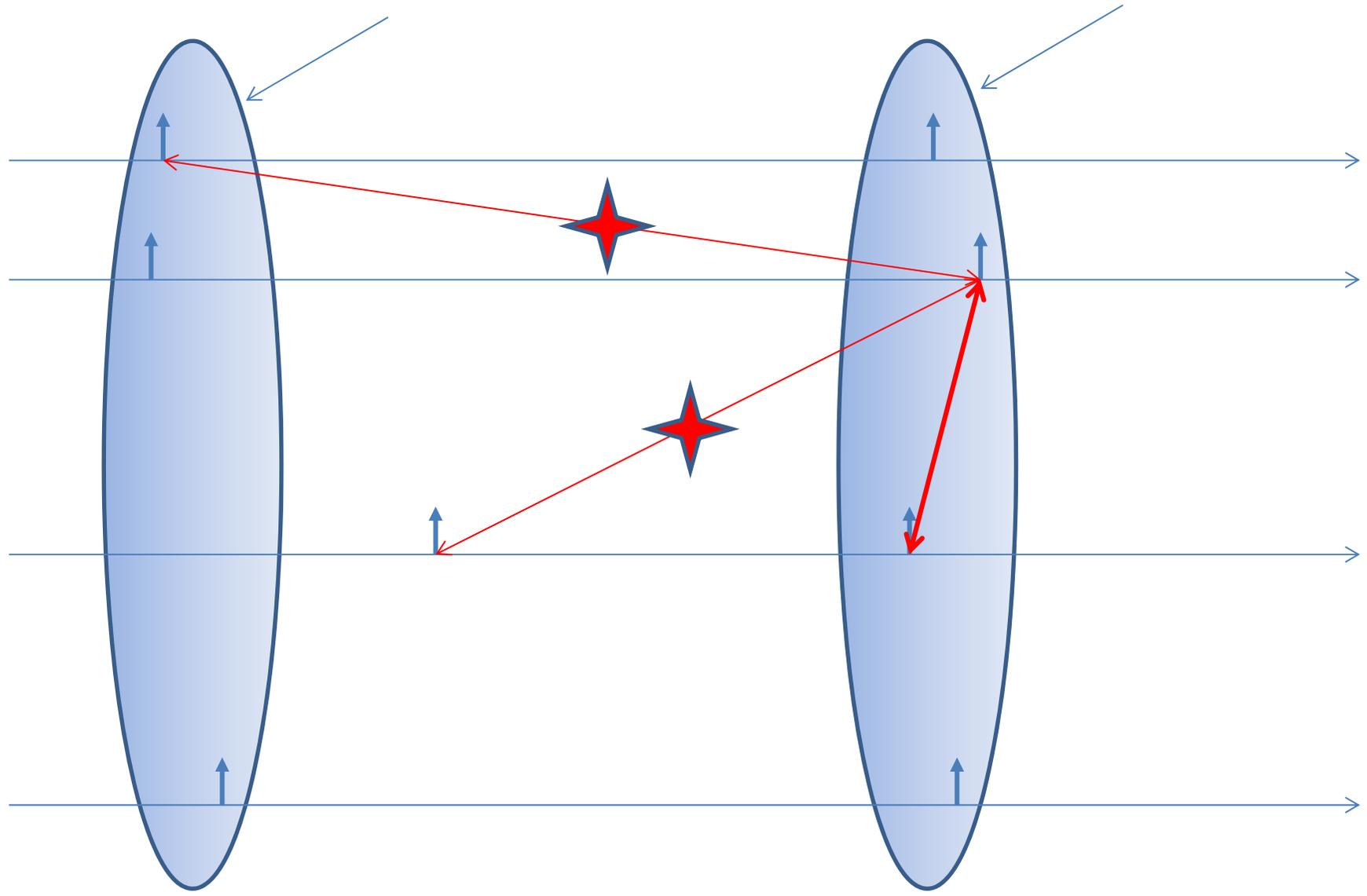


* Les signaux D et CLK peuvent être intervertis

- ✓ La Résolution du TDC est déterminée par le somme quadratique
 - du **jitter de l'oscillateur** de référence et de sa distribution
 - de la **plage de métastabilité de la bascule**
- ✓ La plage de métastabilité a une contribution insignifiante

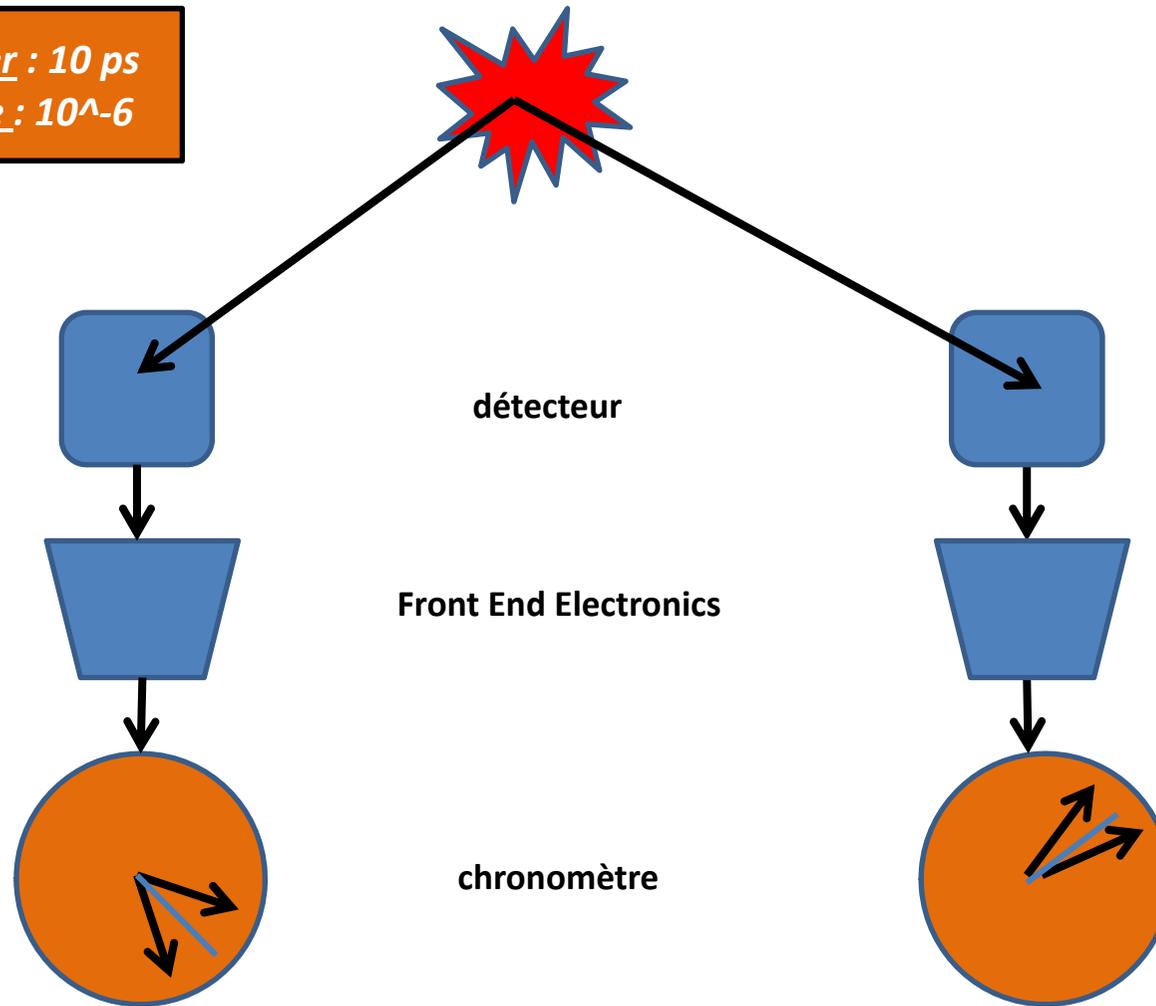
Un TDC n'est pas tout-à-fait un codeur comme les autres : le « range » est infini

