



Développement et caractérisation d'un système de traitement du signal issu de matrices CCD

pour l'expérience DAMIC-M

Lounes IDDIR

Soutenance de thèse de doctorat
17 décembre 2025

Dirigée par

Dr. Rémi CORNAT, Dr. Romain GAIOR

Défendue devant le jury constitué par

Dr. Rémi CORNAT	Directeur de thèse
Dre. Jaime DAWSON	Rapporteuse
Prof. Wilfried UHRING	Rapporteur
Dr. Giovanni CALDERINI	Examineur
Prof. Aziz BENLARBI-DELAÏ	Examineur
Dre. Giulia HULL	Examinatrice

Fil conducteur

de la présentation

- **Contexte et motivations**

Matière noire, dispositif à transfert de charges, DAMIC-M.

- **Bruits électroniques**

Bruit intrinsèque, bruit d'interférence, développements et ingénierie

- **Campagnes expérimentales**

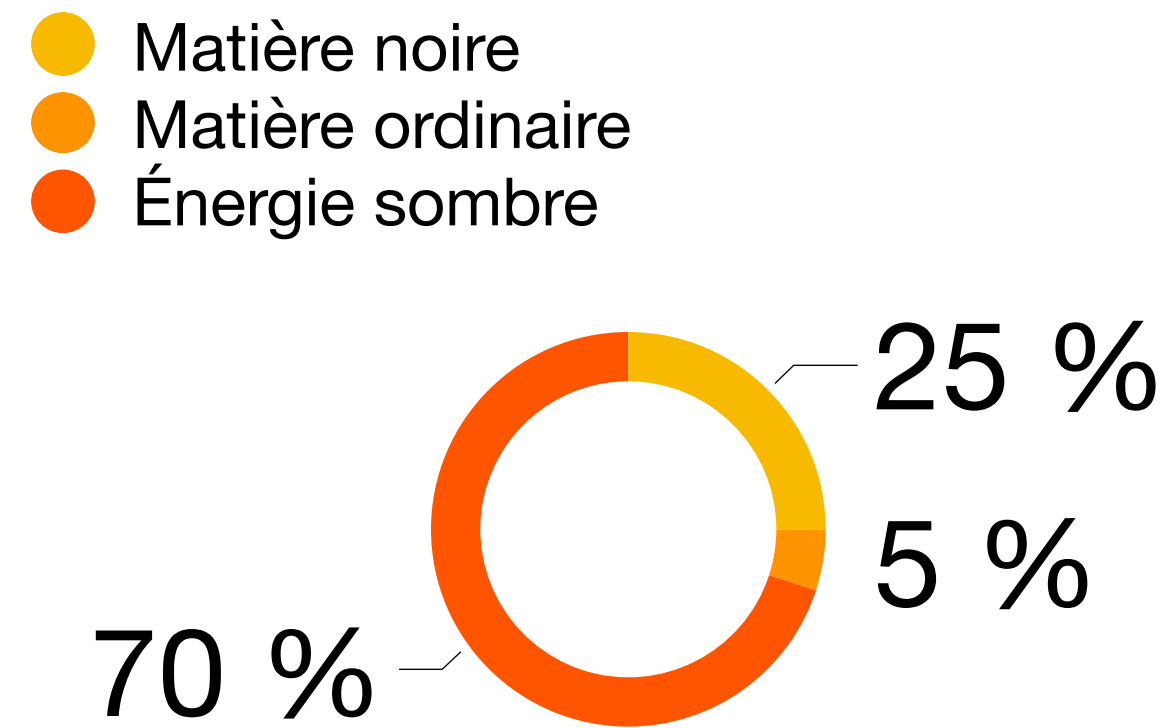
Installation de l'électronique, résultats, production

- **Conclusion et perspectives**

Contexte et motivations

Contexte

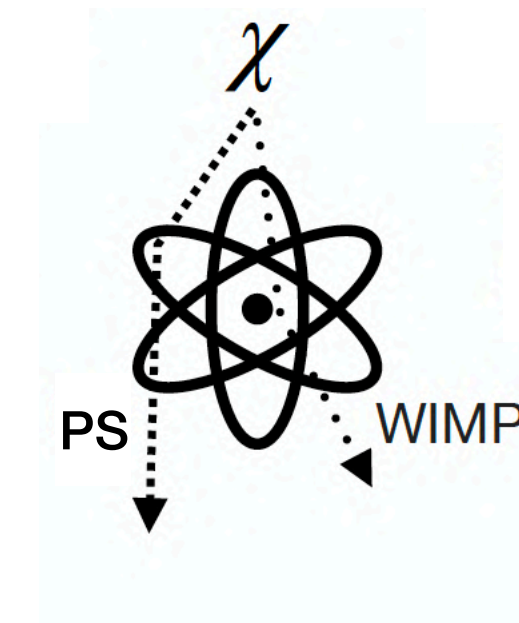
La matière noire et sa détection directe



Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs):
Particules massives à faible interaction.

Secteur sombre:

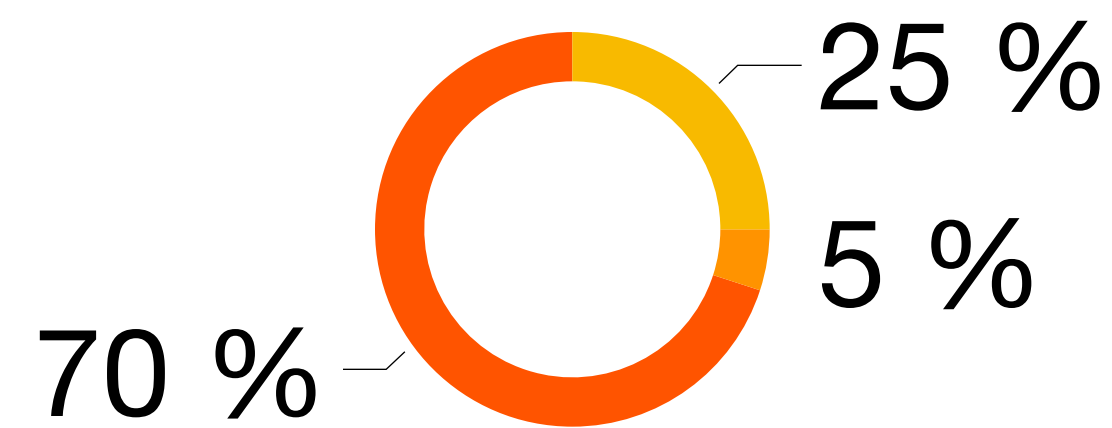
- Exemple du photon sombre.
- Copie les interactions du photon standard, de manière atténuée.



Contexte

La matière noire et sa détection directe

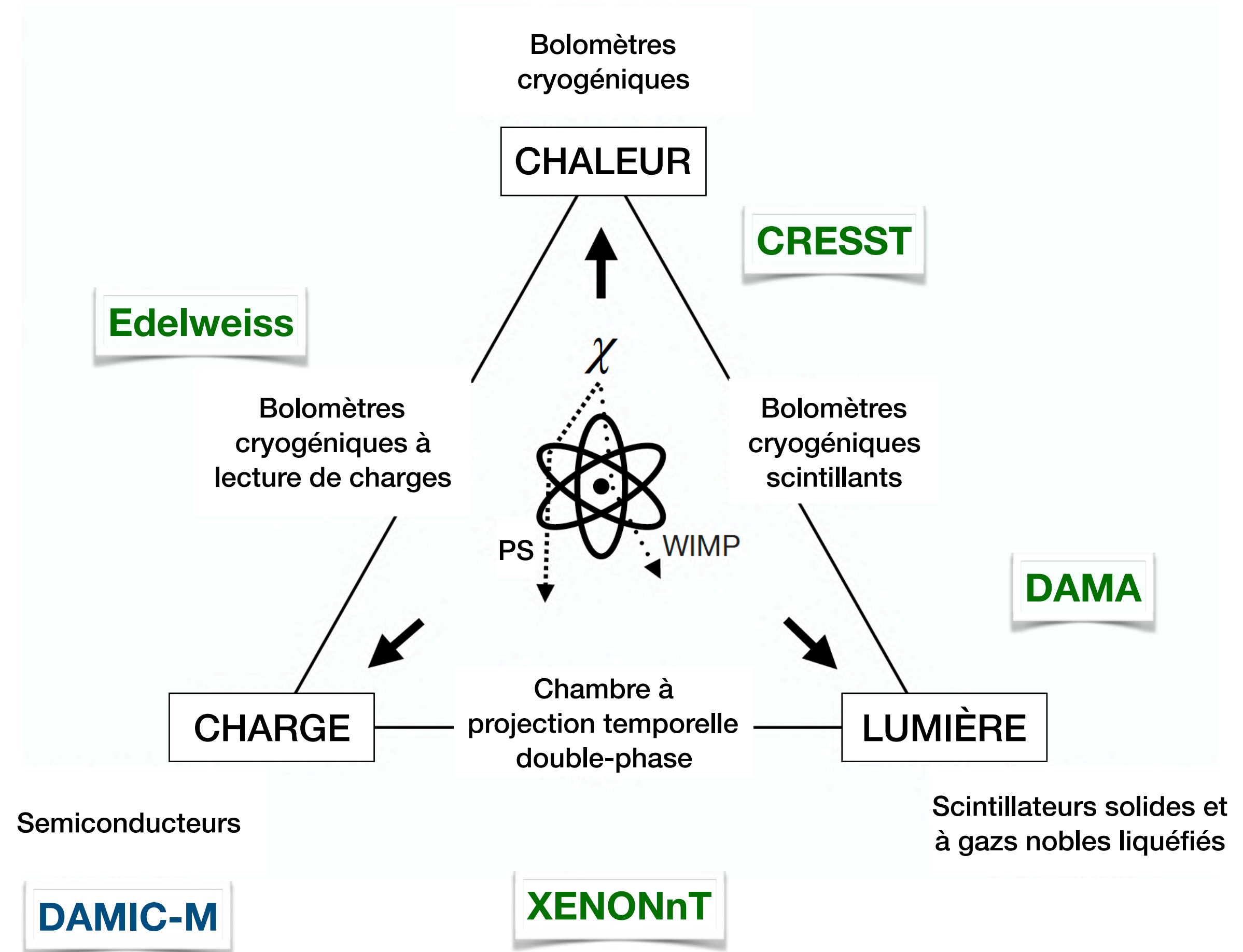
- Matière noire
- Matière ordinaire
- Énergie sombre



Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs):
Particules massives à faible interaction.

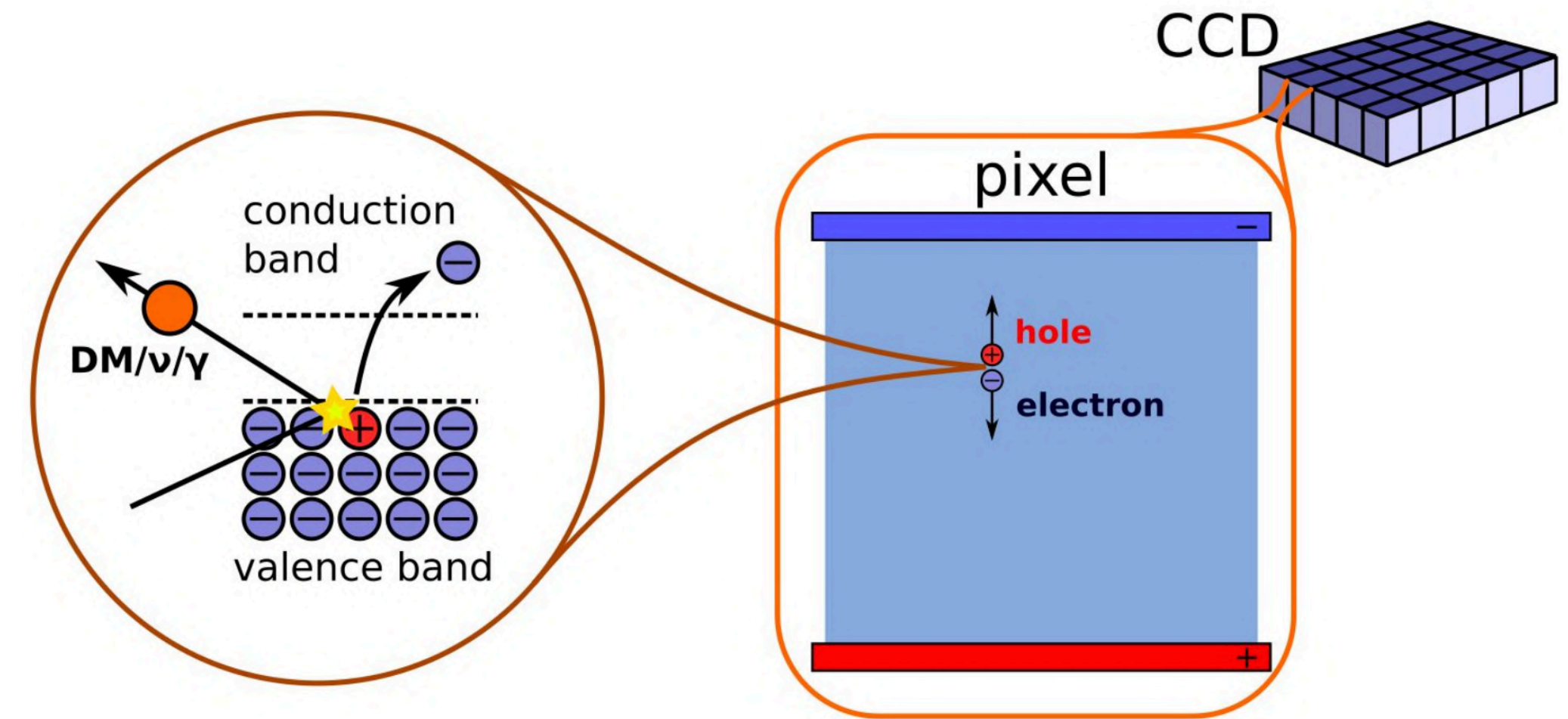
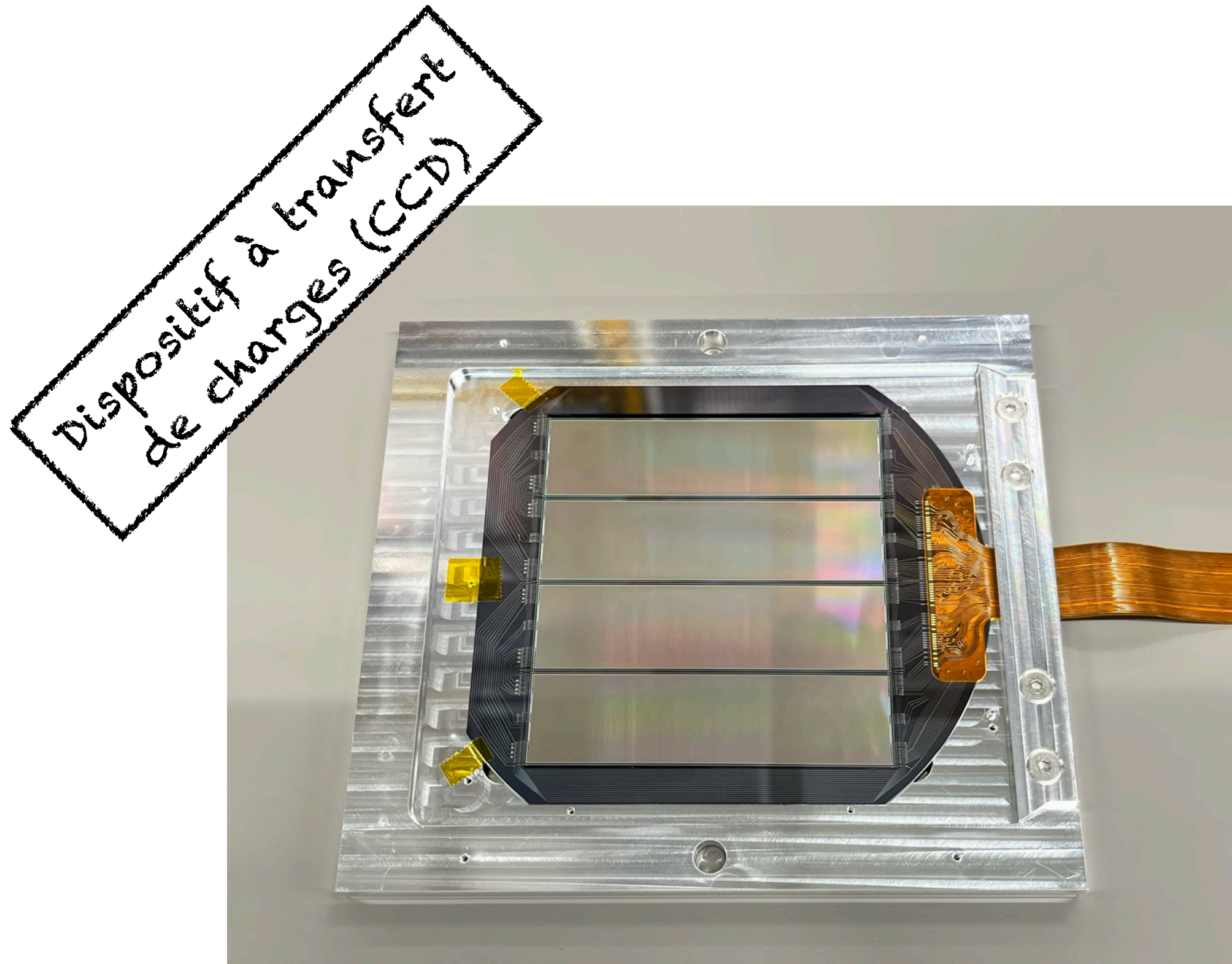
Secteur sombre:

- Exemple du photon sombre.
- Copie les interactions du photon standard, de manière atténuée.



Contexte

La matière noire et sa manifestation dans le détecteur DAMIC-M

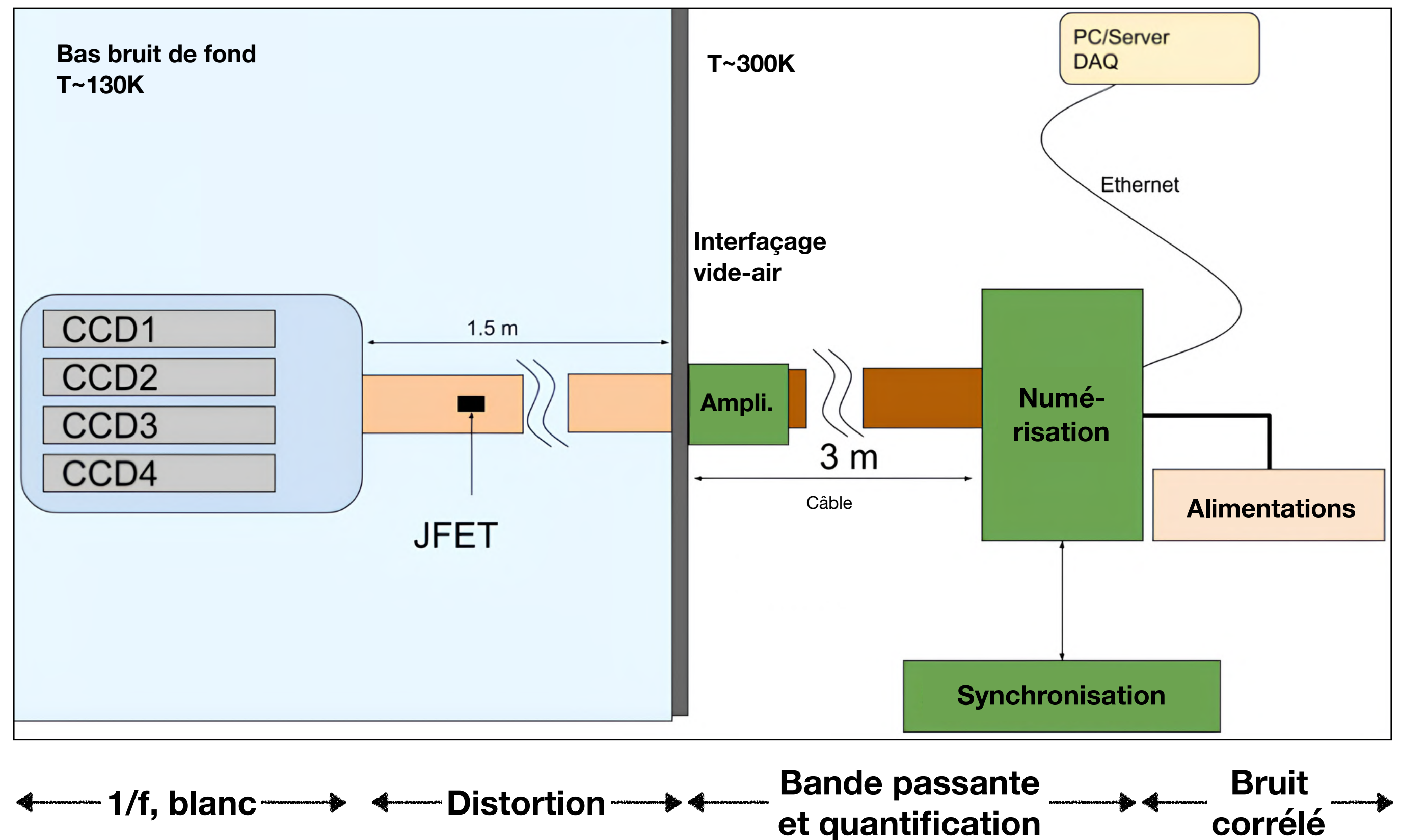


- ➔ Seuil minimal de détection de **1.12eV**
- ➔ Signal minimal à mesurer égal à **1 électron**
- ➔ Bruit de lecture **inférieur à l'électron**