la fenêtre de corrélation temporelle définissant un Evènement

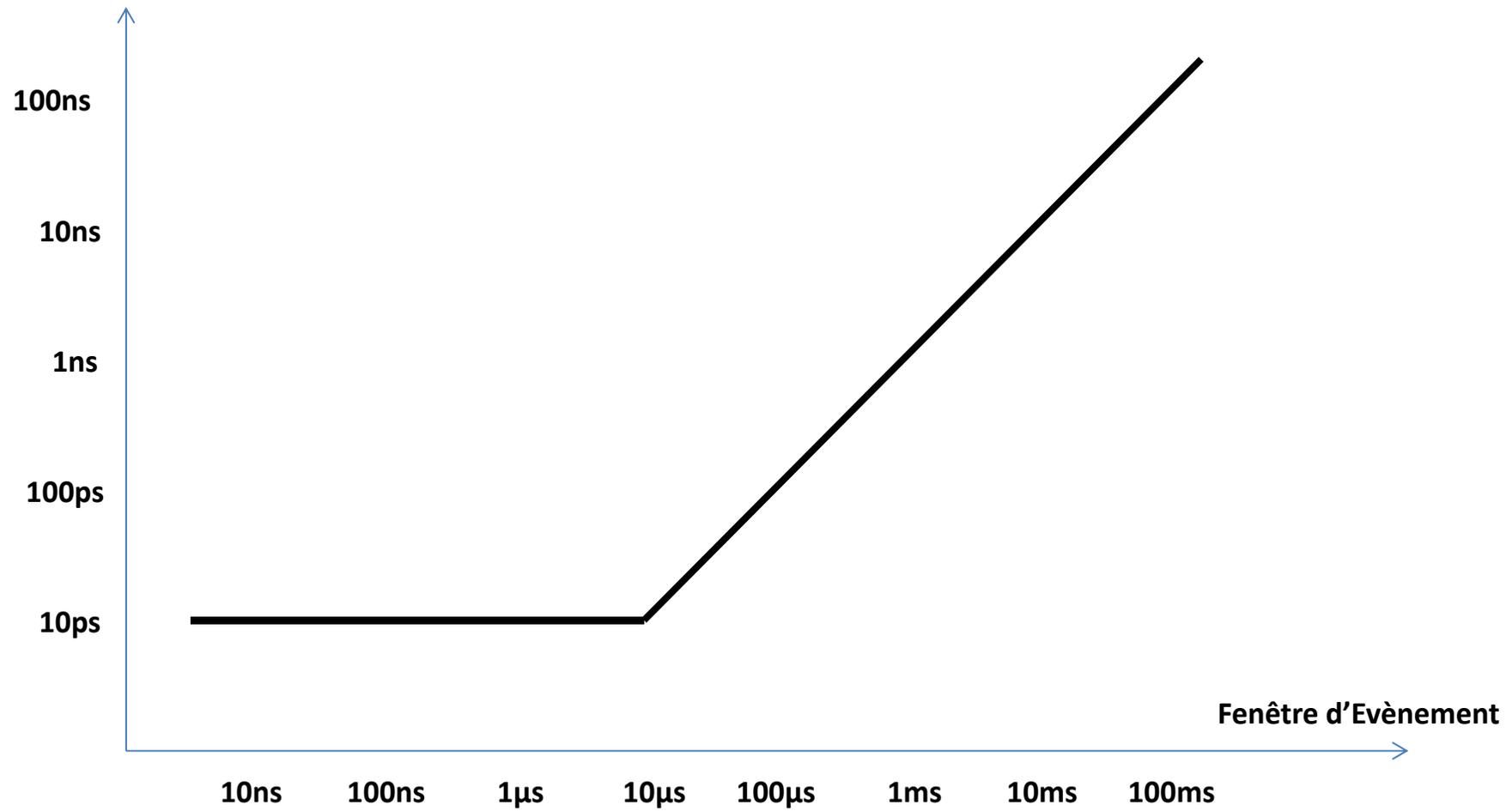


les exigences de la mesure physique 1: la Résolution

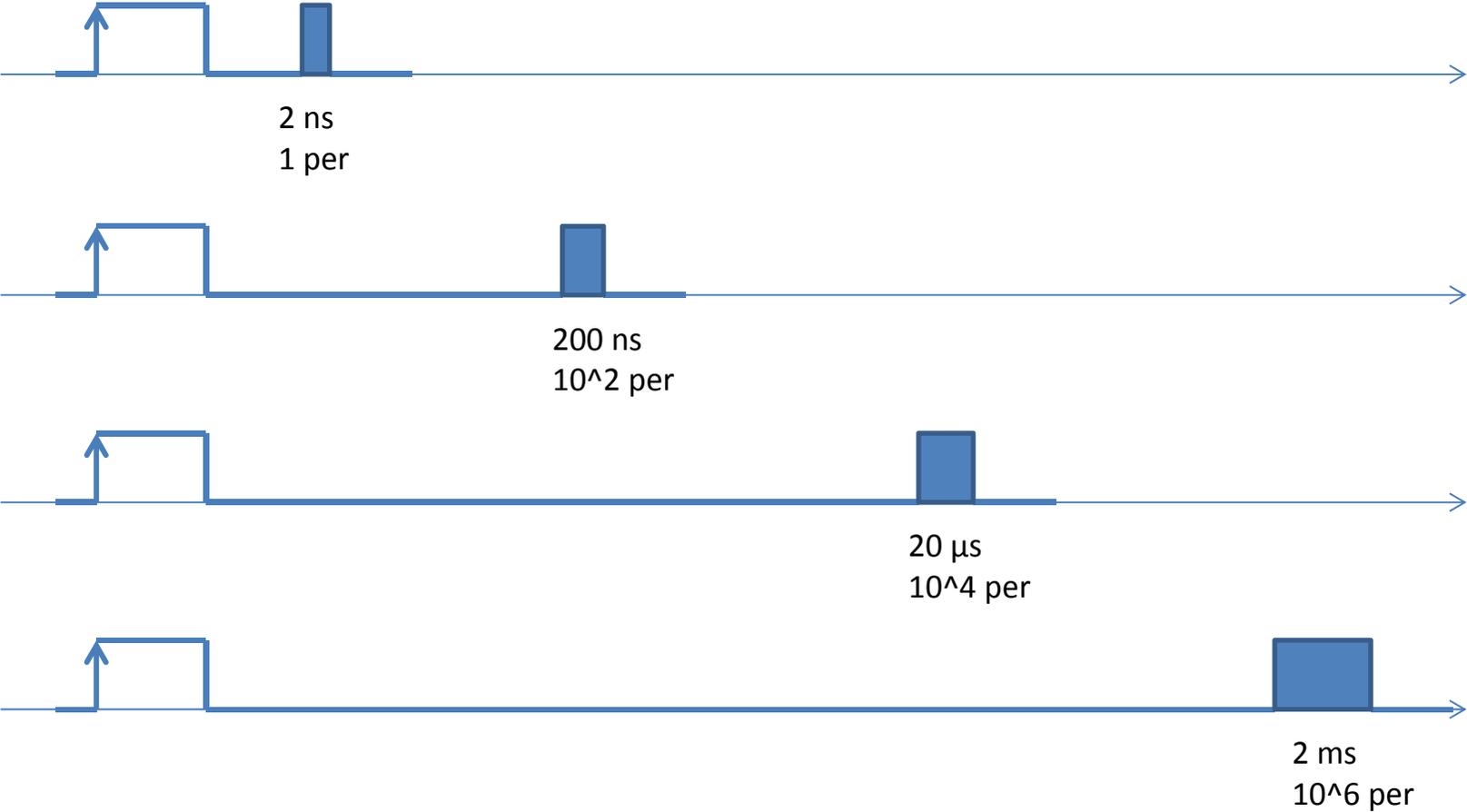
Résolution plancher : 10 ps
Résolution relative : 10^{-6}