Contexte

Sources de bruits électroniques

 **Bruit intrinsèque**

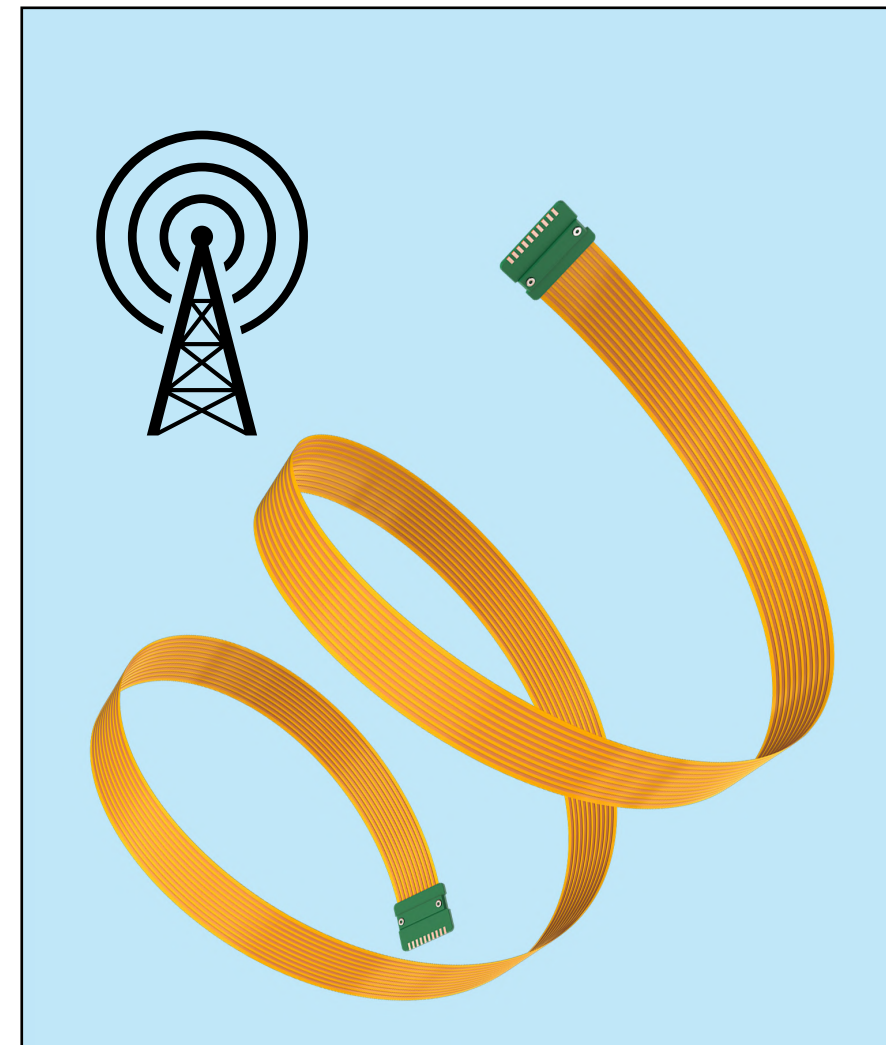


Contexte

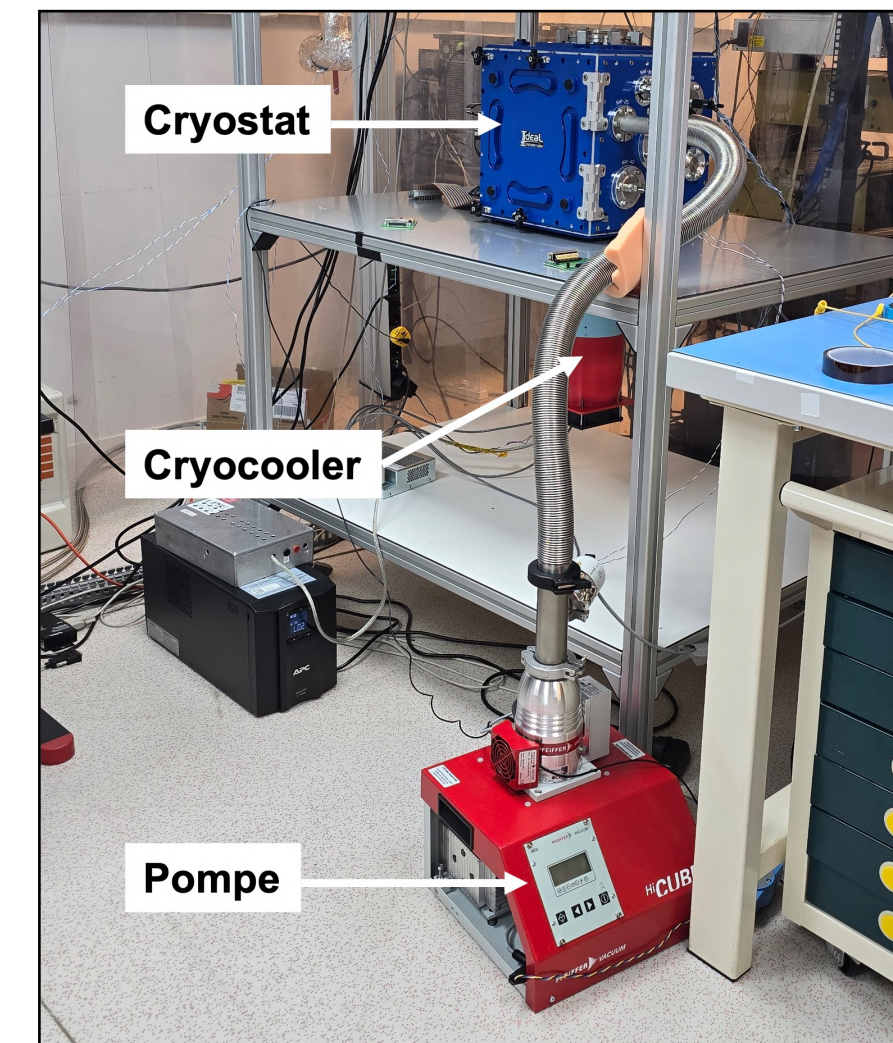
Sources de bruits électroniques



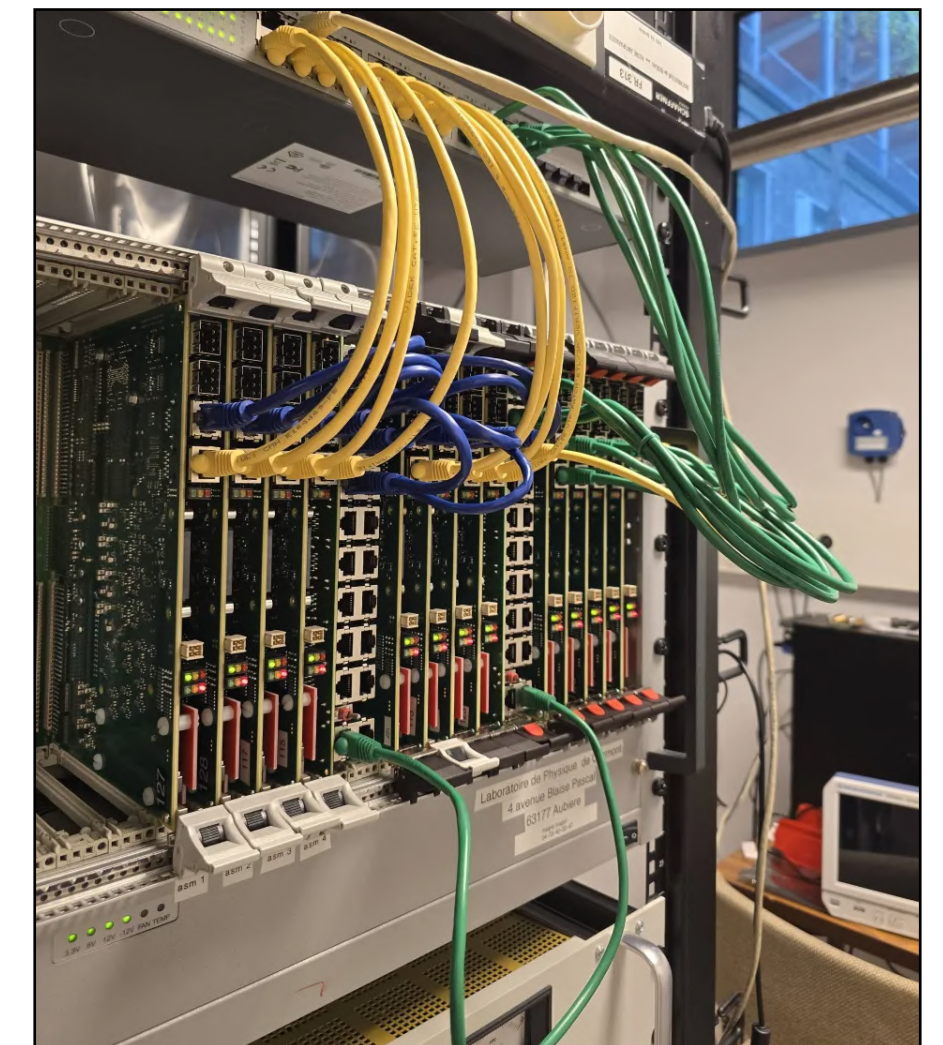
Bruit d'interférence



Interférence
électromagnétique
parasite



Microphonie

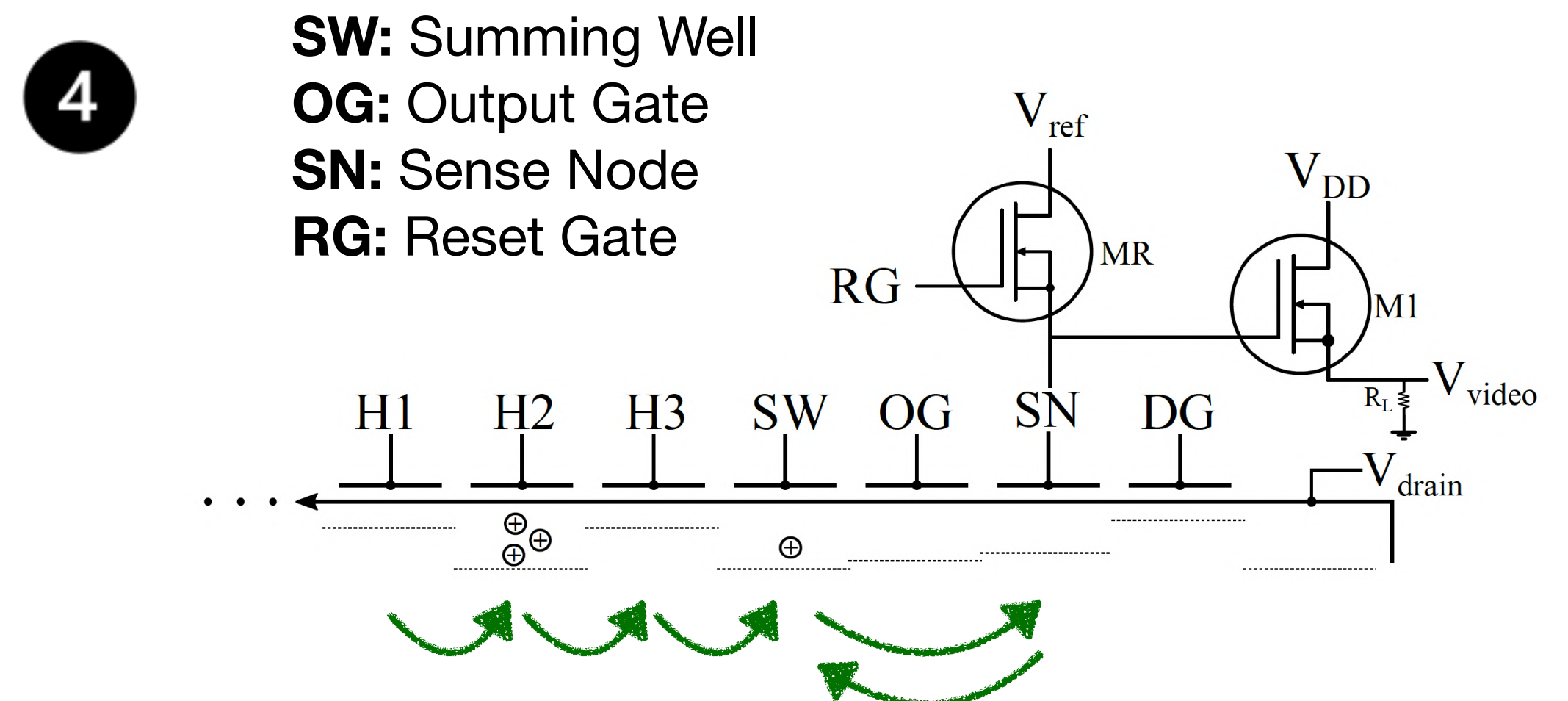
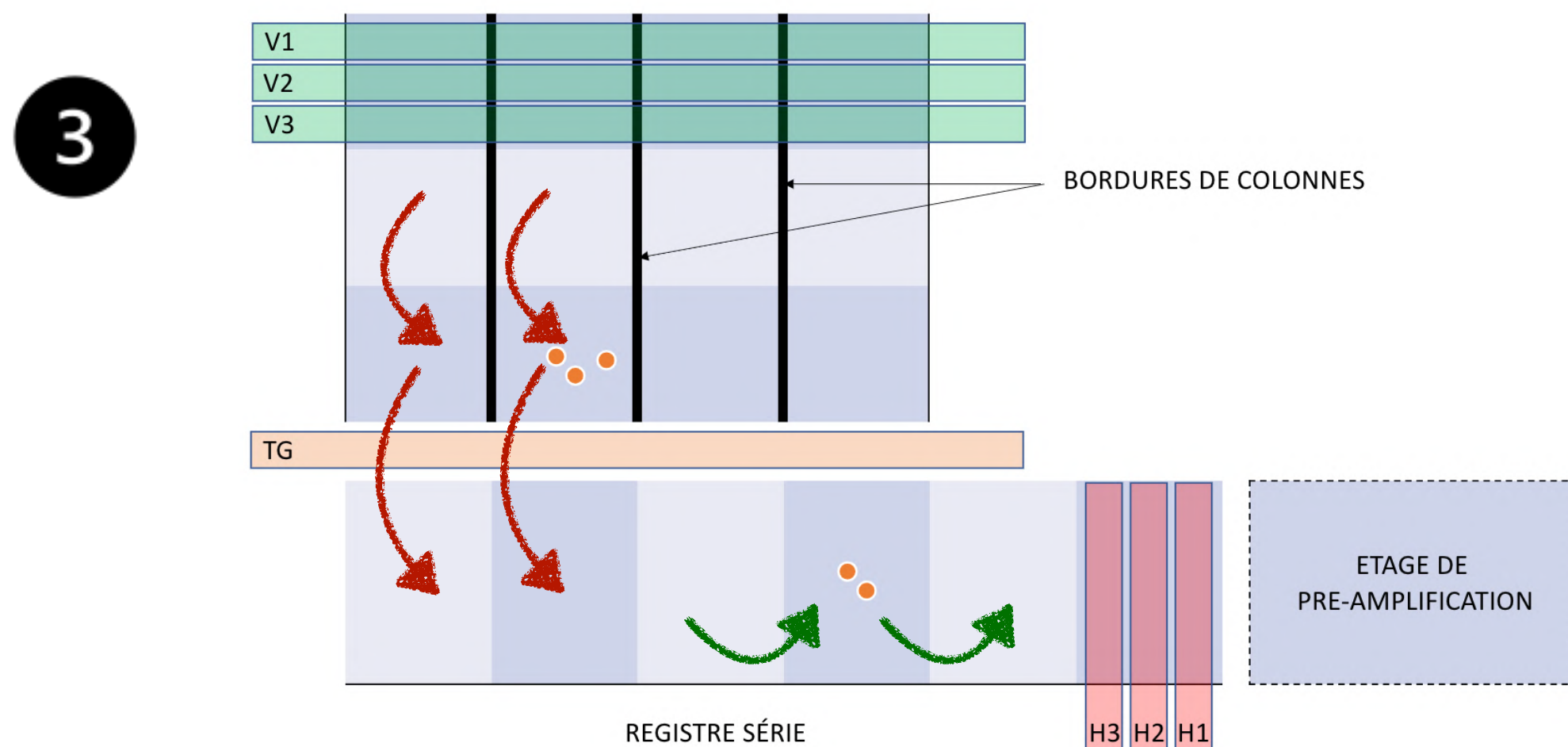
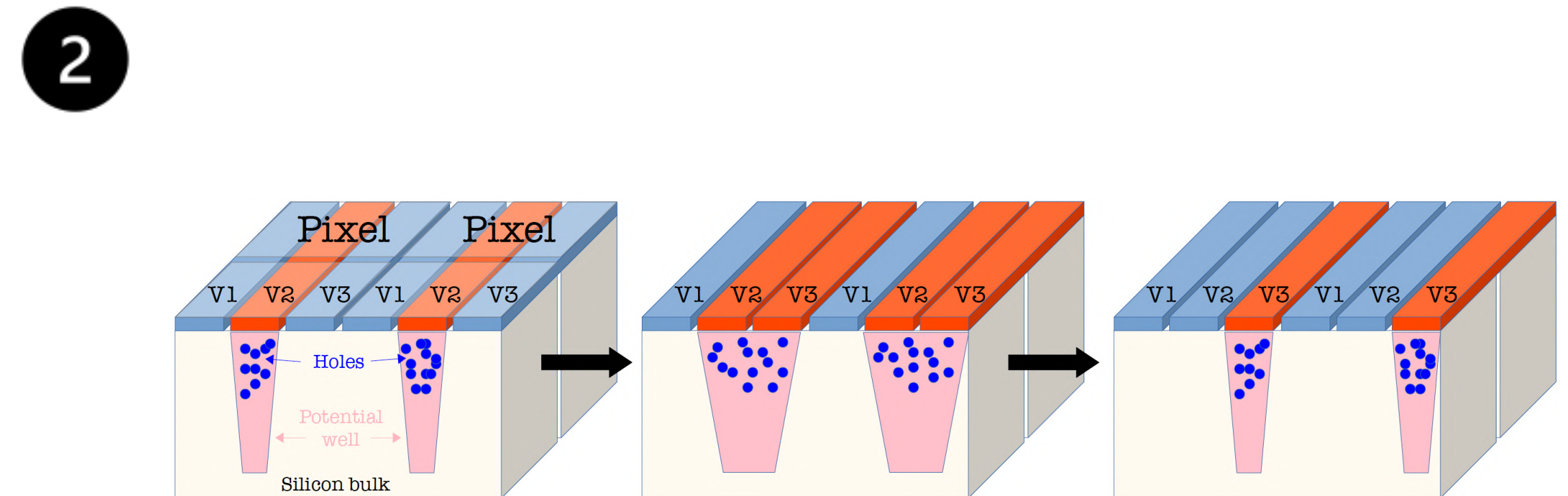
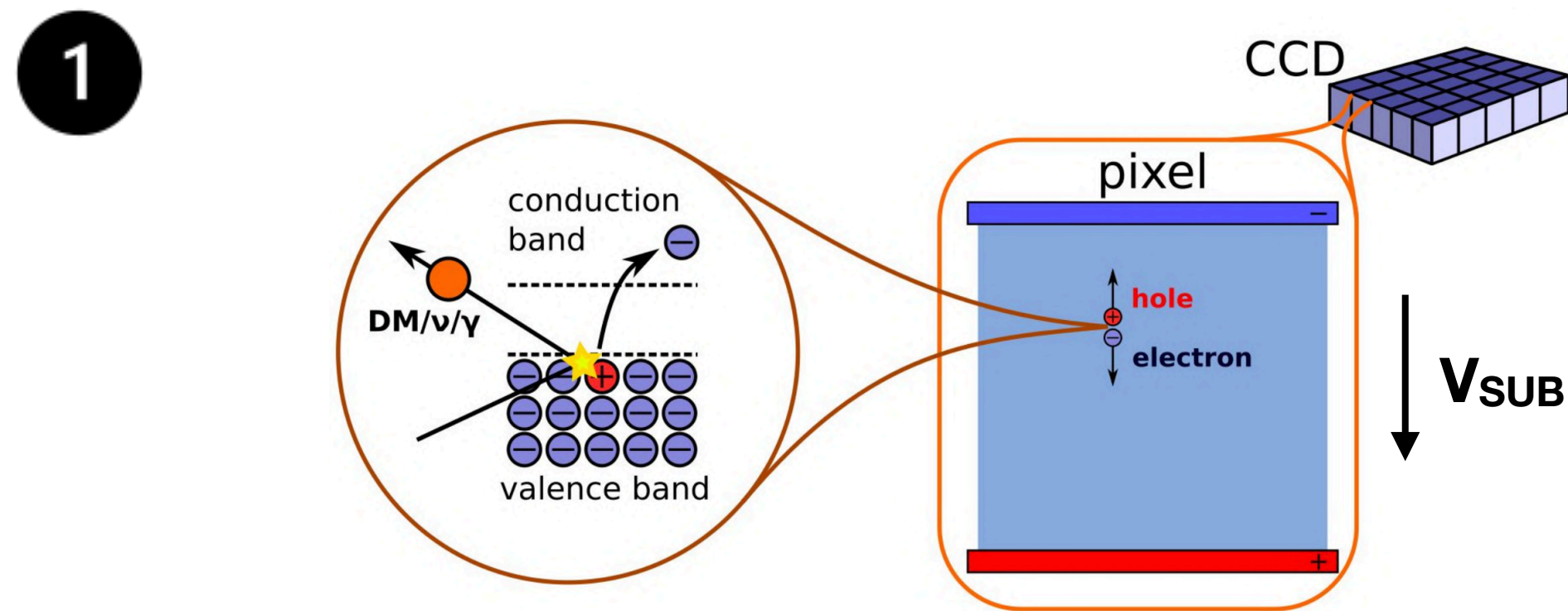


Diaphonie

Bruit intrinsèque

Le dispositif à transfert de charges

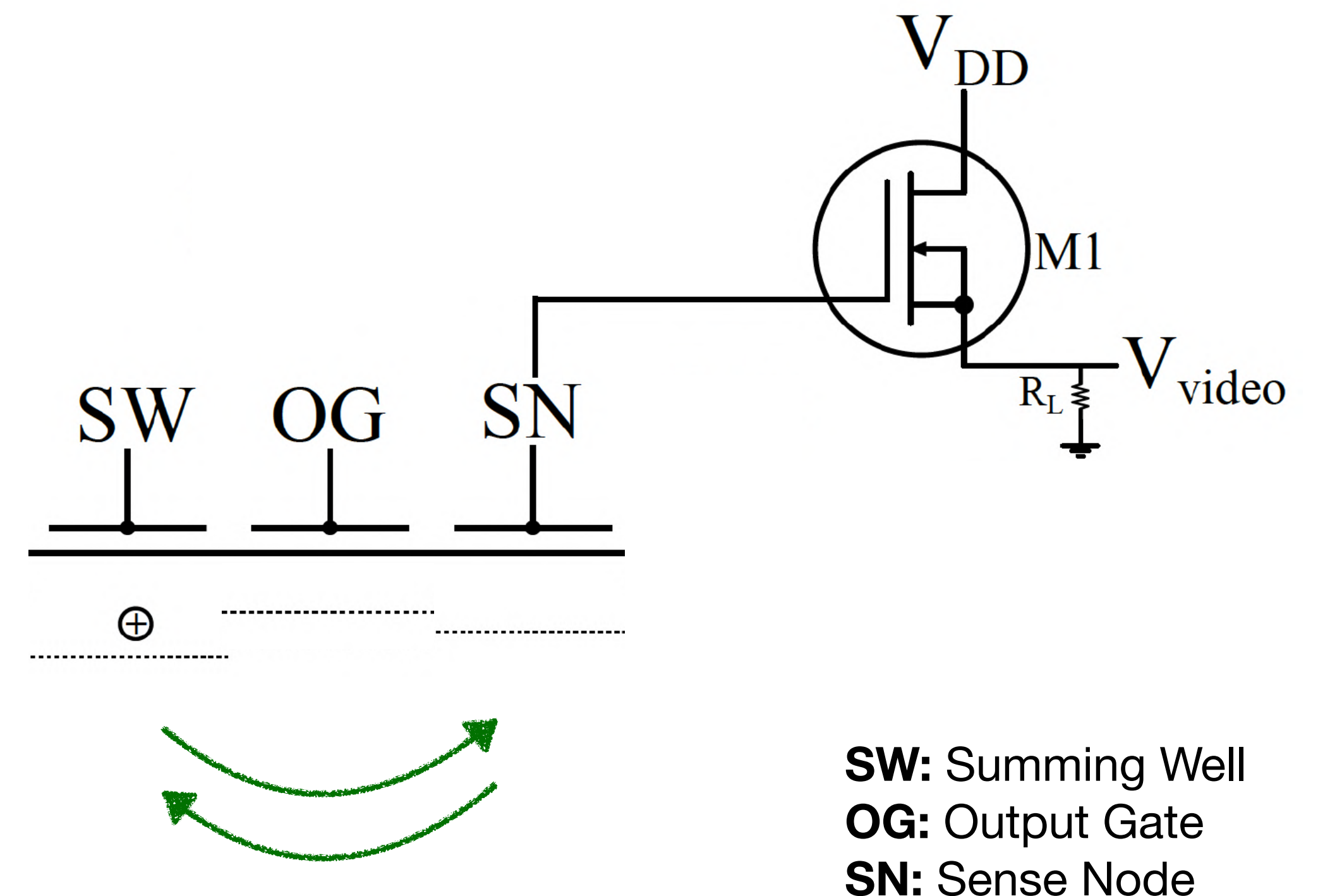
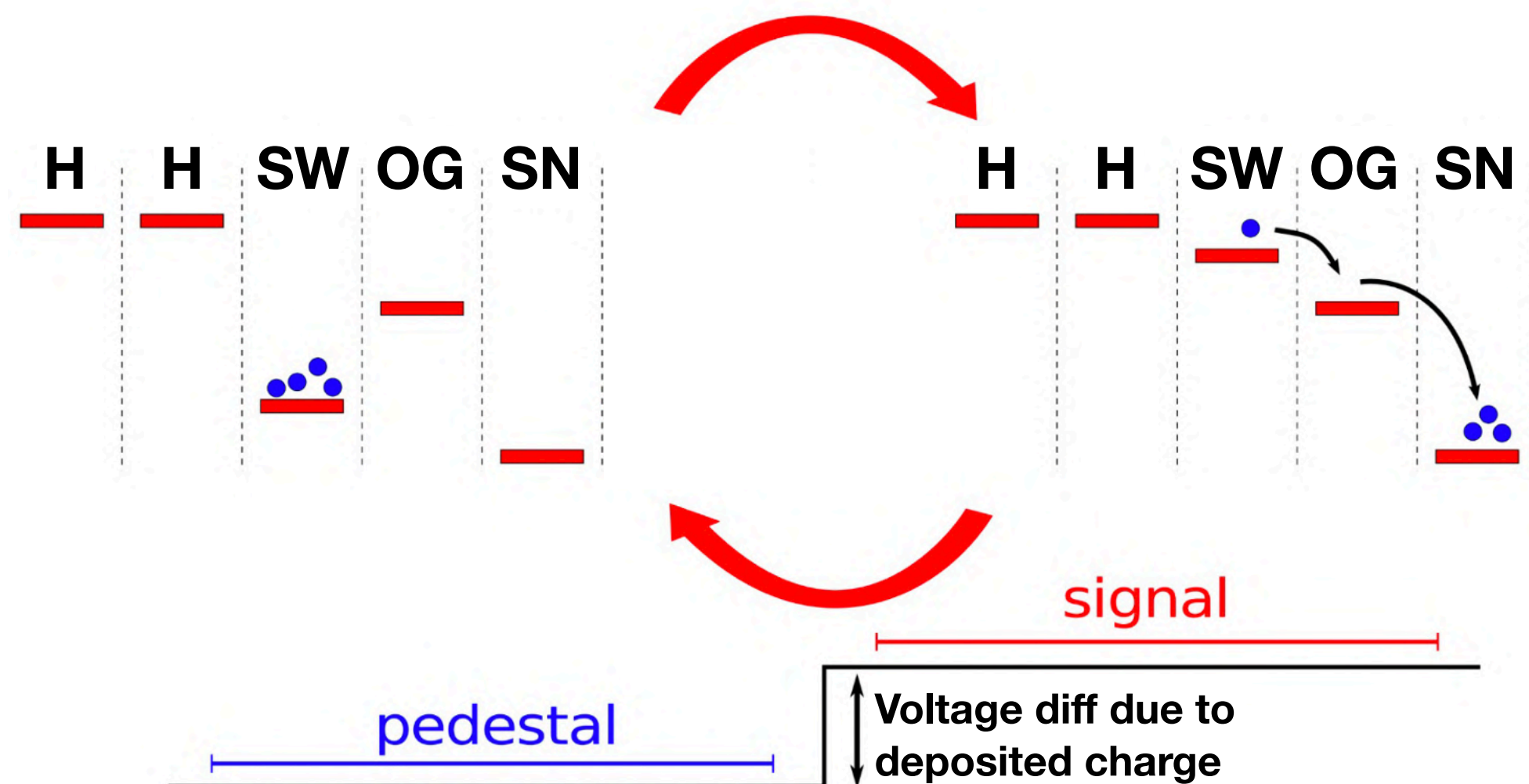
et son principe de lecture



Le dispositif à transfert de charges

et son principe de lecture

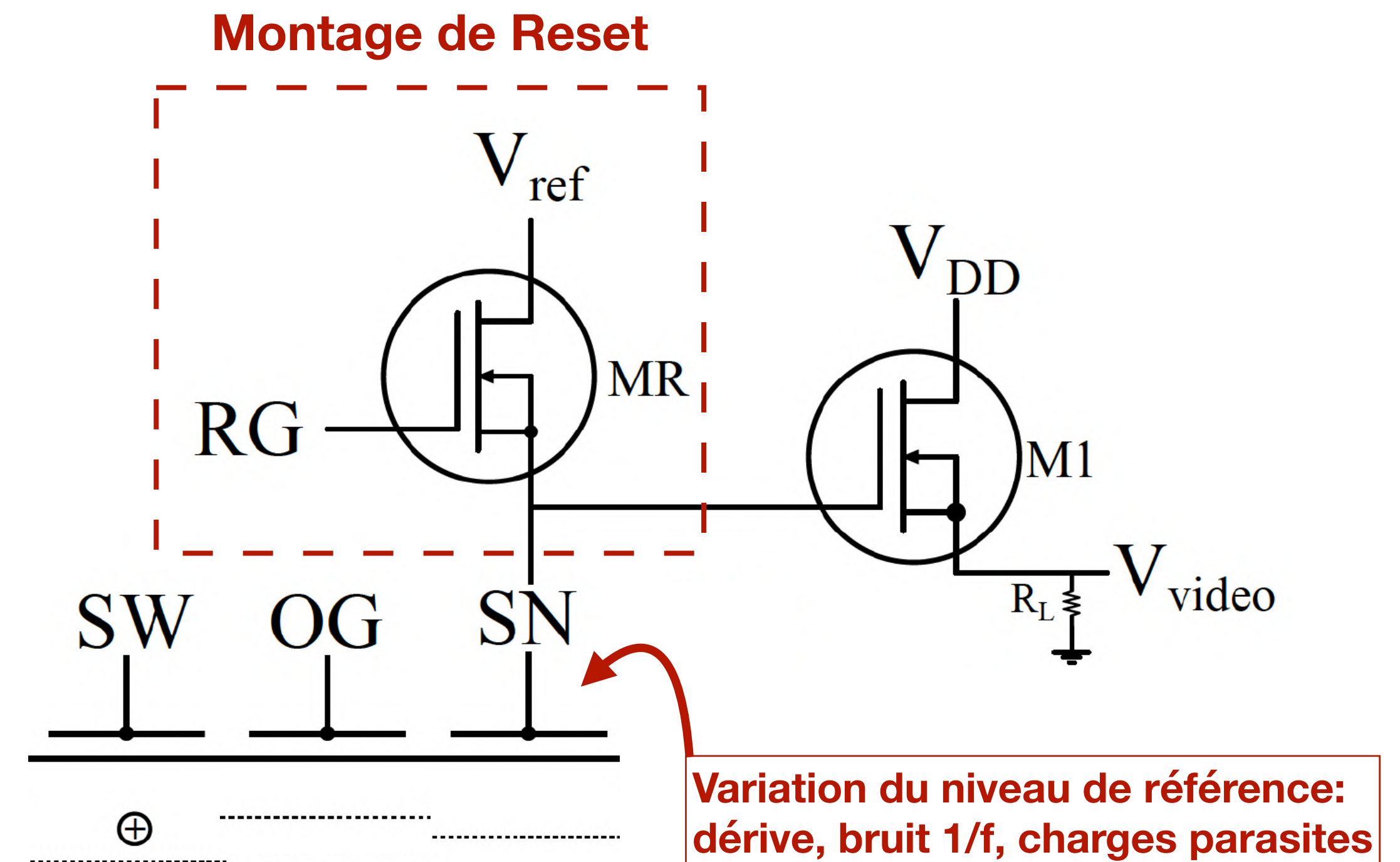
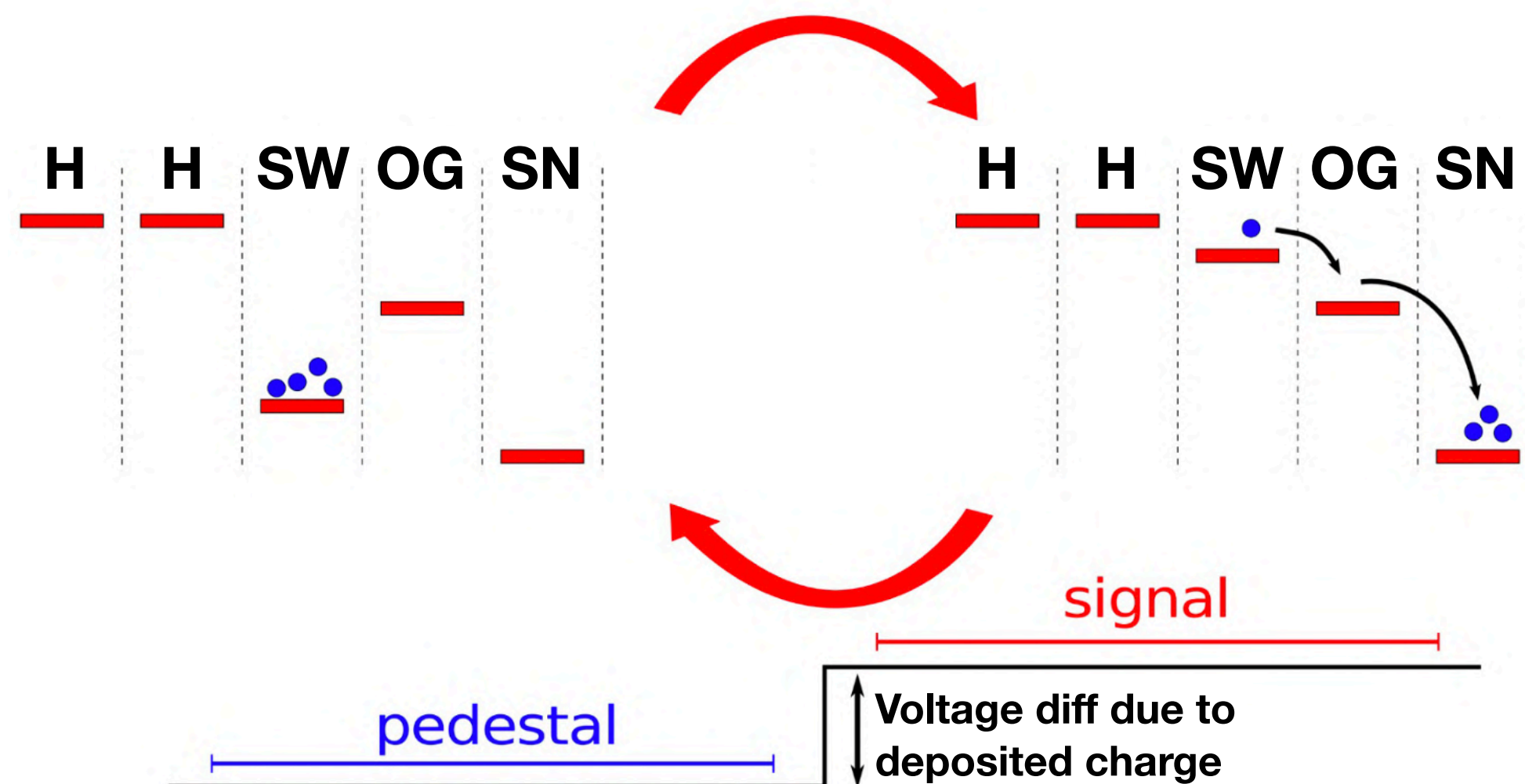
1 Lecture double corrélée