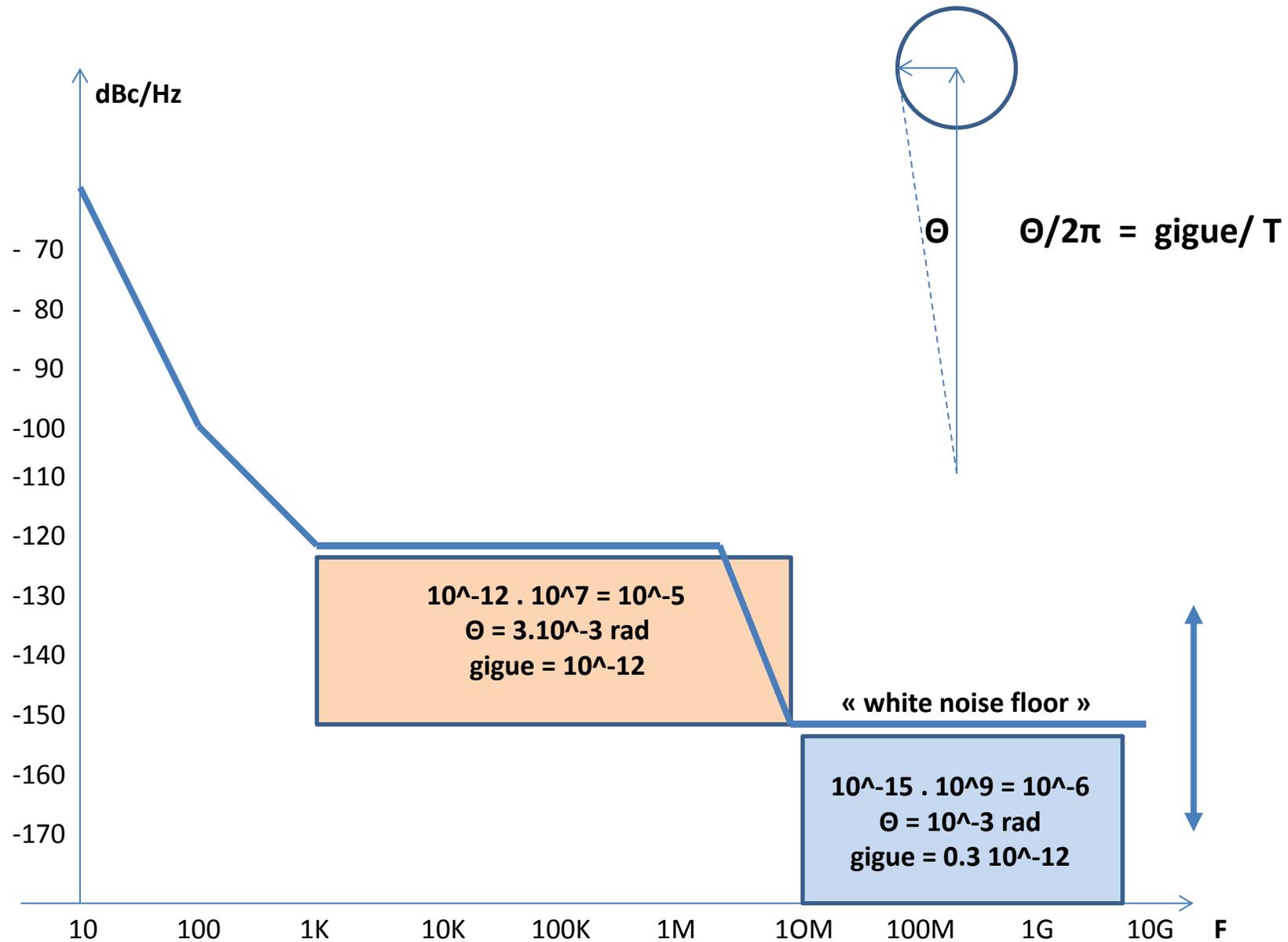
codage du temps : gabarit de la Résolution RMS souhaitée



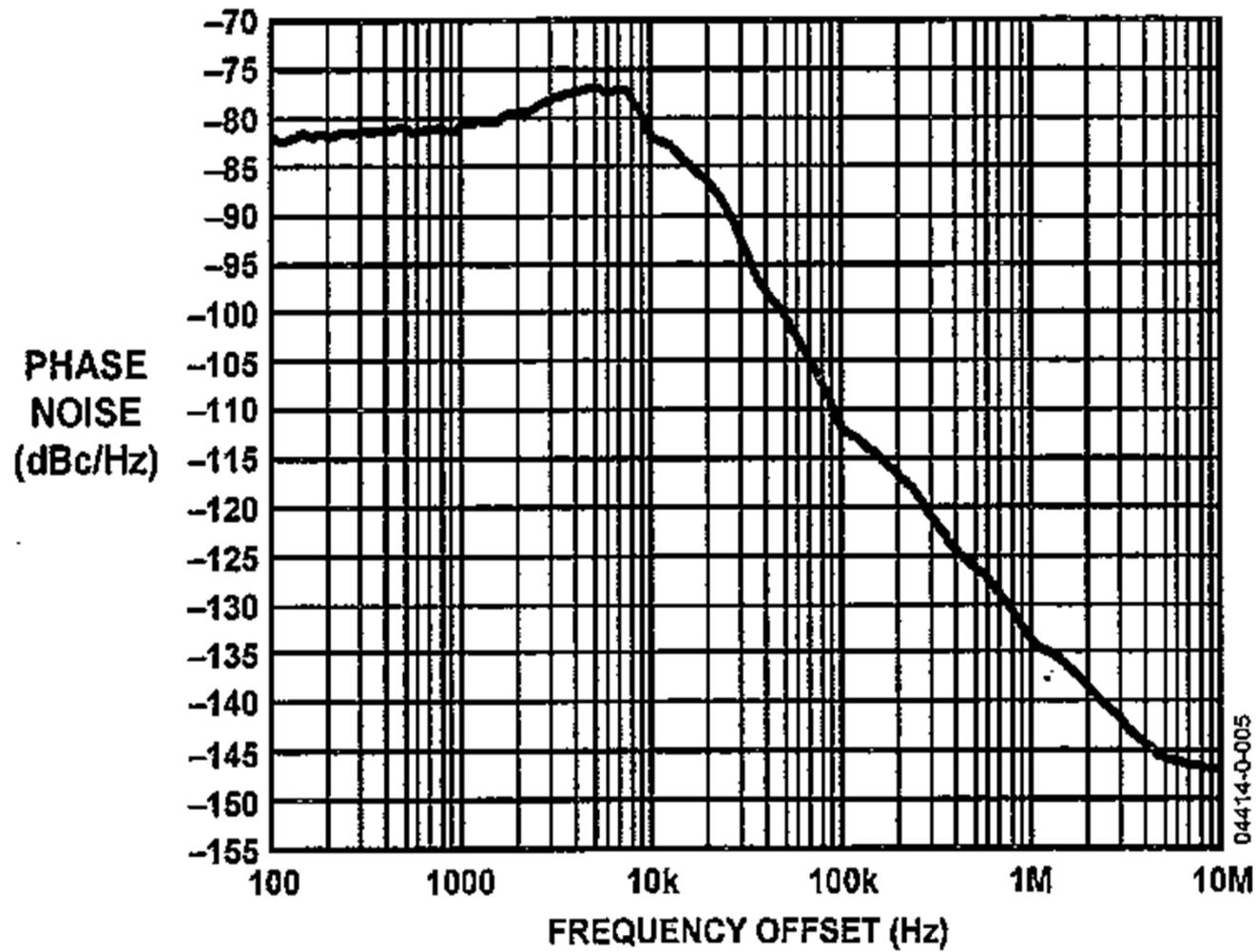
la gigue de la référence dépend du délai séparant le Start du Stop



densité spectrale de bruit de l'horloge de référence et calcul de la gigue

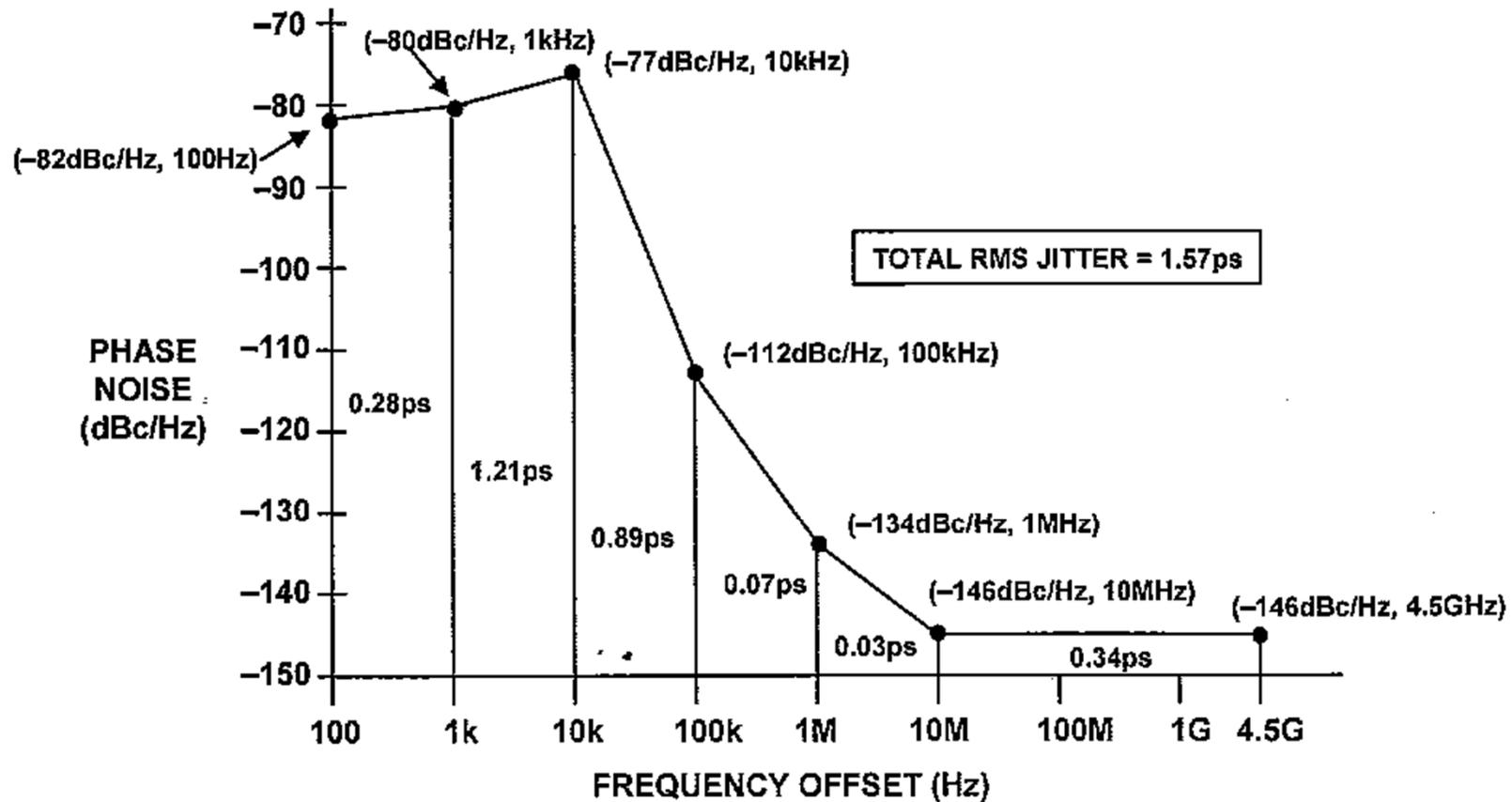


densité spectrale de bruit d'une PLL (filtre de la boucle = 10 kHz)



calcul des giges (partielles et totale) apportées par la PLL

La contribution principale est dans la bande 1kHz -100kHz (durées de 10 μ s à 1ms)

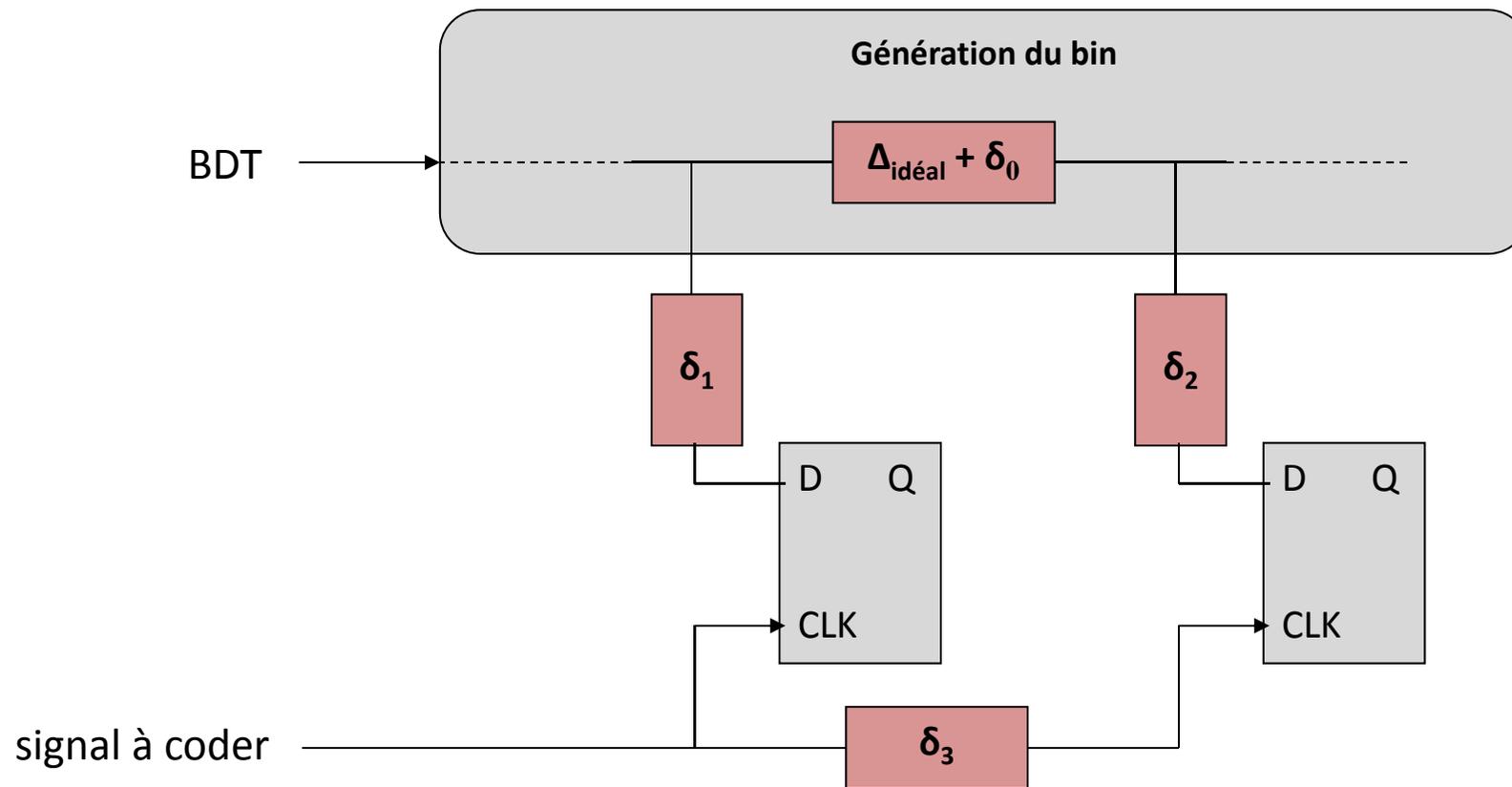


exploiter au mieux les data sheets des constructeurs

- ✓ « cycle-to-cycle jitter illustre » le bruit blanc : souvent inférieur à la ps RMS
- ✓ ajouter le bruit dans les fréquences basses (12KHz-20MHz par exemple) : souvent compris entre 1 et 4 ps RMS
- ✓ ne pas tenir compte des « deterministic jitters »
- ✓ attention : les jitters sont parfois donnés « à 14 sigma »

En conclusion, ce ne sont pas les générateurs d'horloge qui limitent la résolution des TDC pour les résolutions qui sont souhaitées aujourd'hui.

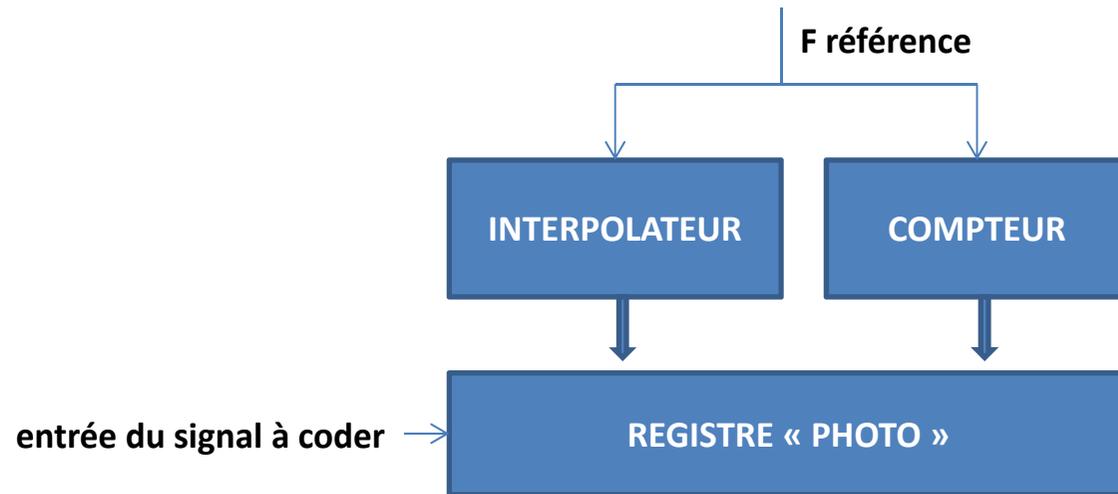
2^{ème} étape : définir un pas



$$\Delta_{\text{effectif}} = \Delta_{\text{idéal}} + (\delta_0 - \delta_3) + (\delta_2 - \delta_1)$$

la contribution principale à la DNL est due à la dispersion technologique différentielle ($\delta_2 - \delta_1$)