Le dispositif à transfert de charges

et son principe de lecture

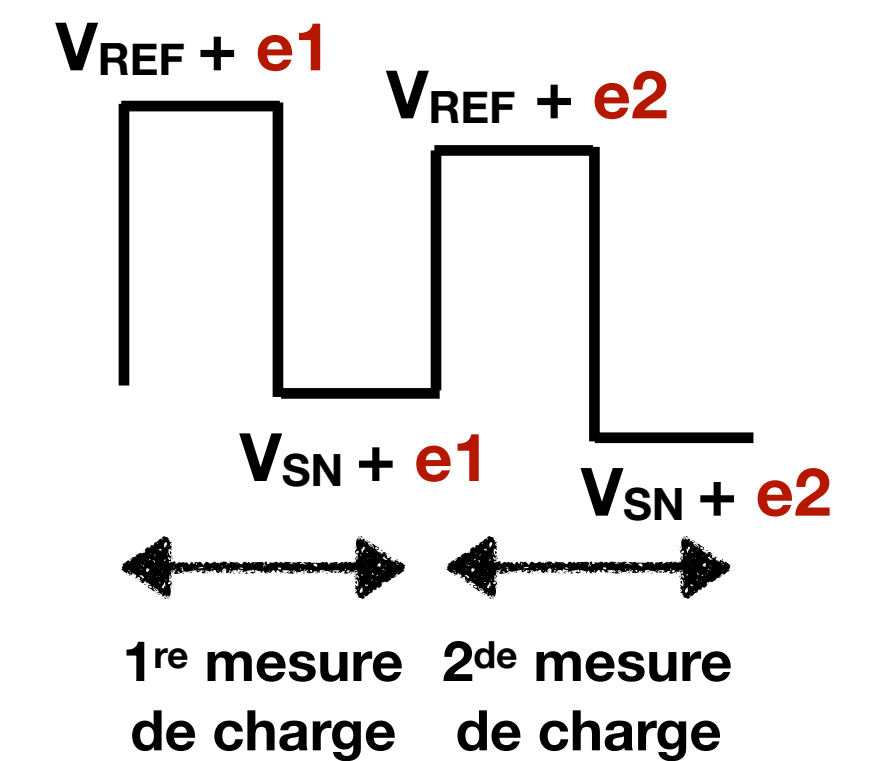
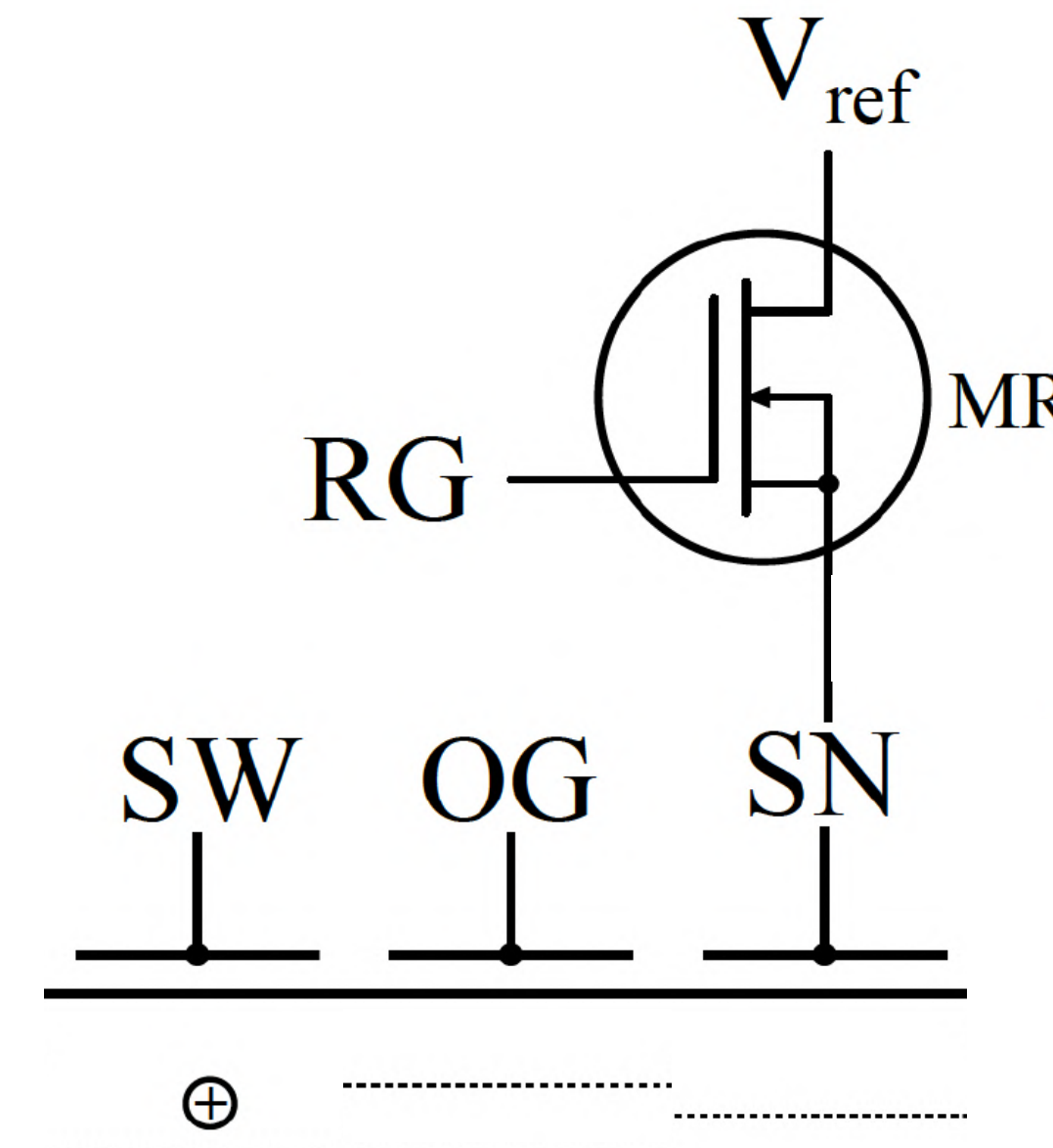
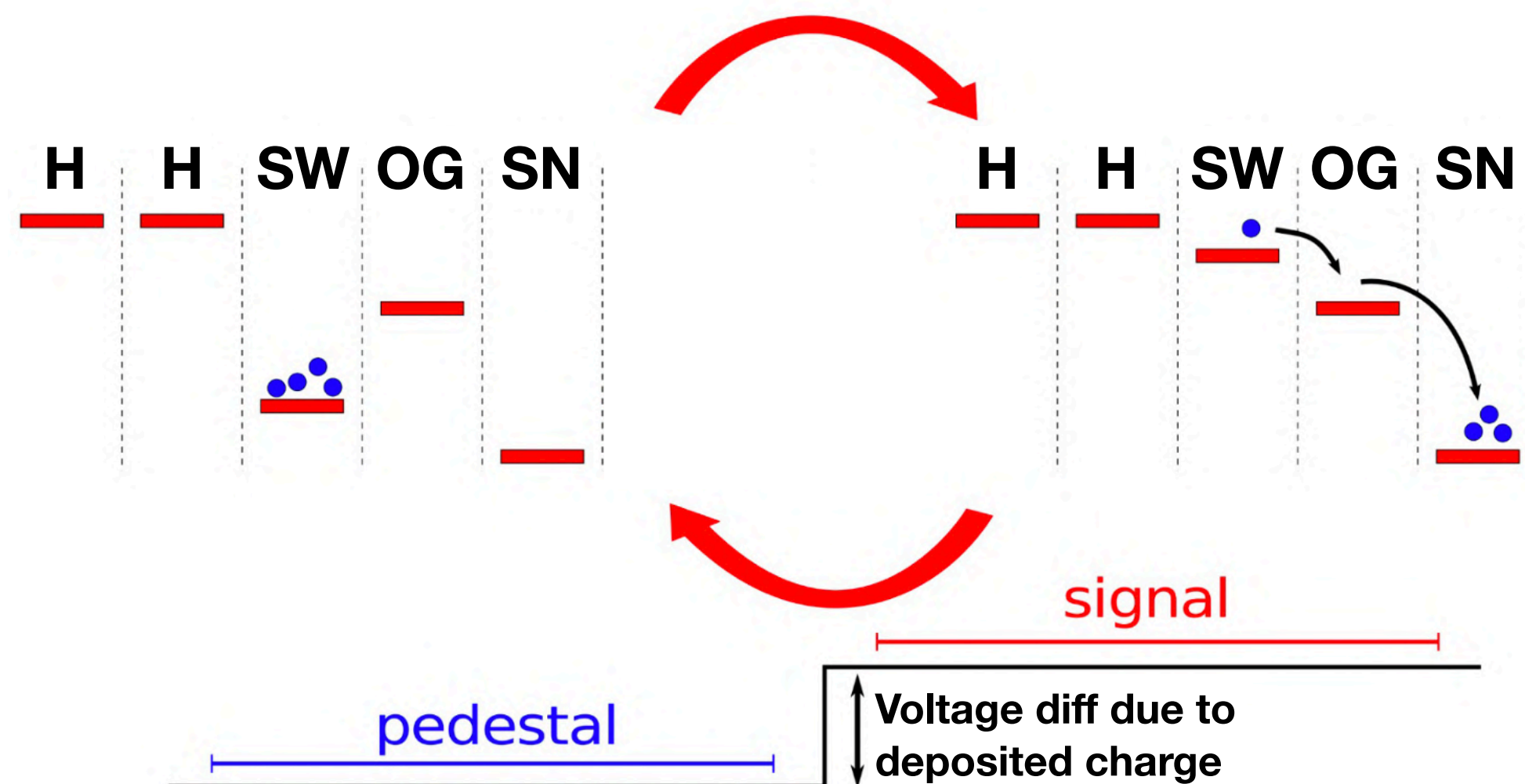
1 Lecture double corrélée



Le dispositif à transfert de charges

et son principe de lecture

1 Lecture double corrélée

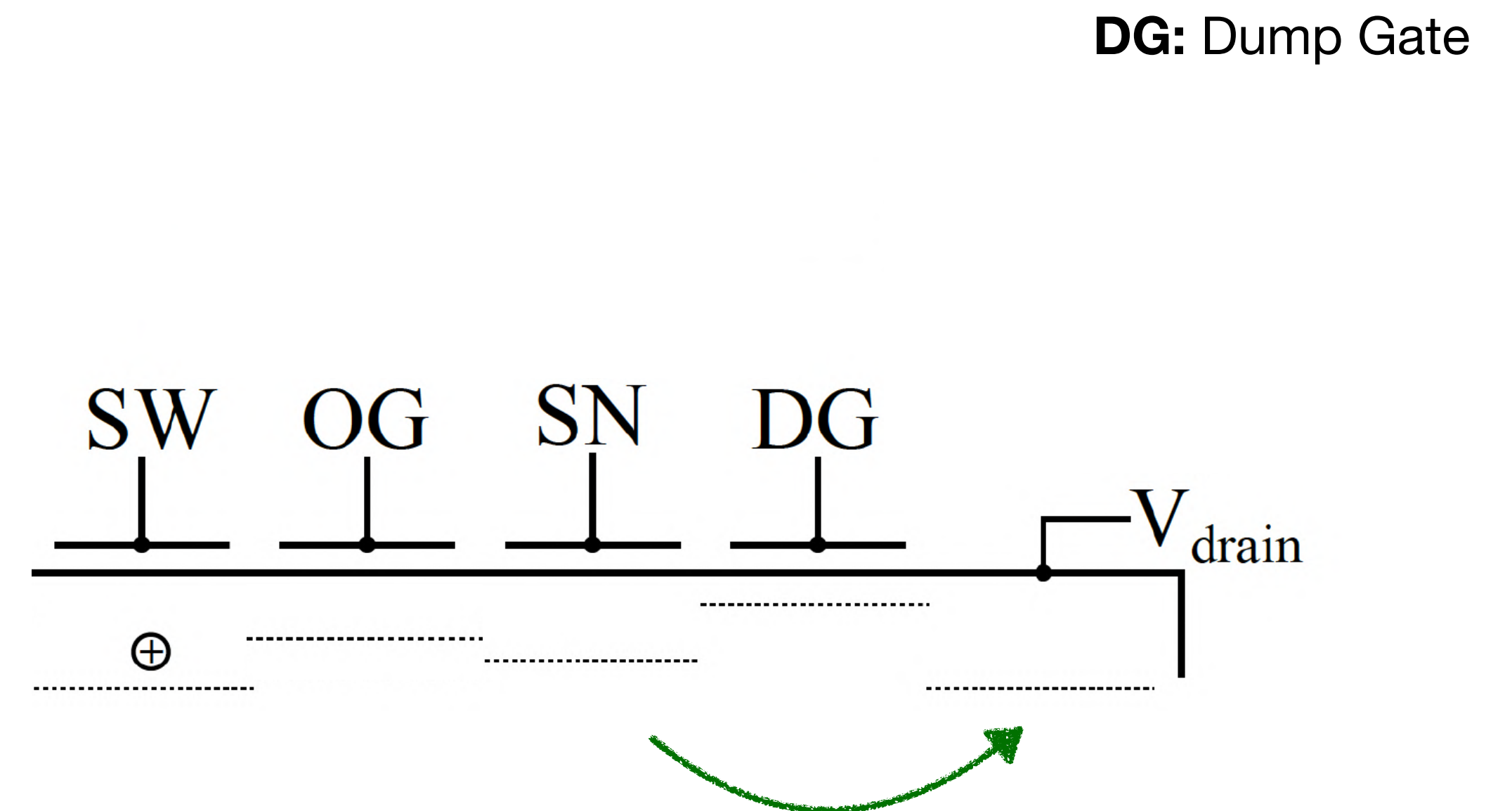
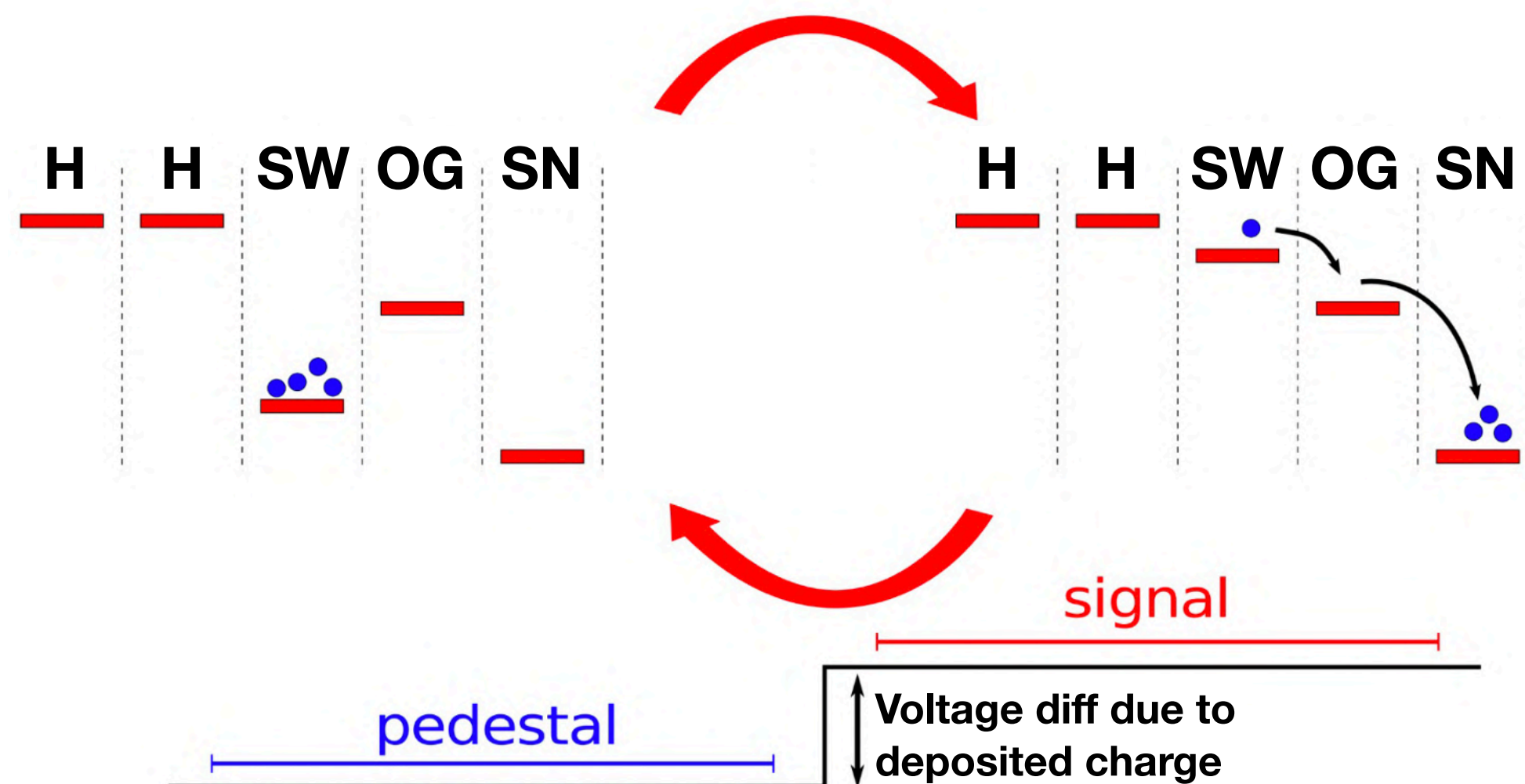


$$\begin{aligned}
 \Delta V &= V_{SN} + e1 - (V_{REF} + e1) \\
 &= V_{SN} + e2 - (V_{REF} + e2) \\
 &= V_{SN} - V_{REF}
 \end{aligned}$$

Le dispositif à transfert de charges

et son principe de lecture

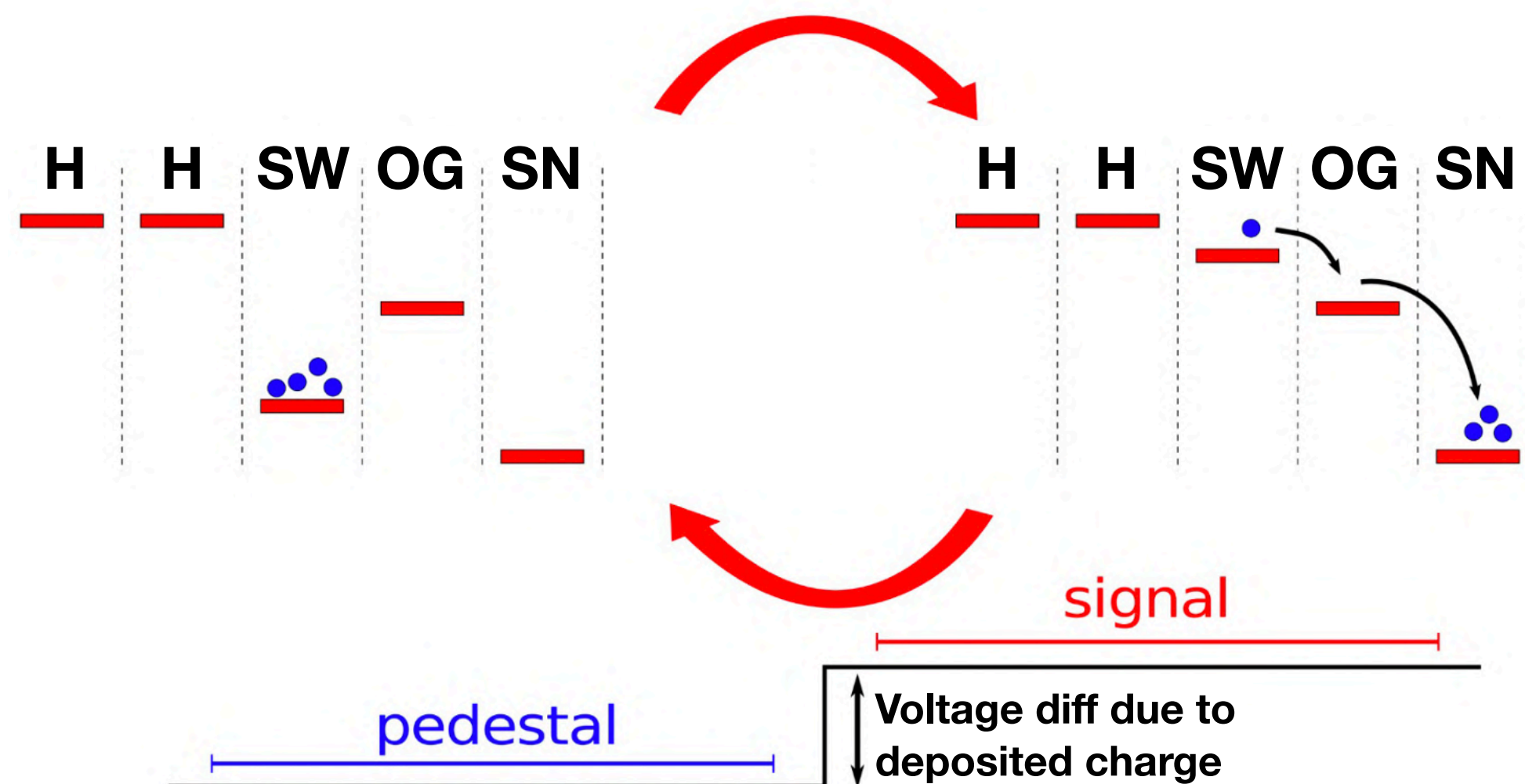
1 Lecture double corrélée



Le dispositif à transfert de charges

et son principe de lecture

1 Lecture double corrélée



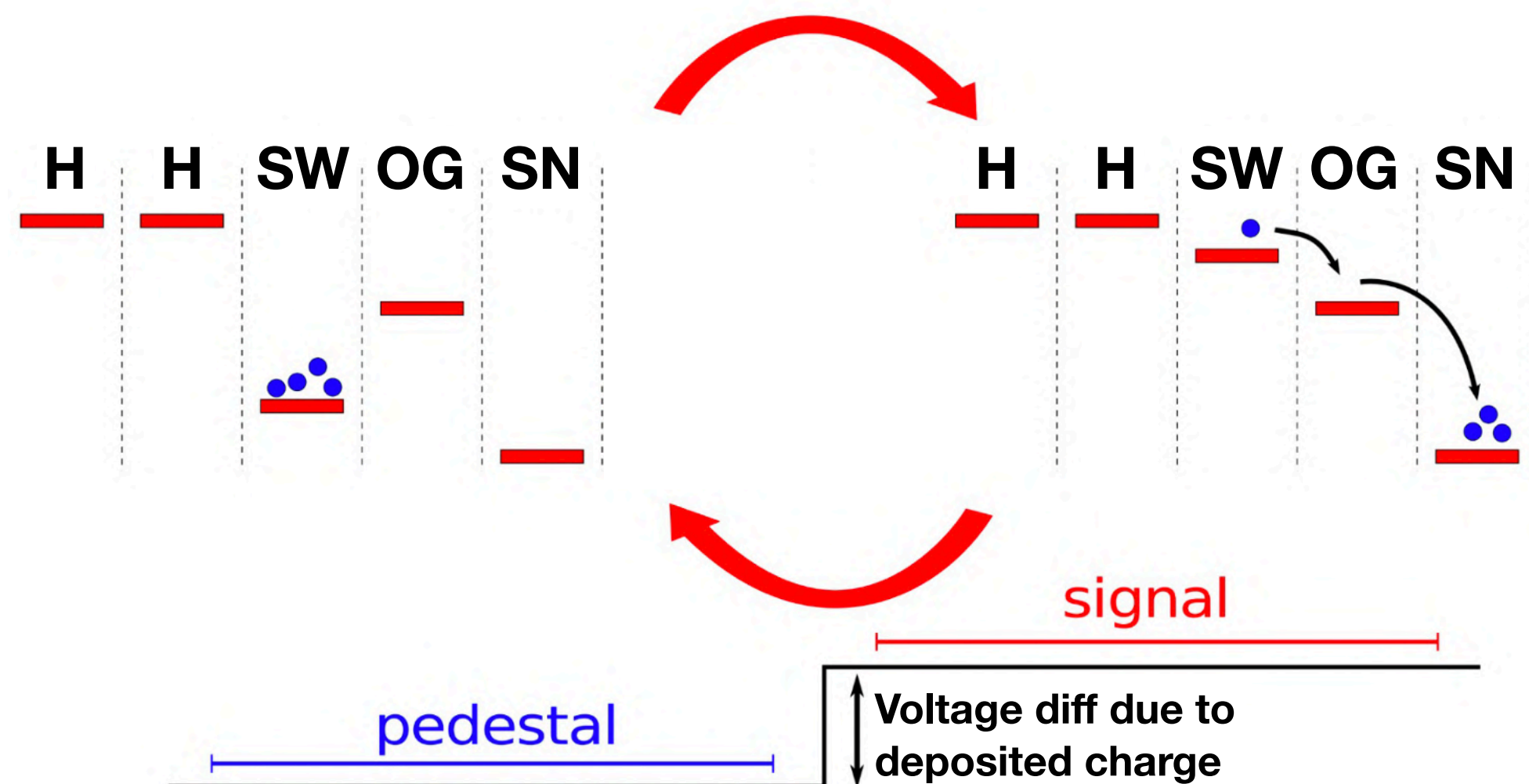
2 Lecture skipper

- Une lecture **multiple non-destructive** des charges.
- Concept introduit dans les années 1990.
- Intégration **récente (2017)** dans la recherche de matière noire (SENSEI).

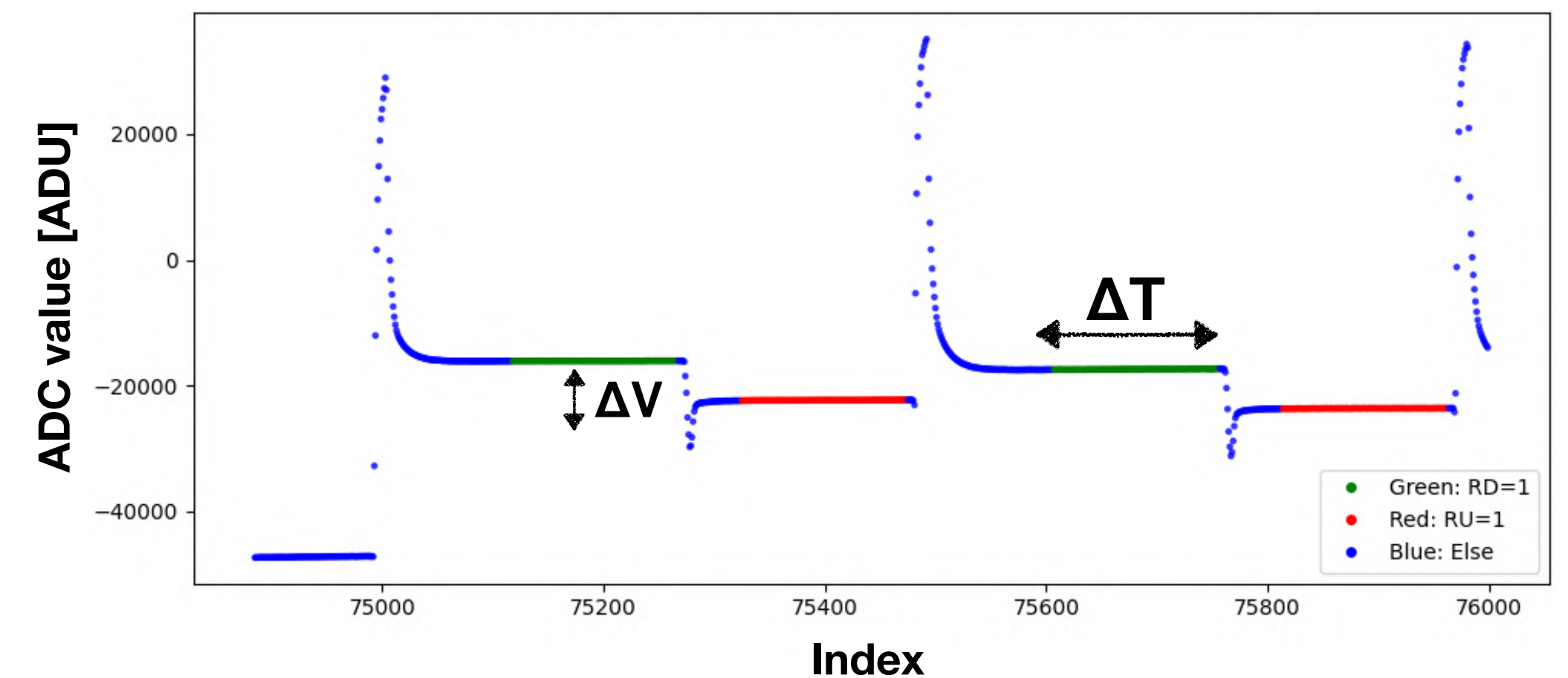
Le dispositif à transfert de charges

et son principe de lecture

1 Lecture double corrélée



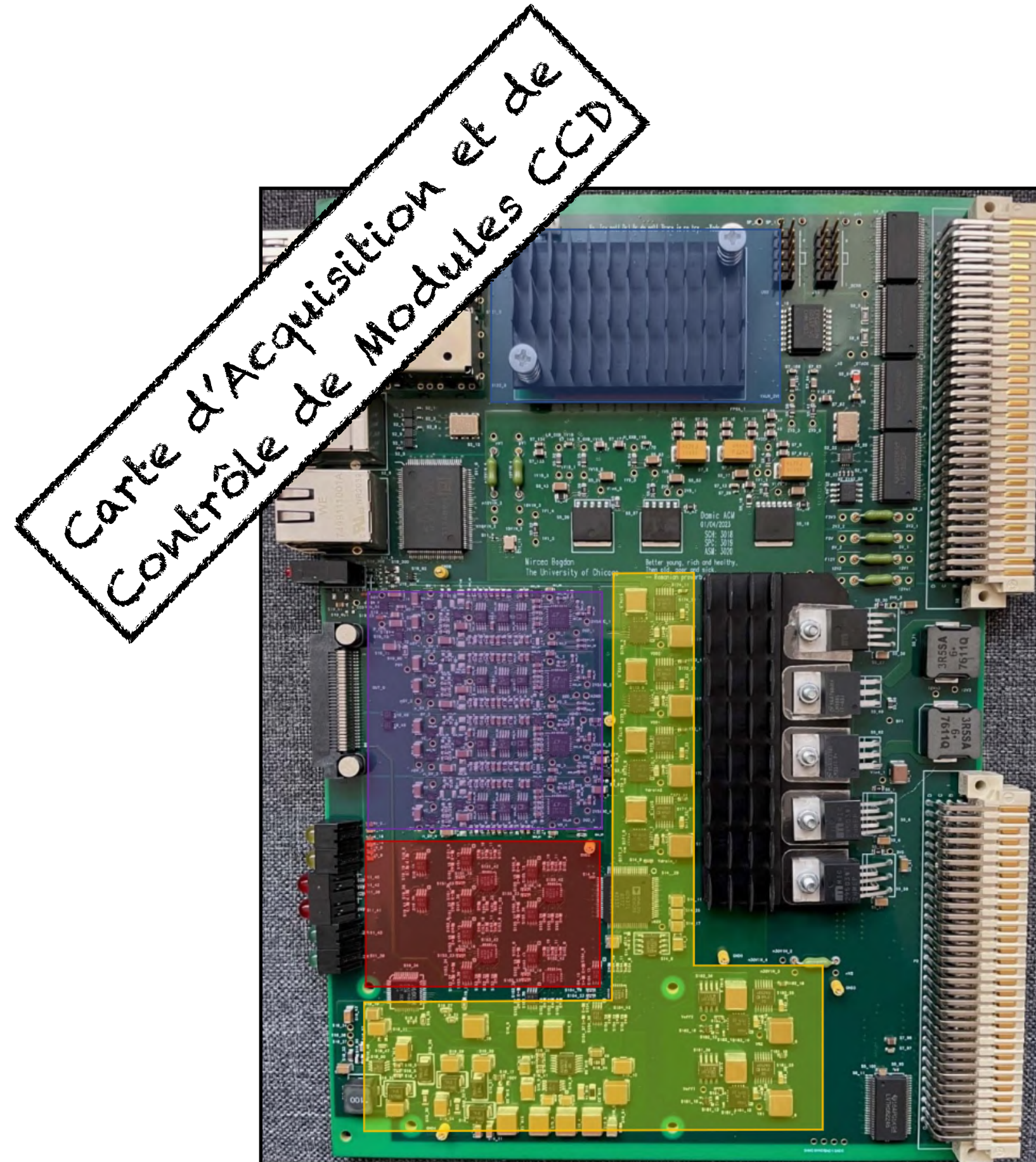
2 Lecture skipper (2017)



- ΔV minimal en sortie du CCD de $\sim \mu V$
- Temps d'intégration de l'ordre de $1-10 \mu s$
- Contraintes sur la **qualité du signal**

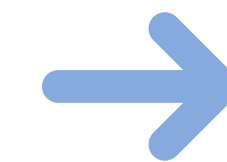
Le dispositif à transfert de charges

et son électronique de lecture



Génération des biais de polarisation:

- Polarisation du pré-amplificateur de sortie
- Polarisation du substrat



Régulateurs bas bruit, **16 μV_{rms}** 10Hz-100KHz



Génération des horloges de cadencement:

- Programmation des niveaux haut et bas
- Contrôle des séquences



DAC bas bruit, **250 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$** @10kHz