3^{ème} étape : nécessité d'un interpolateur

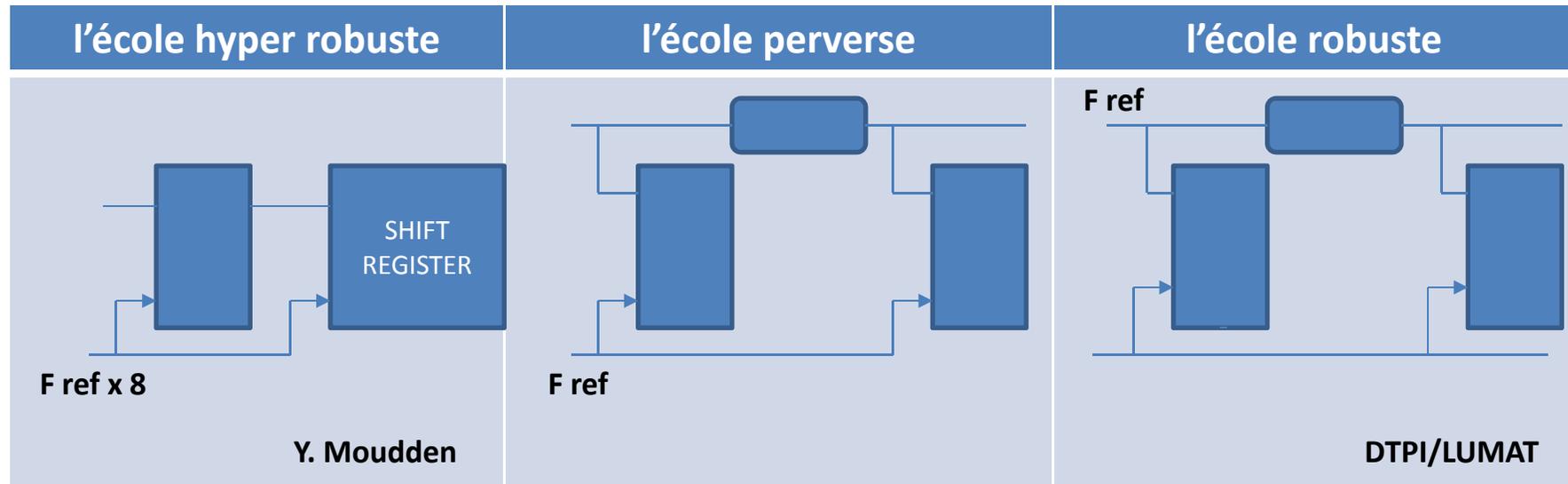


L'INTERPOLATEUR décompose la période de référence

Il détermine

- une Figure de Non Linéarité Intégrale **absolue**
- une Figure de Non Linéarité Différentielle **absolue**