Numérisation du signal analogique

- Suréchantillonnage et intégration du signal

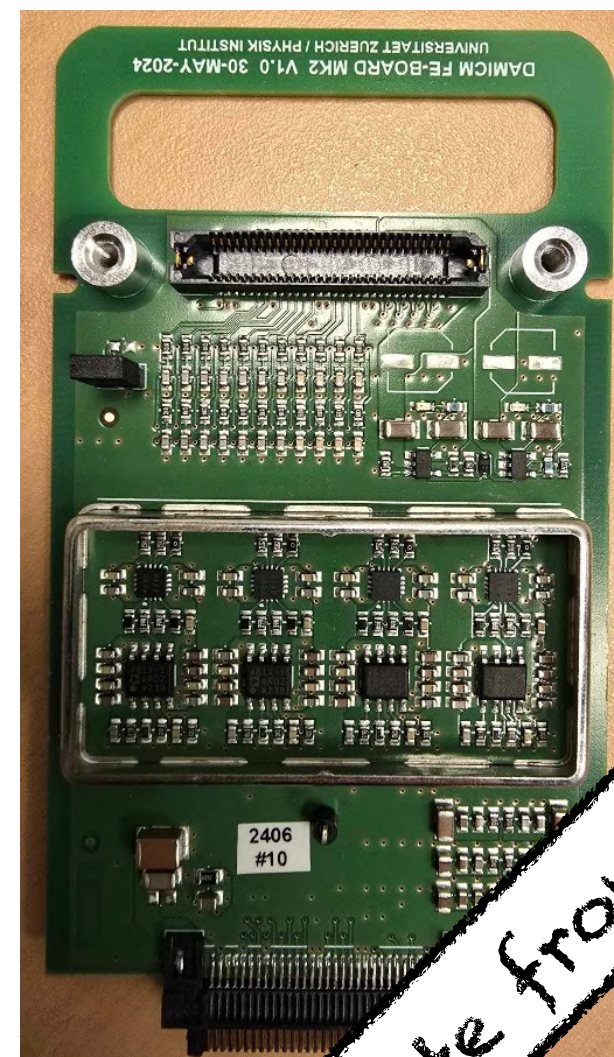


ADC rapide, **15MSPS-18bits**

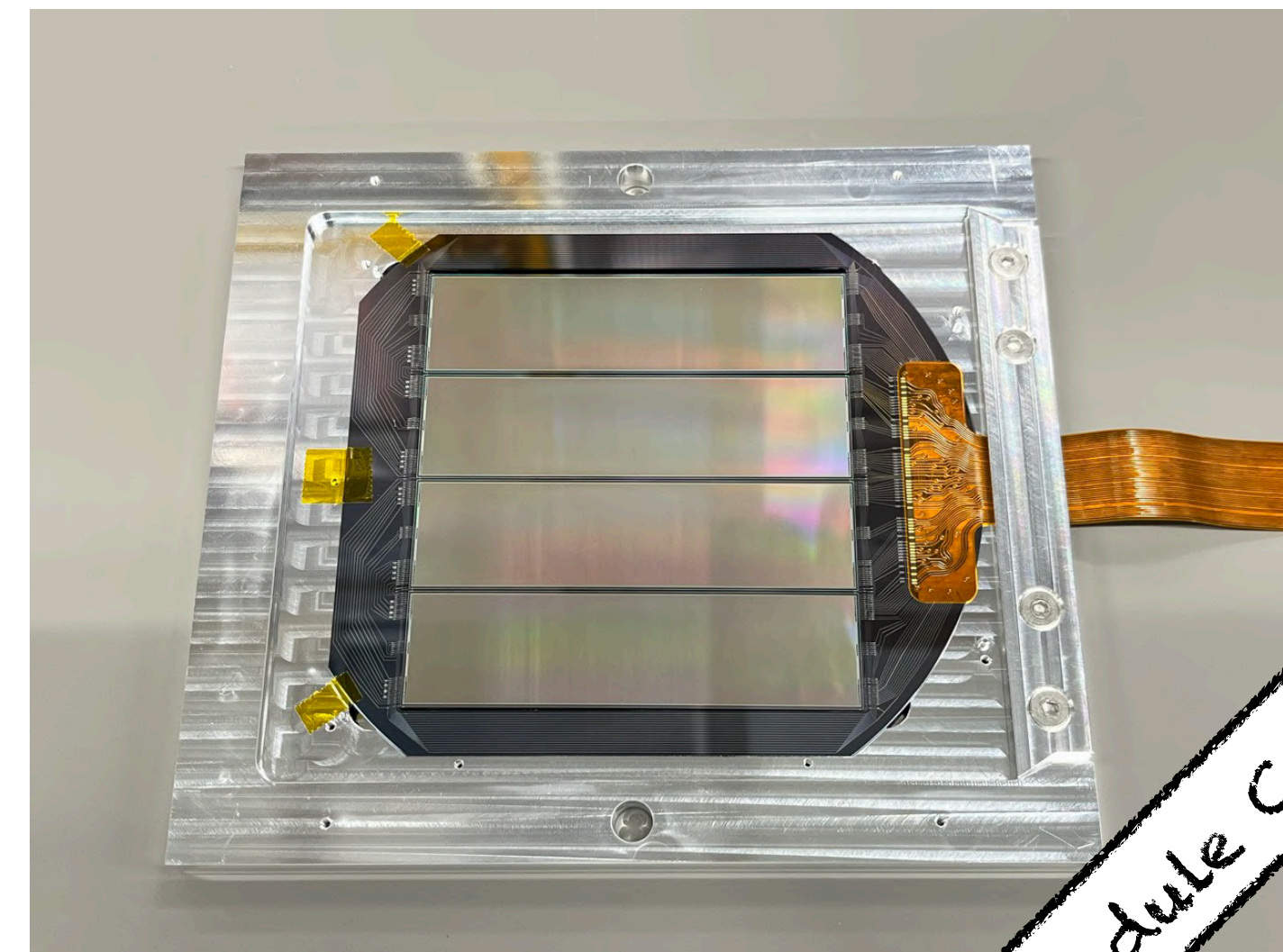
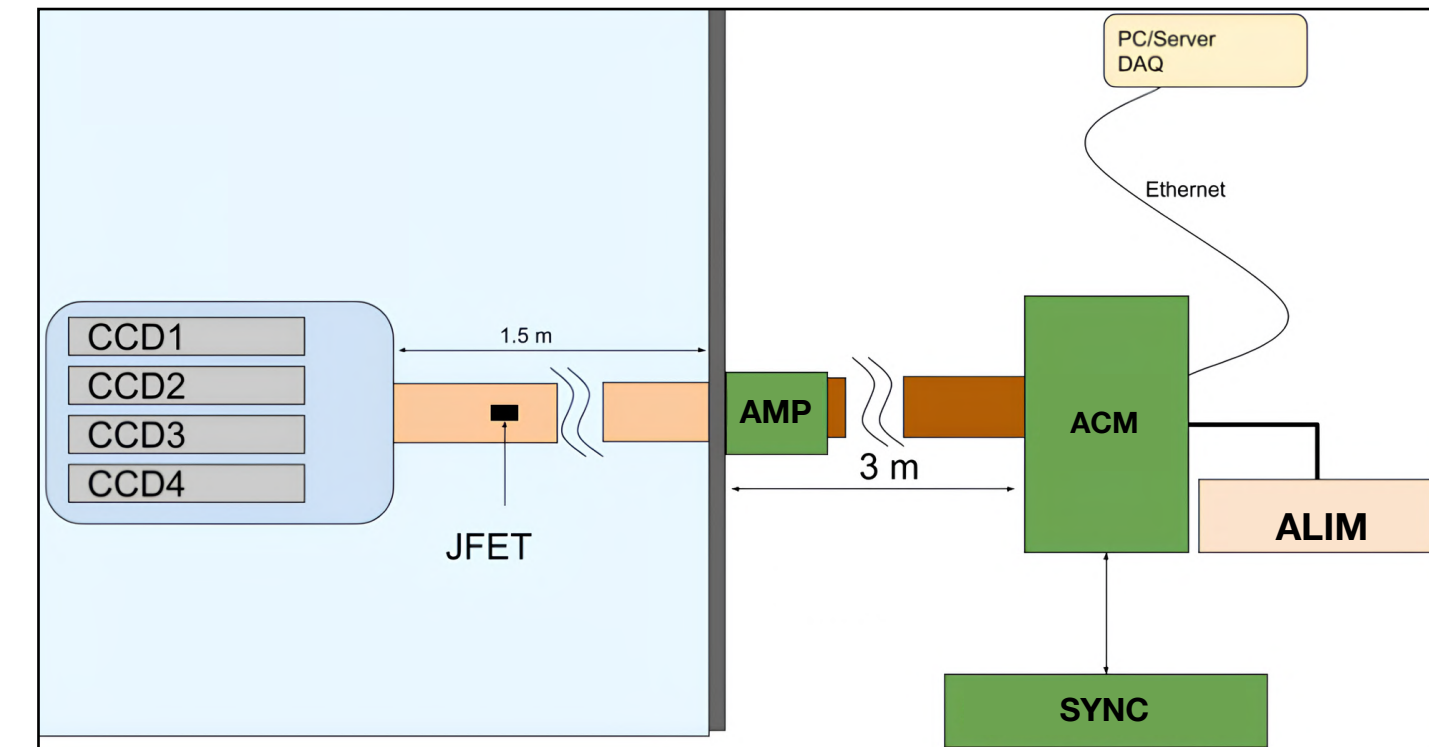
Le dispositif à transfert de charges

et son électronique de lecture

Carte d'Acquisition et de
Contrôle de Modules CCD

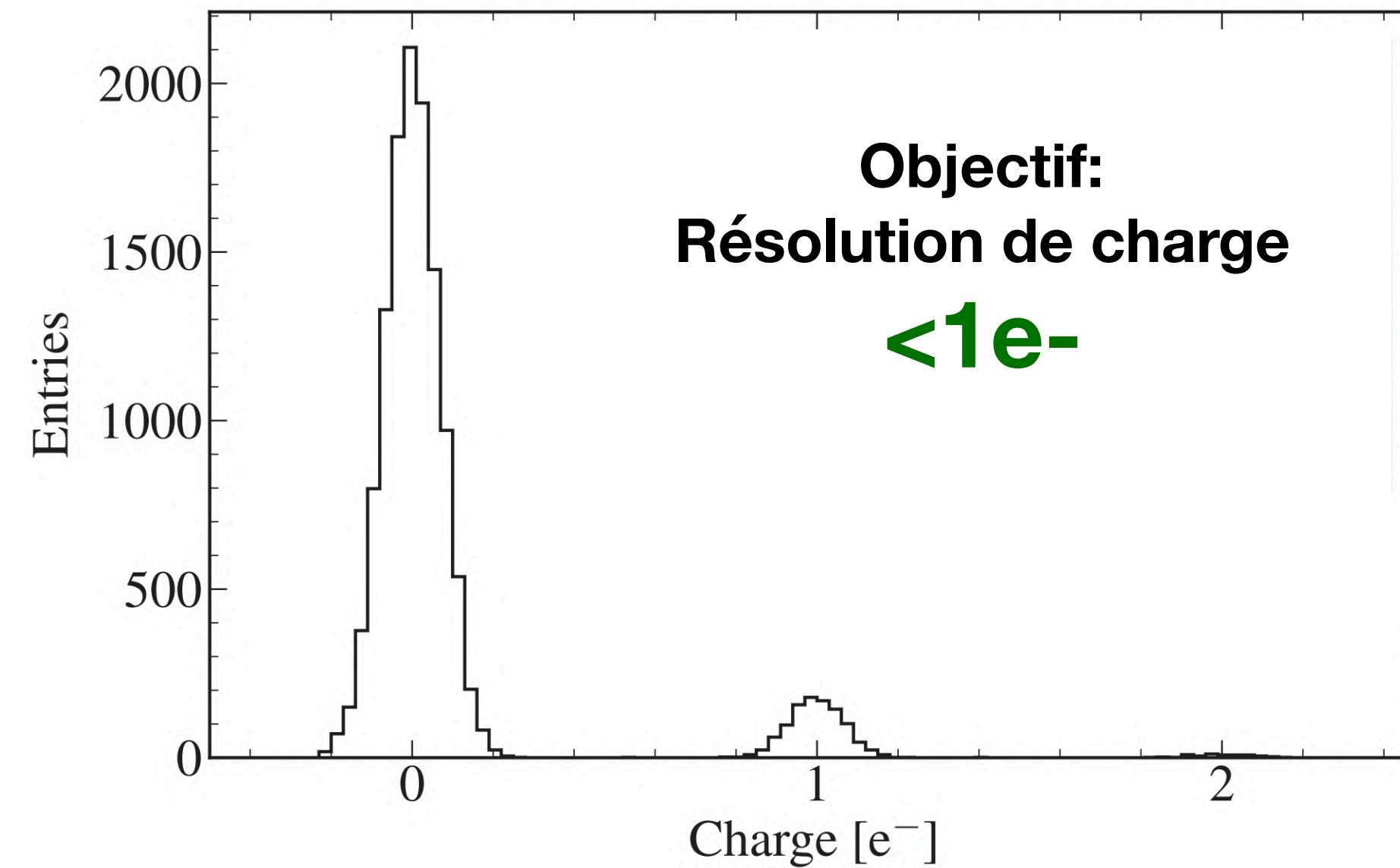
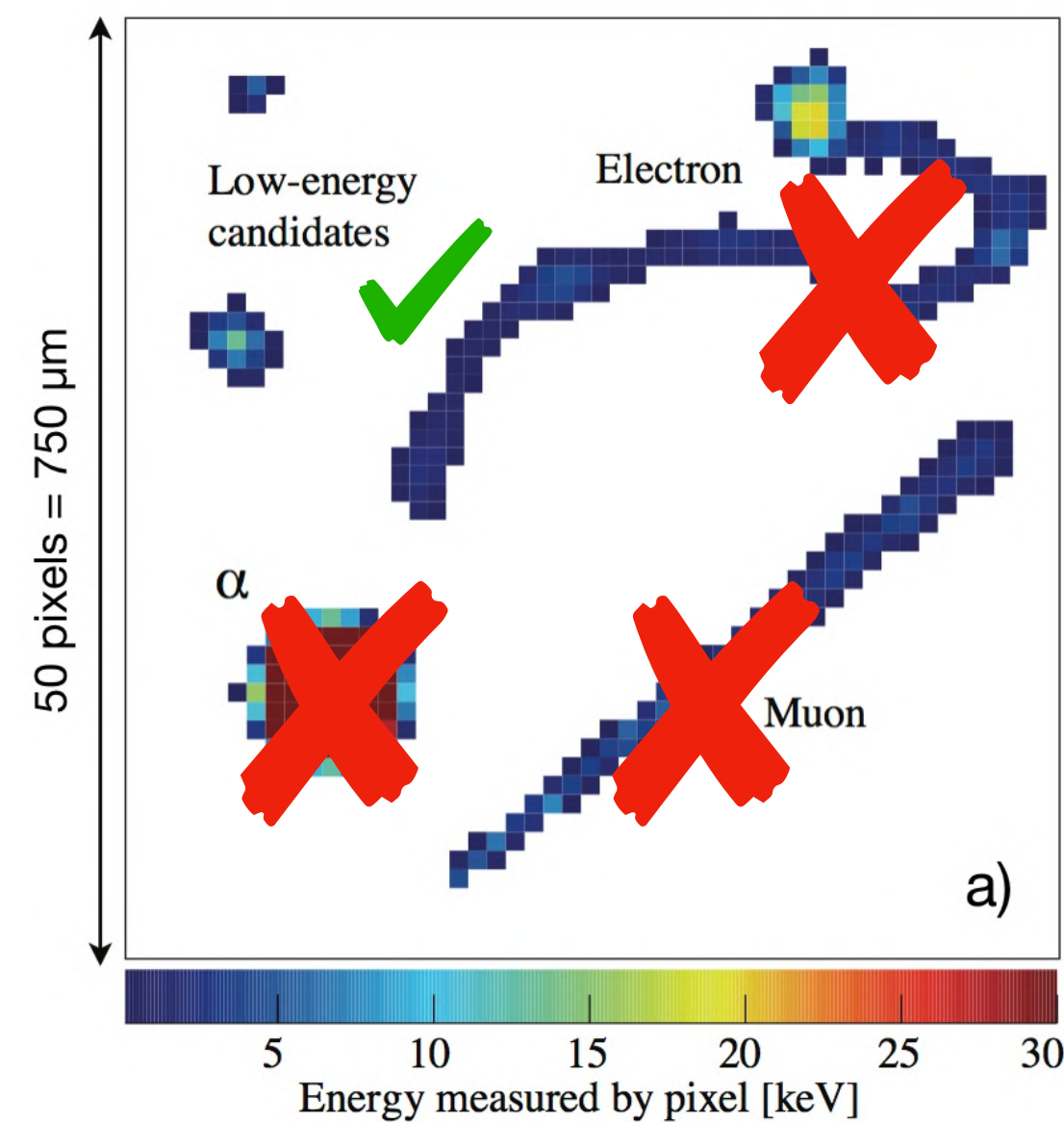


Carte frontale



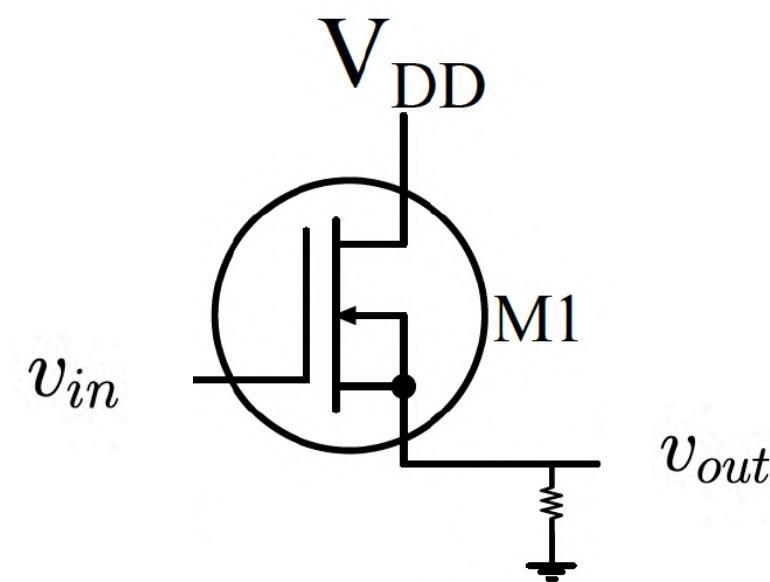
Module CCD

Le dispositif à transfert de charges et son électronique de lecture

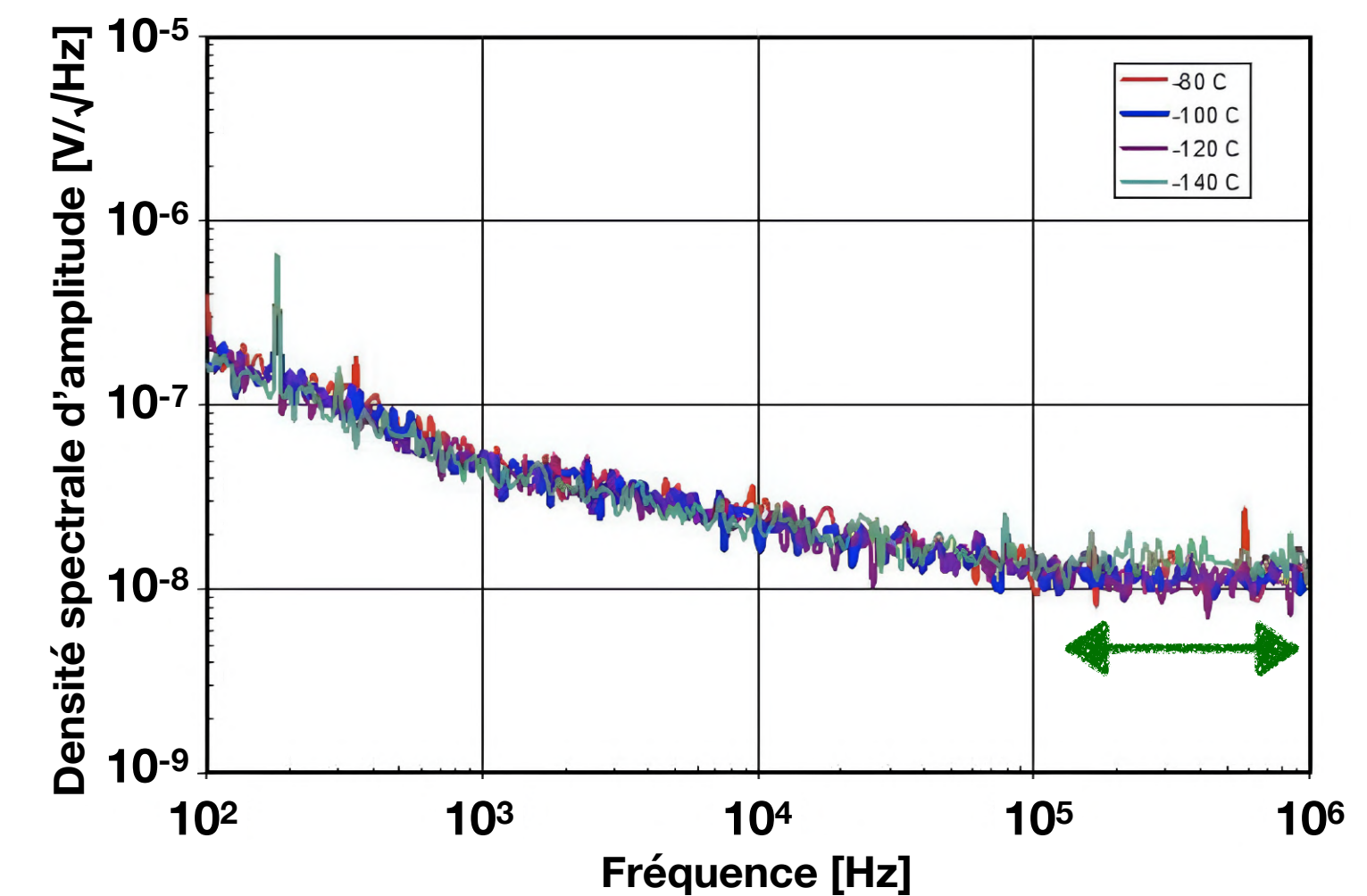


Bruit intrinsèque

du pré-amplificateur de sortie



Spectre du bruit ramené à l'entrée du pré-amplificateur

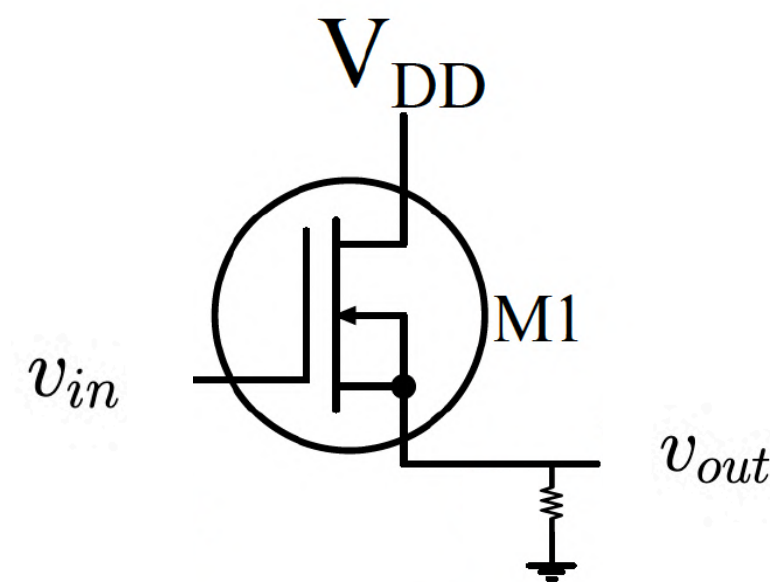


$$\overline{i_{n,blanc}^2} = 4 \cdot k_B \cdot T \cdot g_m$$

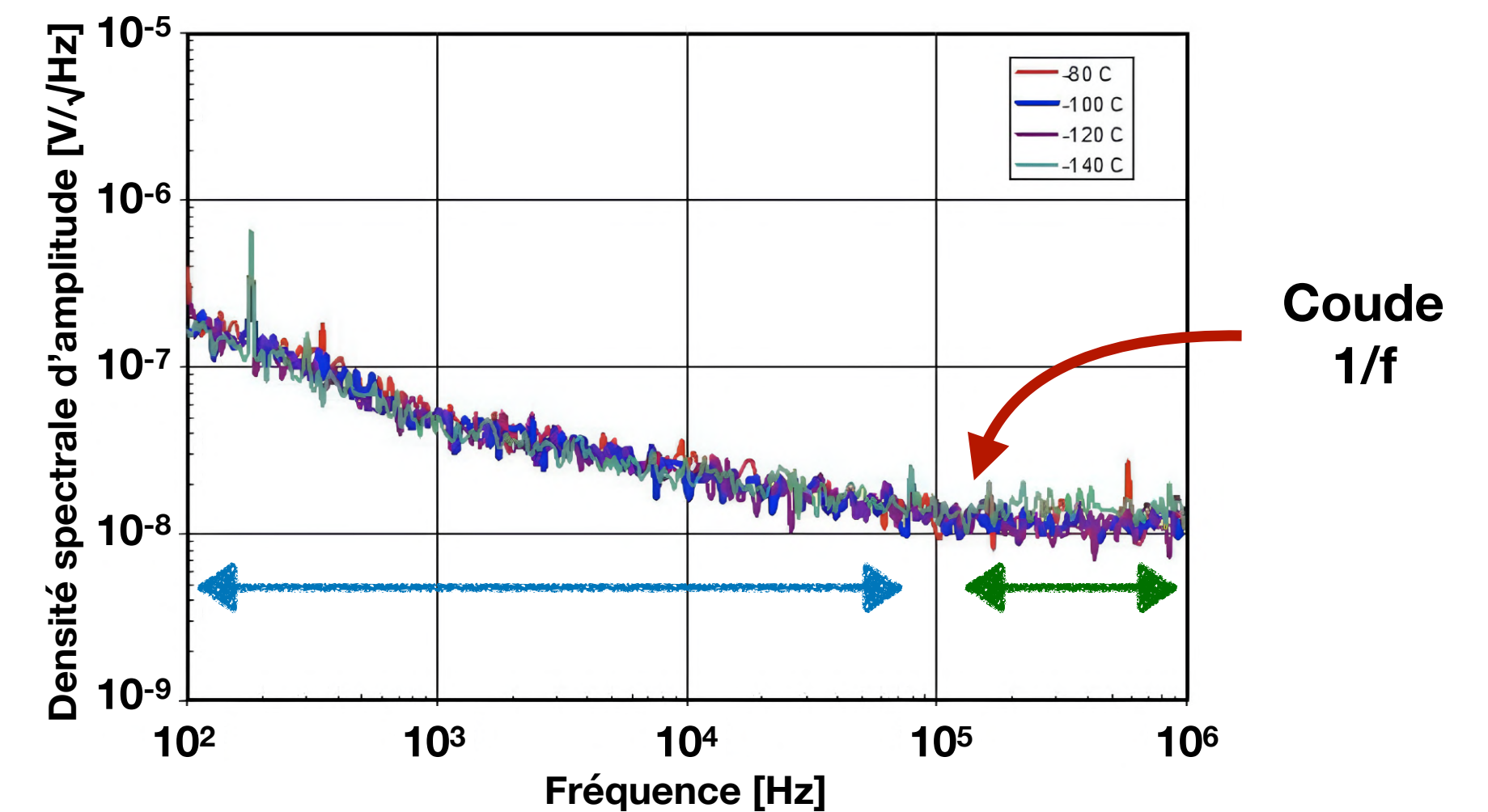
🔍 Agitation thermique

Bruit intrinsèque

du pré-amplificateur de sortie



Spectre du bruit ramené à l'entrée du pré-amplificateur



$$\overline{i_{n,1/f}^2} = g_m^2 \frac{K_f}{C_{ox} \cdot W \cdot L \cdot f}$$

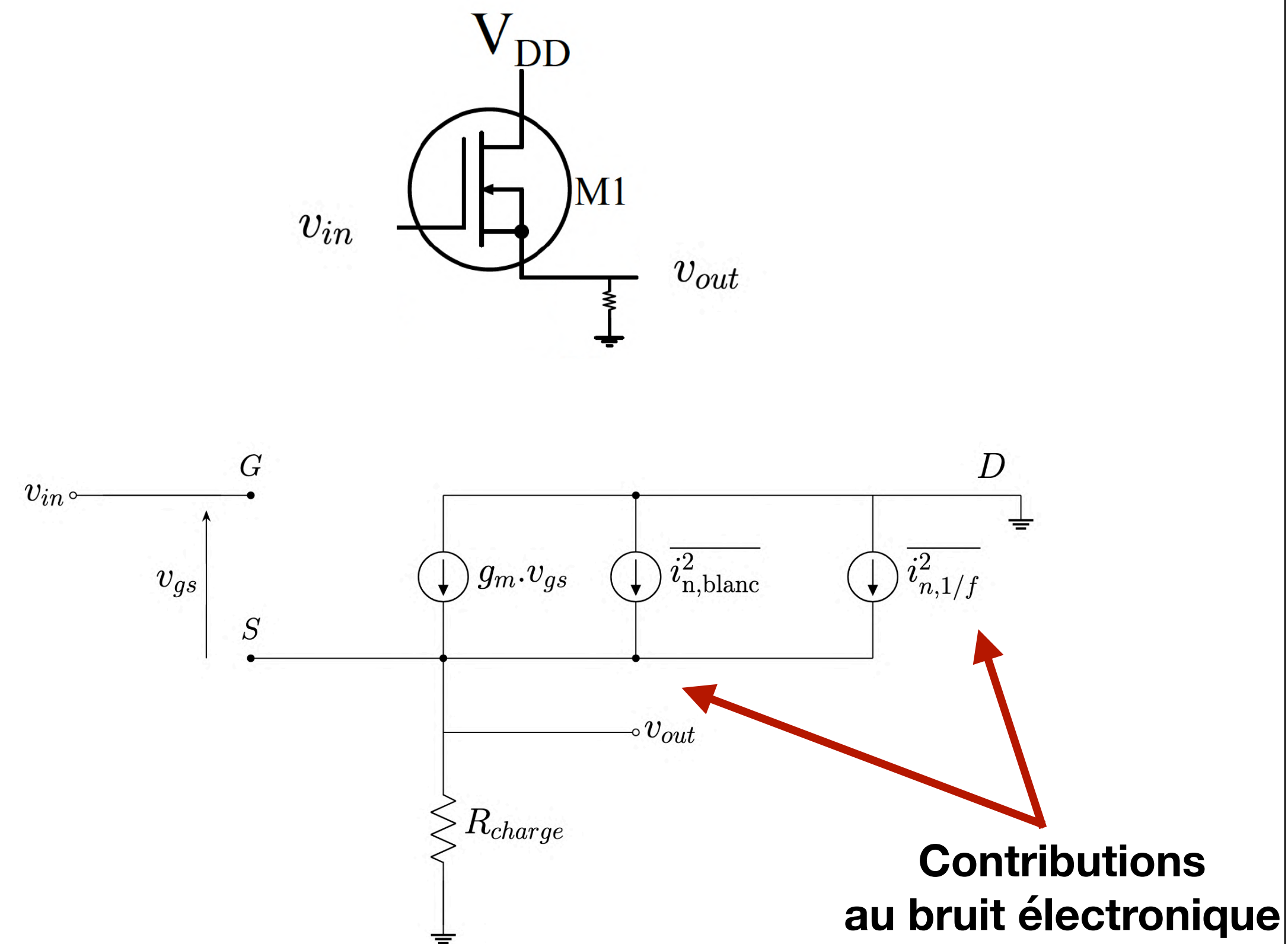
$$\overline{i_{n,blanc}^2} = 4 \cdot k_B \cdot T \cdot g_m$$

🔍 États d'interface

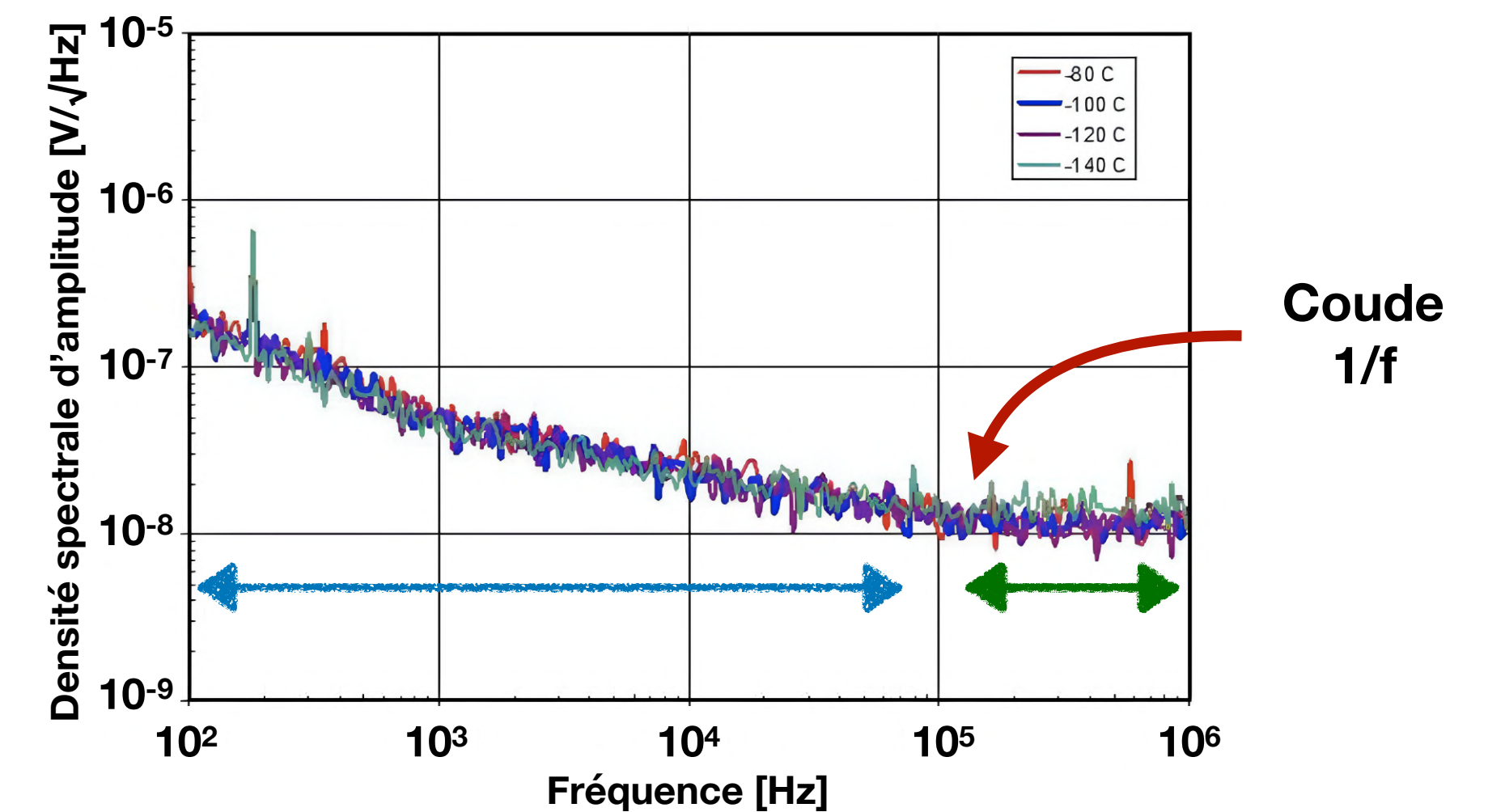
🔍 Agitation thermique

Bruit intrinsèque

du pré-amplificateur de sortie



Spectre du bruit ramené à l'entrée du pré-amplificateur



$$\overline{i_{n,1/f}^2} = g_m^2 \frac{K_f}{C_{ox} \cdot W \cdot L \cdot f}$$

🔍 États d'interface

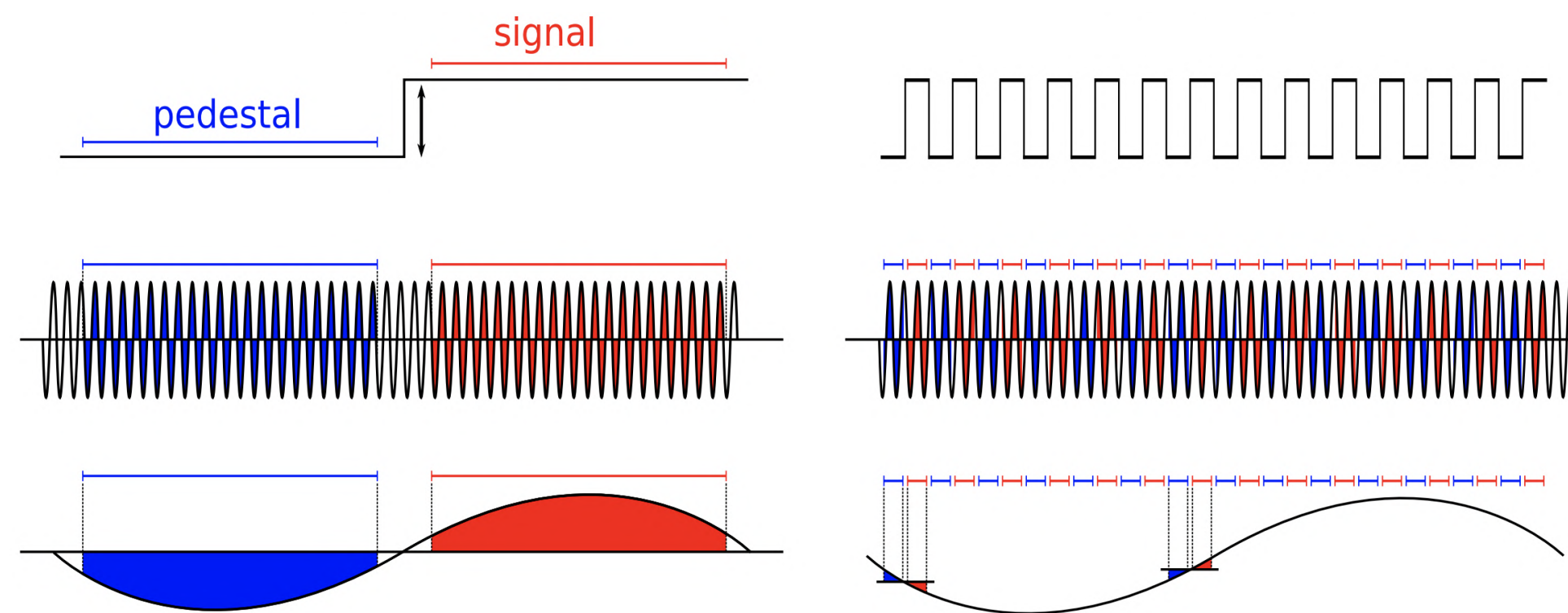
$$\overline{i_{n,blanc}^2} = 4 \cdot k_B \cdot T \cdot g_m$$