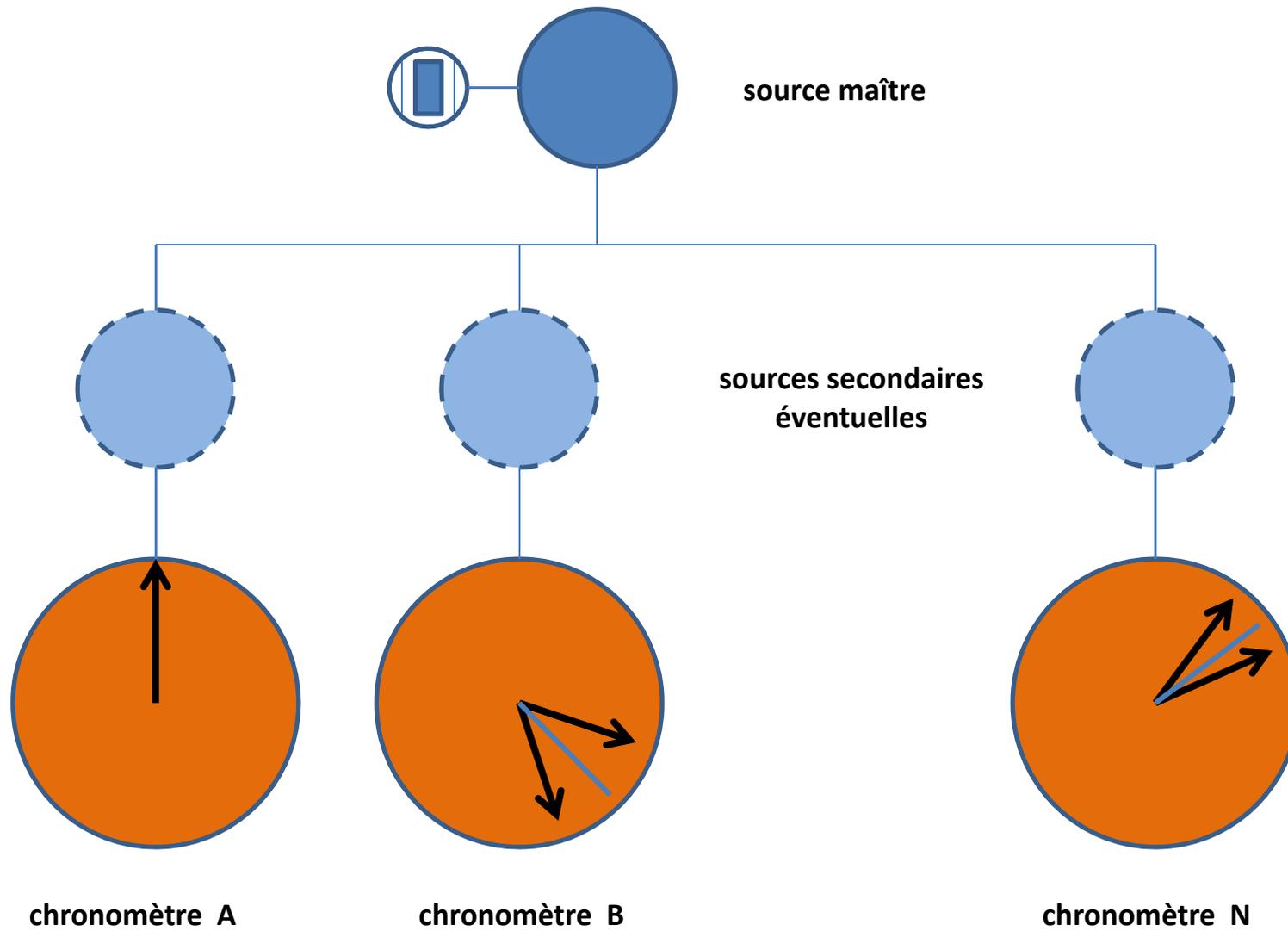
L'Interpolateur : quelques écoles



L'Interpolateur doit être régulièrement étalonné

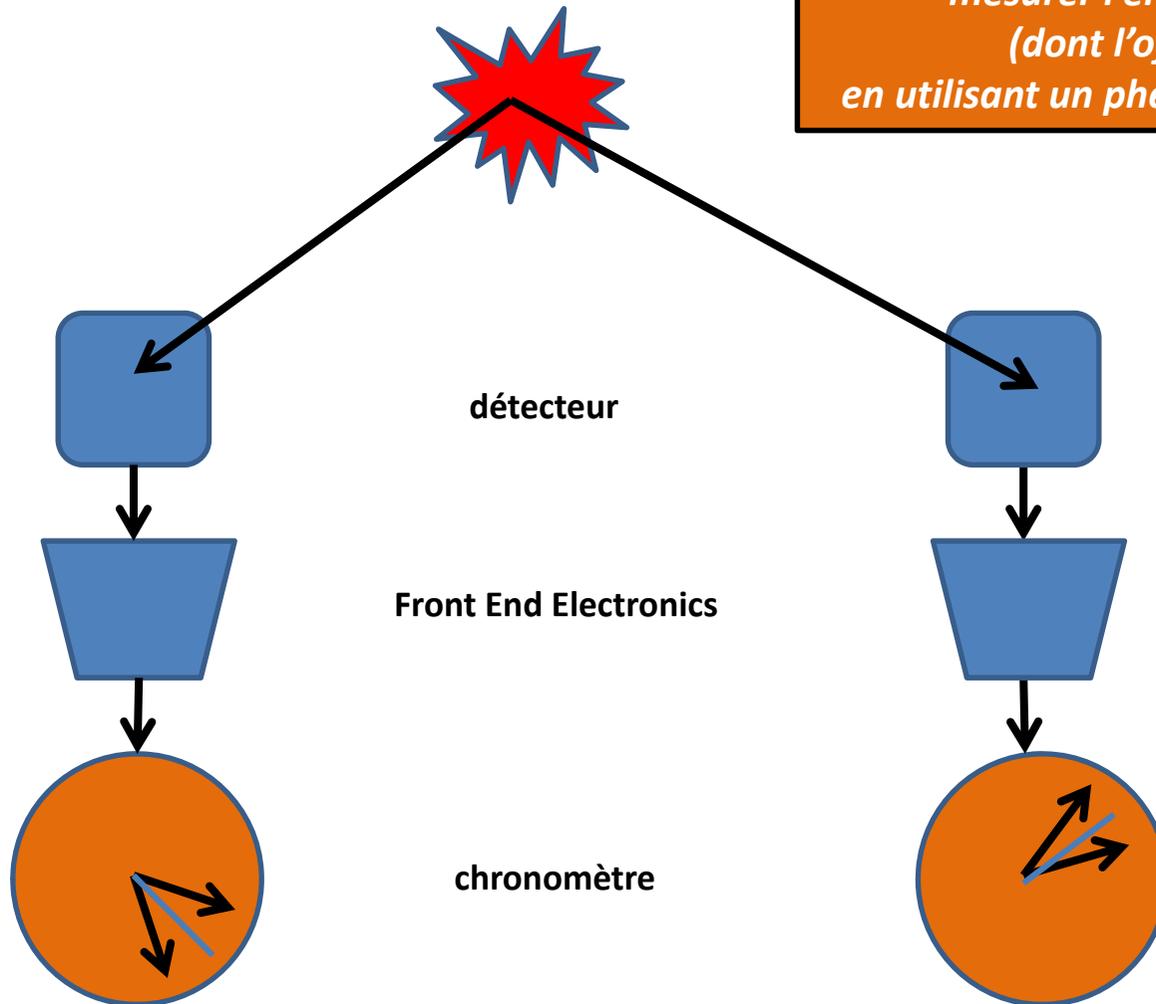
L'Interpolateur est verrouillé (Temp ; Alims ; Dérives)

Un TDC n'est pas un codeur comme les autres : chronométrie multi-voies

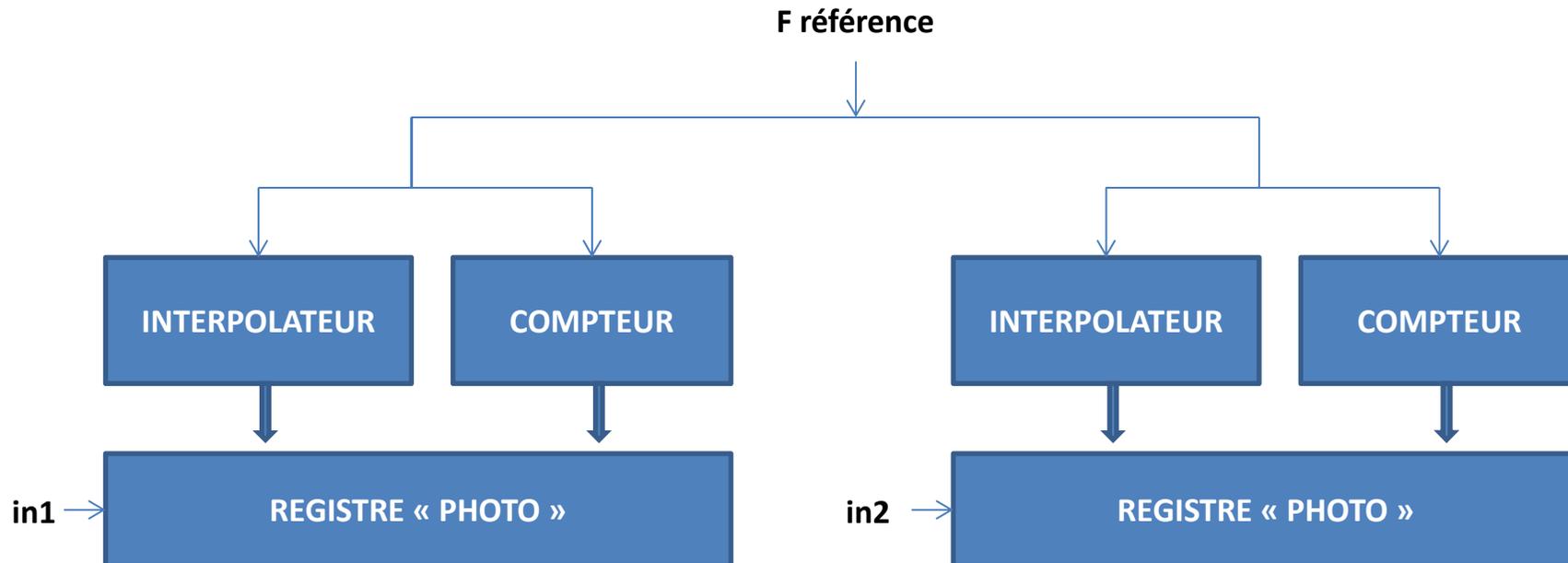


les exigences de la mesure physique 2 : mesurer l'Offset entre TDC

la solution :
mesurer l'ensemble des offsets
(dont l'offset entre TDC)
en utilisant un phénomène physique connu



de la maîtrise de l'offset quand on ne dispose pas d'un phénomène physique d'étalonnage



- *l'approche « synchronisation » par reset*
- *l'approche « synchronisation » par voie supplémentaire*

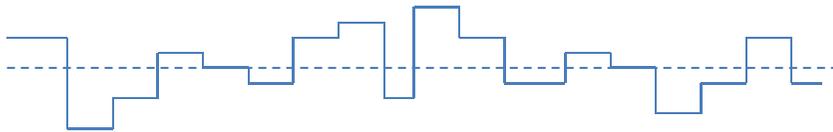
travailler en Echelle Glissante

- **Interpolateur et Compteur ne sont pas remis à zéro lors du Start**
- **Une mesure de durée nécessite 2 codages**
- **Le TDC n'est plus déterministe mais statistique**

Le codeur est déterministe

**le codeur n'est pas déterministe
(mode Sliding Scale)**

DNL_{abs}



DNL_{rel}

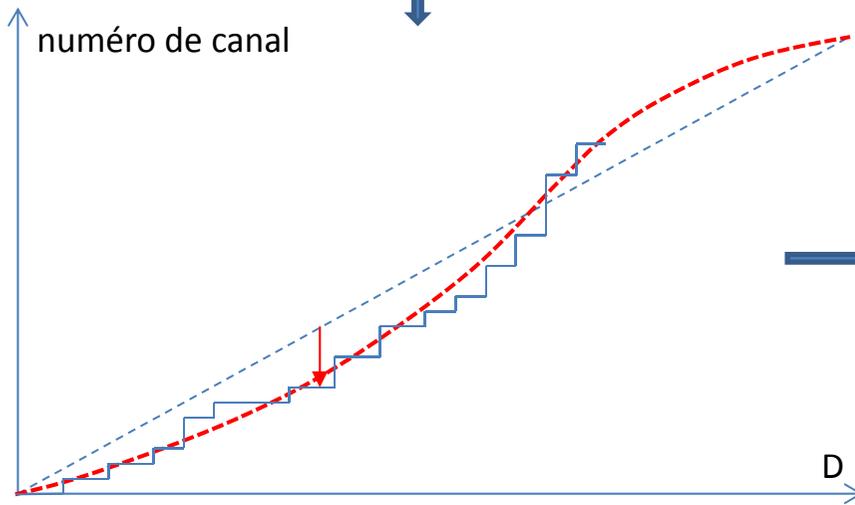


$\sigma(\text{DNL}_{abs})$

$\sigma(\text{DNL}_{rel}) < \sigma^2(\text{DNL}_{abs})$

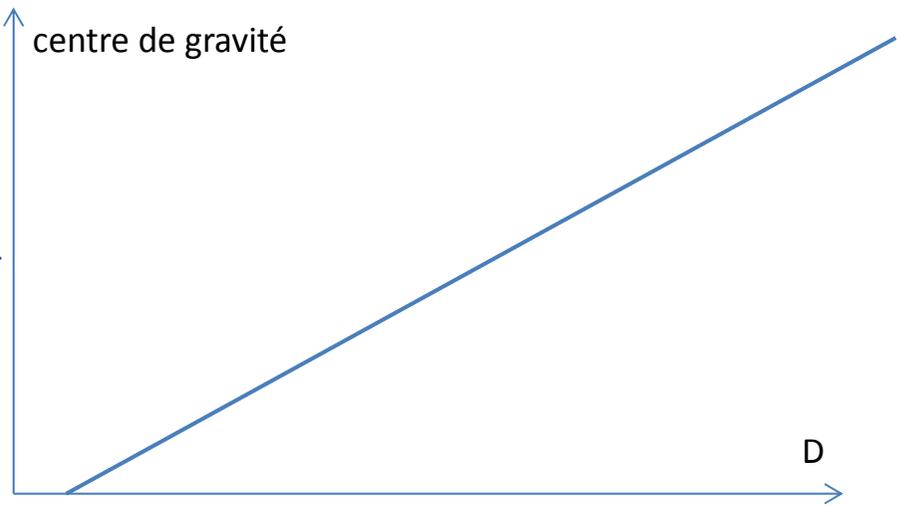
INL_{abs}

numéro de canal



INL_{rel} = 0 quel que soit D

centre de gravité



Le codeur est déterministe

**le codeur n'est pas déterministe
(mode Sliding Scale)**

résolution *abs*

résolution *rel*

nombre de coups

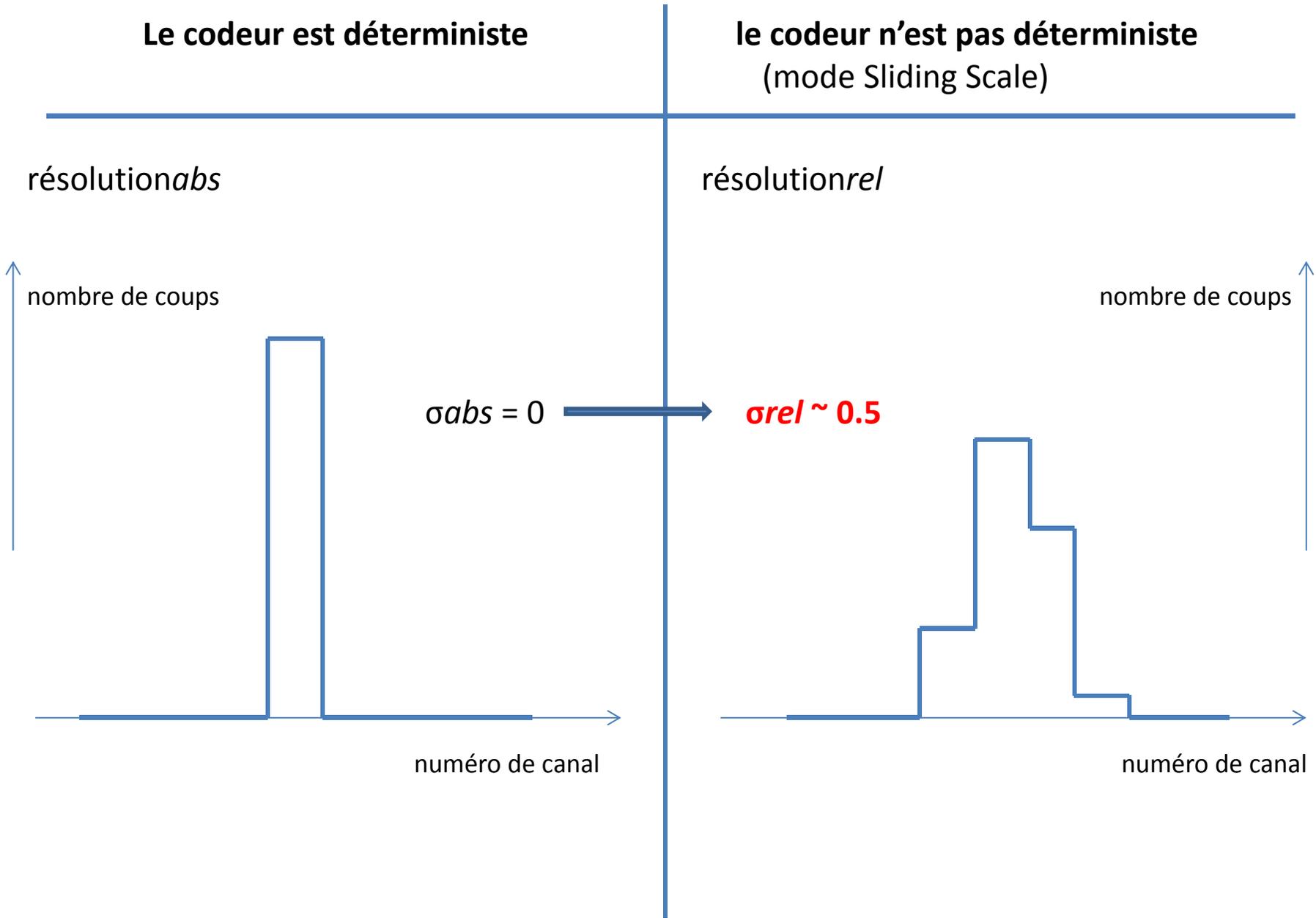
nombre de coups

$\sigma_{abs} = 0$

$\sigma_{rel} \sim 0.5$

numéro de canal

numéro de canal



Si la DNL absolue est inacceptable, que faire ? *les méthodes de correction de la DNL*

- 1/ **Correction Statistique**
très efficace ; à consommer avec modération
- 2/ **Durée Glissante (Sliding Duration)**
théoriquement parfaite
- 3/ **Multiplication des codages**
peu fondée en principe et donc peu prévisible
- 4/ **Correction Statique**
efficace mais réservé aux développeurs

- ✓ Ces méthodes peuvent être mixées
- ✓ Nous travaillons à l'automatisation de leur mise en œuvre

Les ressources de Virtex4 utilisées :

- DCMs (520 MHz)
- Global Nets
- Regional Nets
- Idelay

La méthodologie

- Maîtrise précise de la topologie (hard-macros)
- Mesure des temps de propagation élémentaires et des dispersions technologiques

Les produits

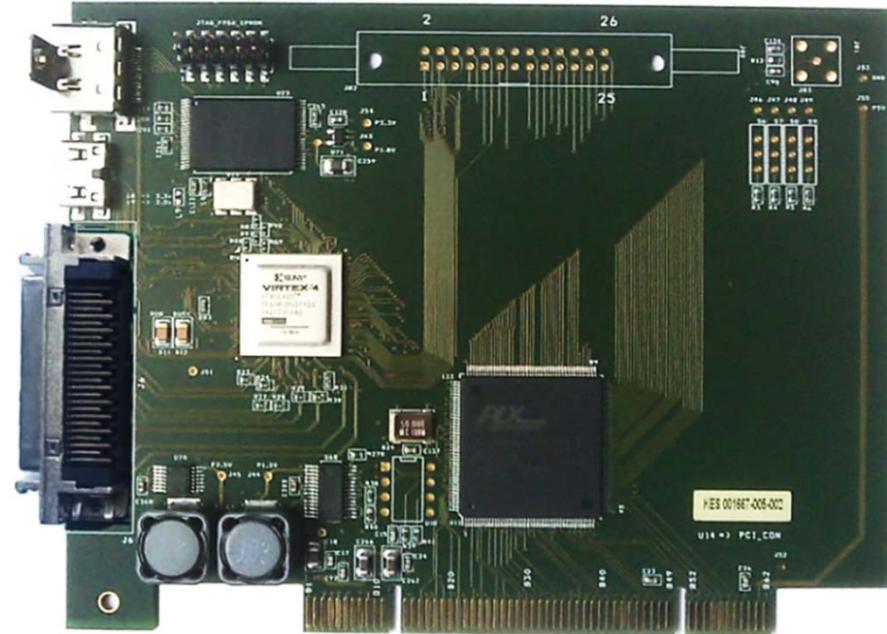
- IP (Virtex4, Virtex5)
- TDC multi-channels (18) multi-hits PCI et CPCI

Les caractéristiques

- Résolution RMS : version 60ps / version 30ps
- INL : 0
- DNL : < 4%
- Rapidité : < 2.5 ns
- diaphonie : négligeable
- Débit moyen sans pertes : 14.5 Mmots(32bits)/seconde
- consommation :
- pas d'étalonnage en ligne

Méthodes optionnelles d'amélioration de la DNL

- correction statistique
- correction Sliding Duration
- correction statique

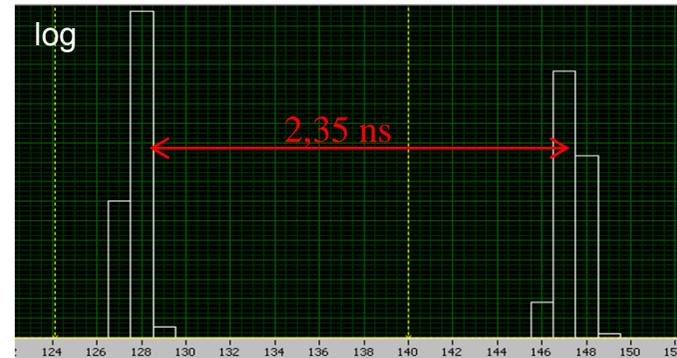


Performances obtenues sur TDC-V4

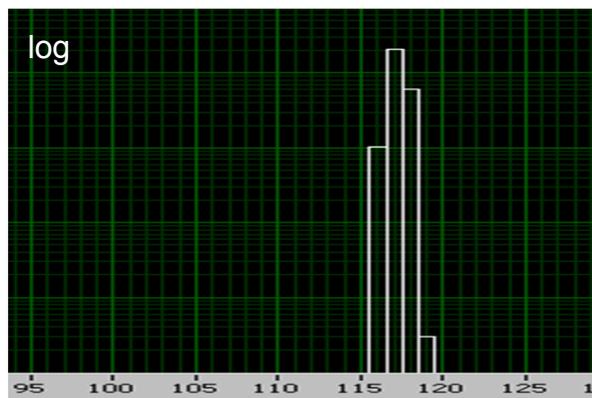
Version au pas de 120 ps :

- Plage de codage: 26 bits (8 ms)
- **INL: → 0** (avec la statistique)
- **DNL : < 2%**

➤ **Double hits resolution < 2,5 ns**

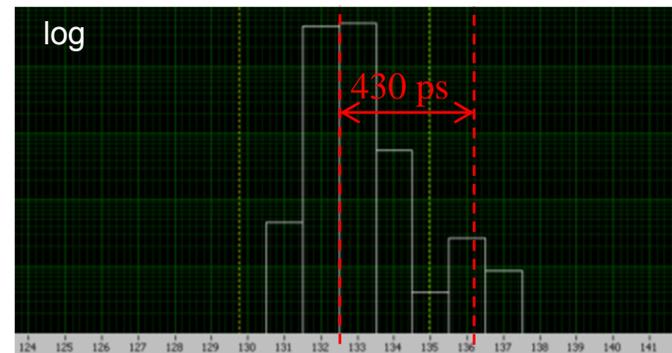


➤ **Resolution: 60 ps**

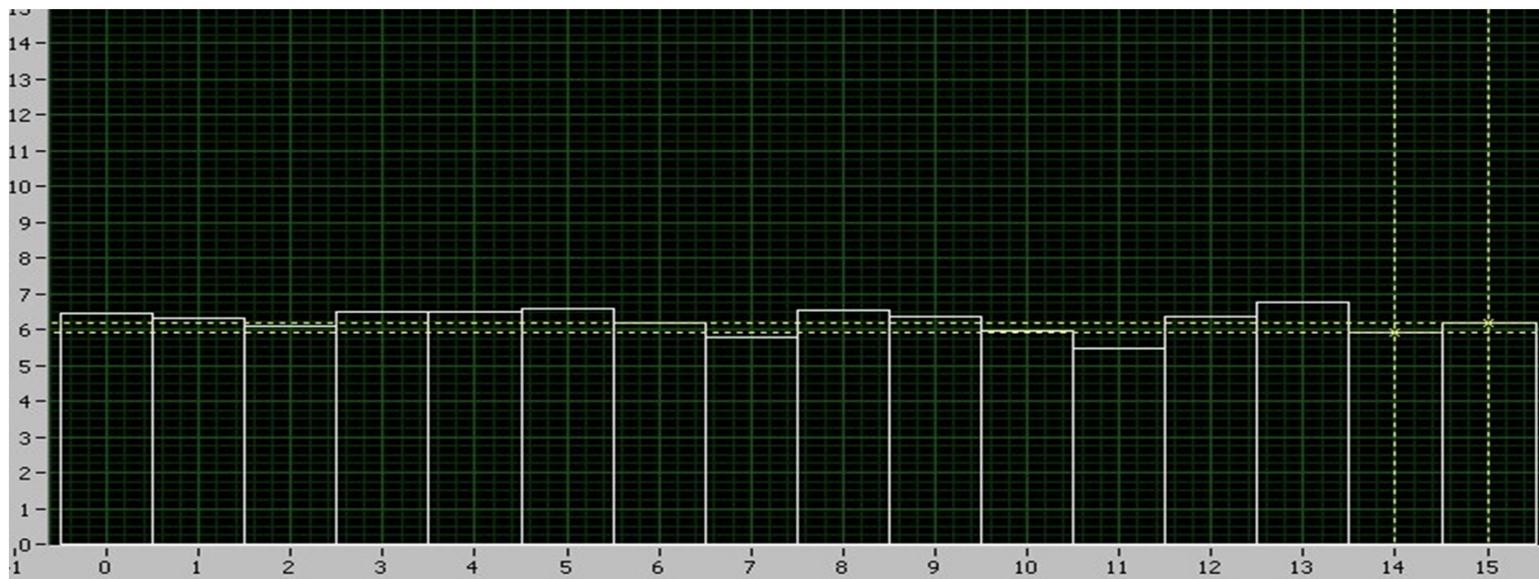
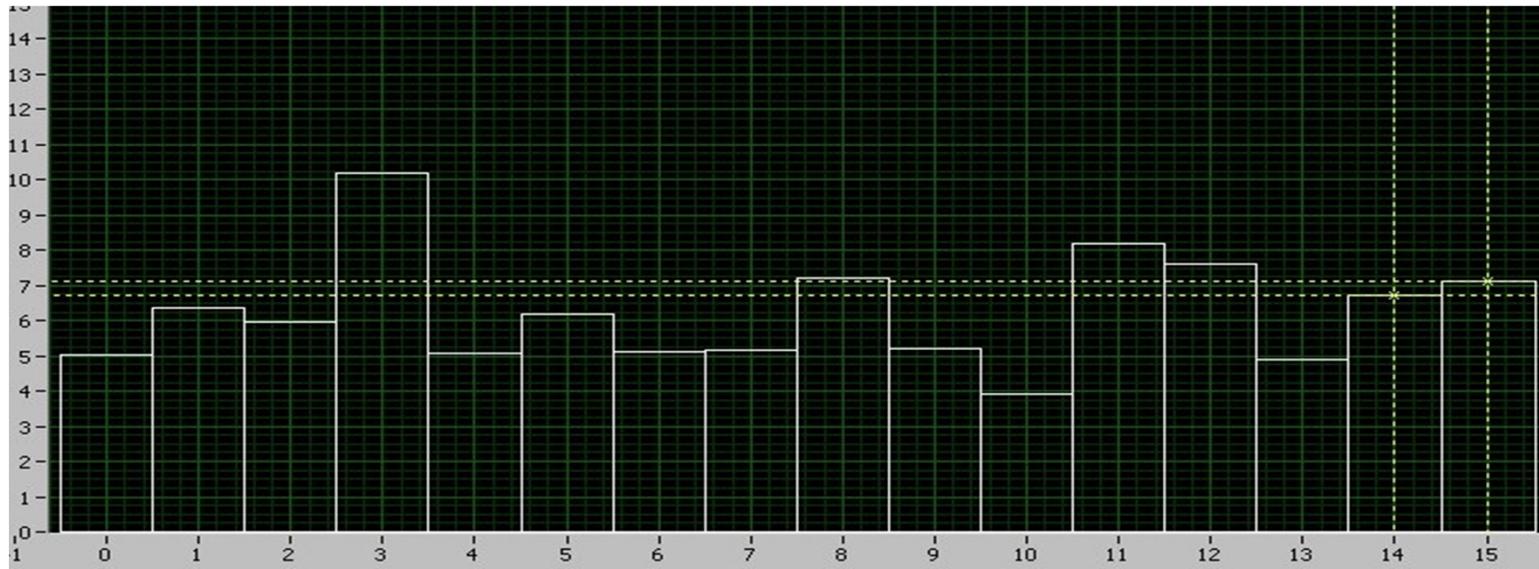


TOF $\sigma = 0,47$ pas

➤ **Pouvoir de séparation**



correction statistique



correction par **Durée Glissante** :
la DNL passe de +/- 3% à +/-1,5%

+/- 1,5% \updownarrow