🔍 Agitation thermique

Bruit intrinsèque

et l'enjeu d'une lecture skipper

1 Domaine temporel :

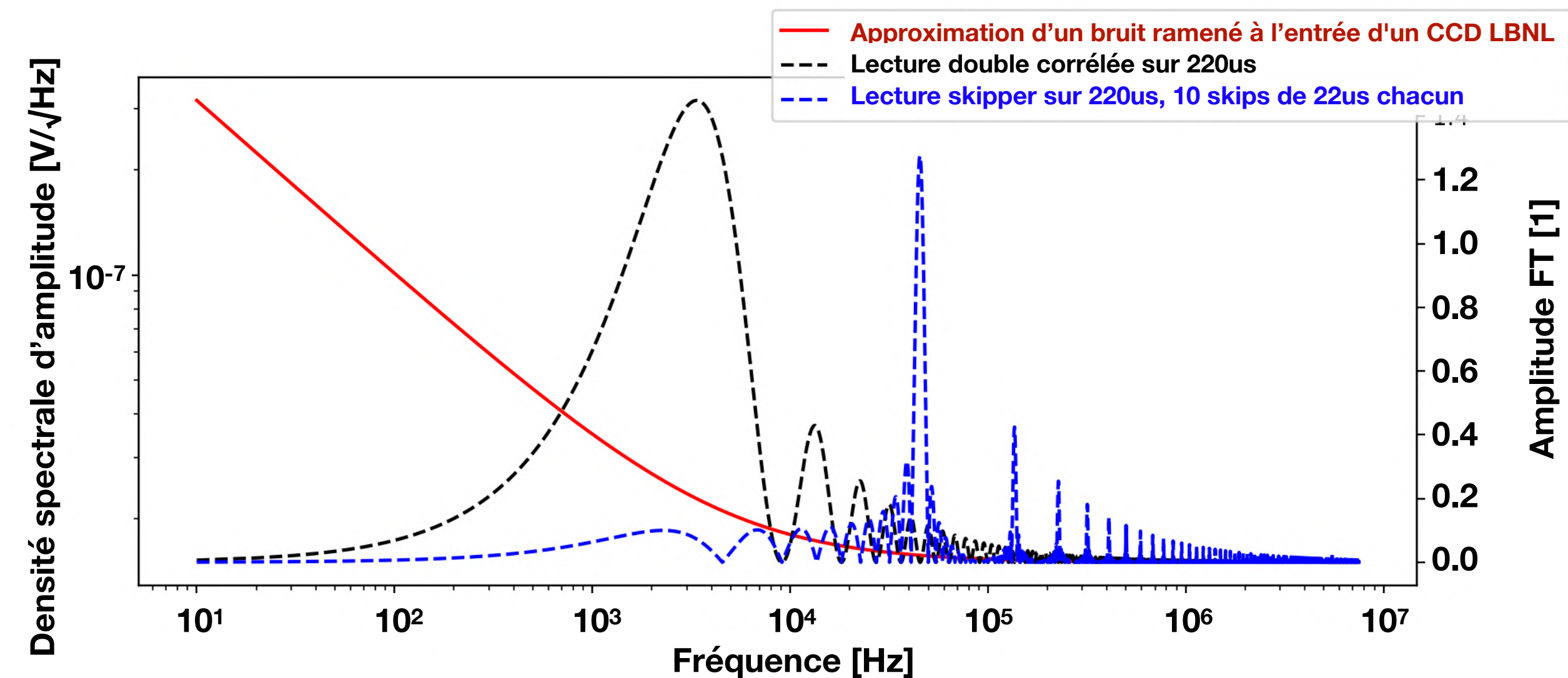


Lecture double corrélée
 $\geq 2e^-$

Lecture skipper
 $< 1e^-$

2 Domaine fréquentiel :

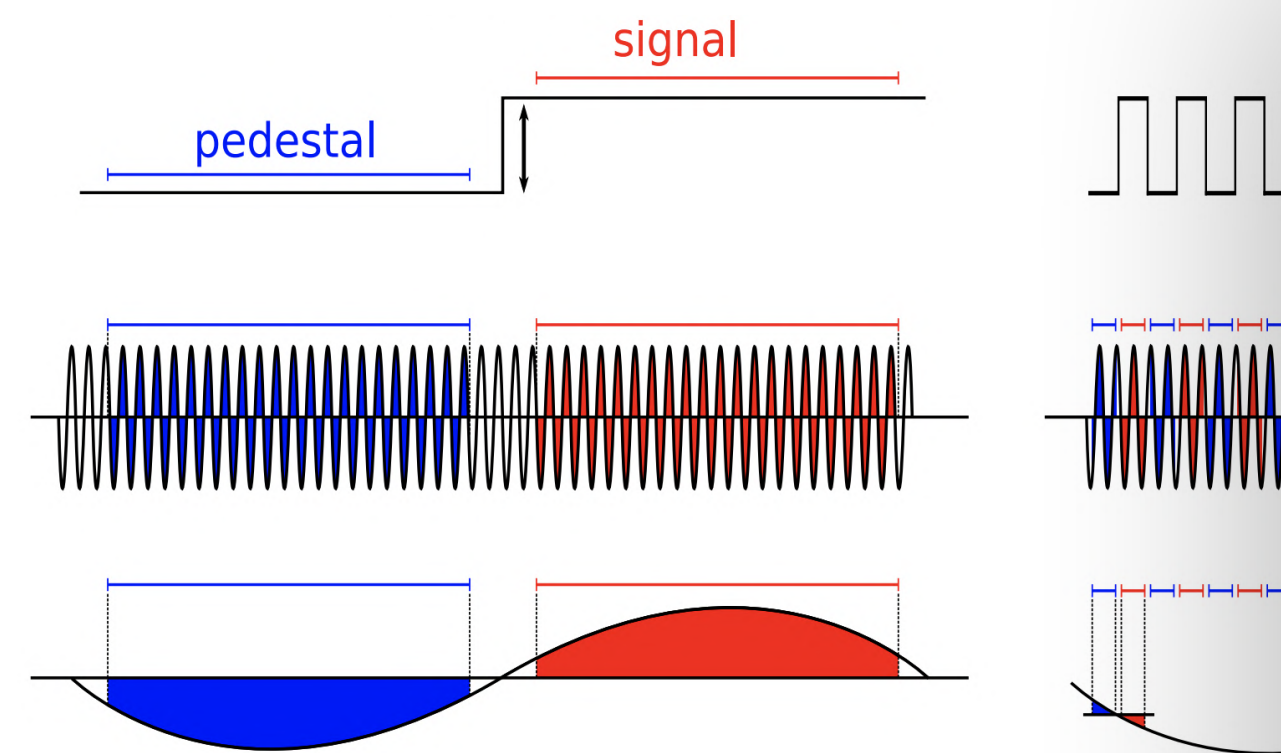
Comparaison fréquentielle des 2 lectures



Bruit intrinsèque

et l'enjeu d'une lecture skipper

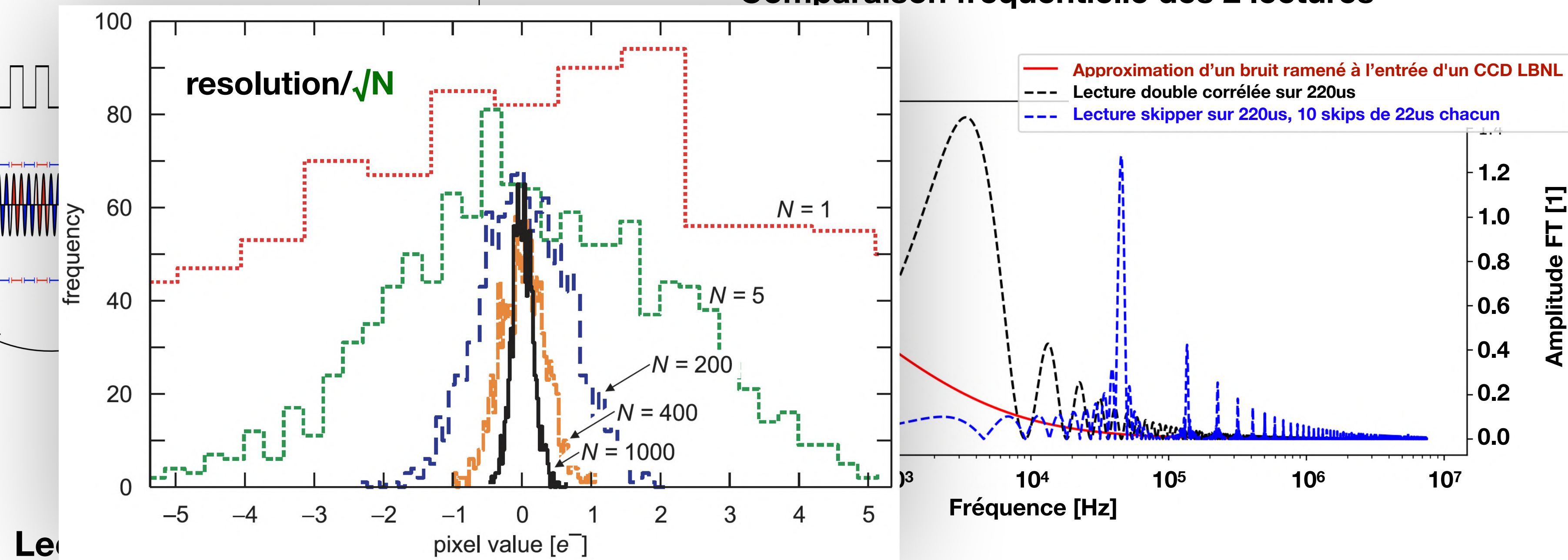
1 Domaine temporel :



Lecture double corrélée
 $\geq 2e^-$

2 Domaine fréquentiel :

Comparaison fréquentielle des 2 lectures



$< 1e^-$

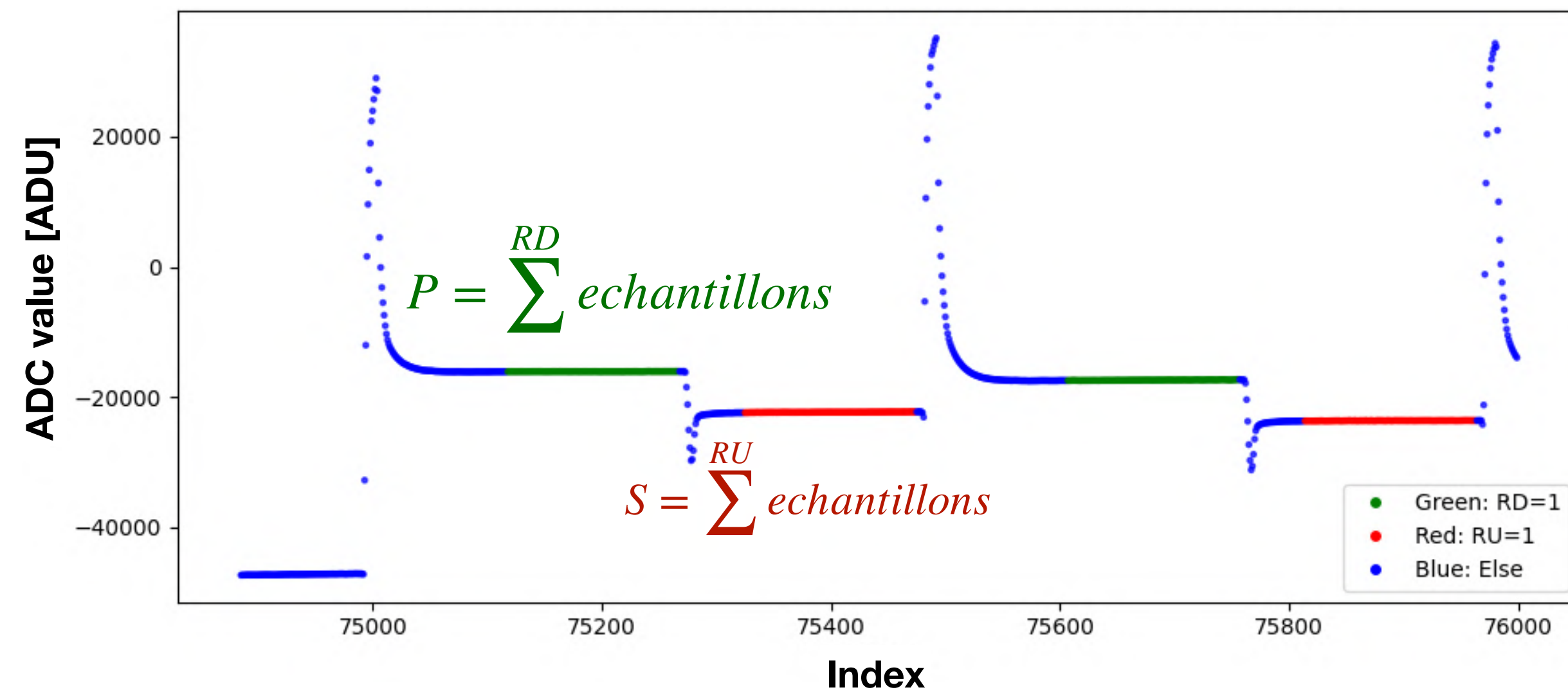
Bruit intrinsèque

et l'enjeu d'une lecture skipper

Implémentation firmware :

$$valeur_du_pixel = \frac{1}{skips} \sum_1^{skips} (S - P)$$

FPGA
DAQ

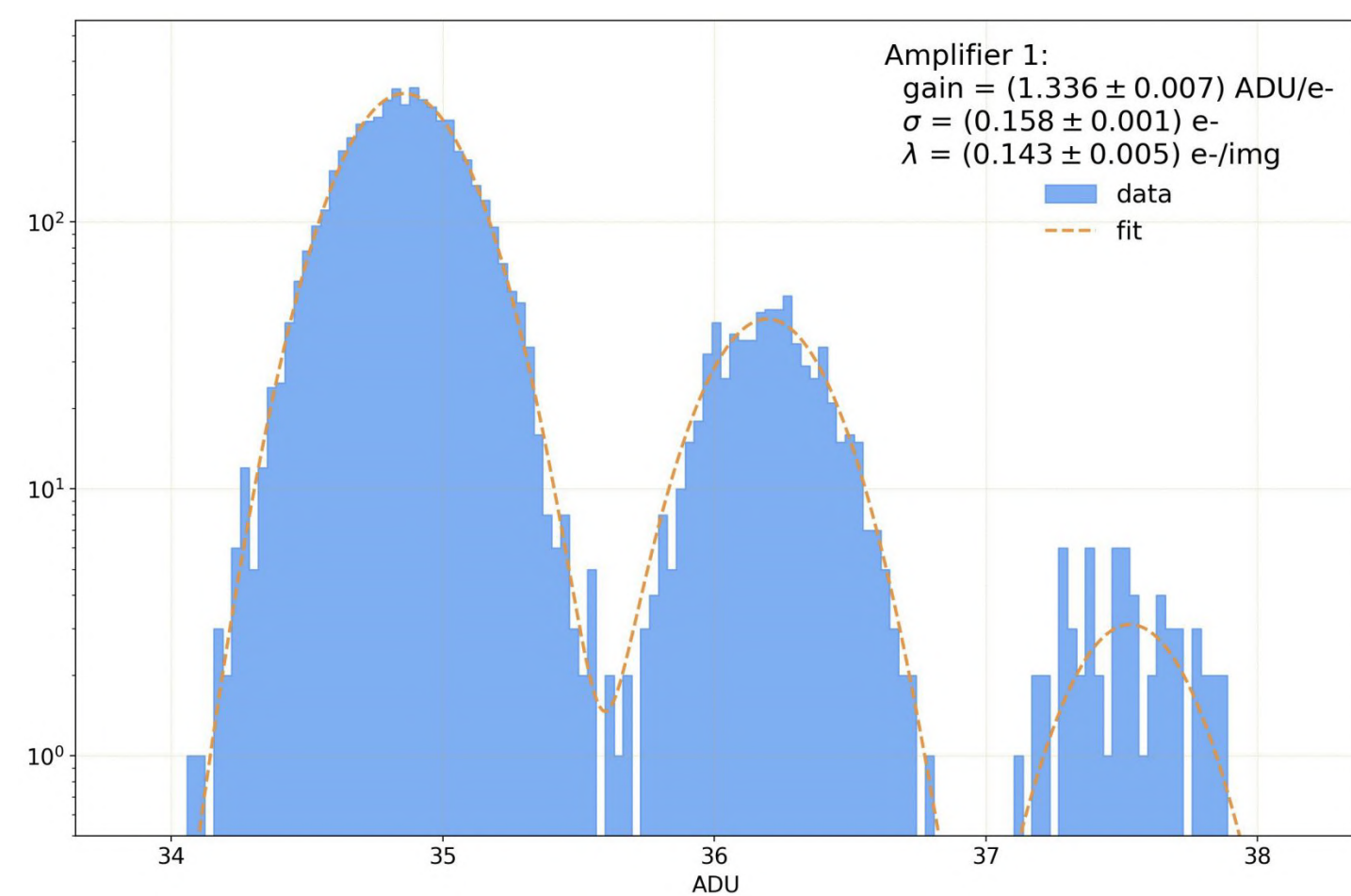
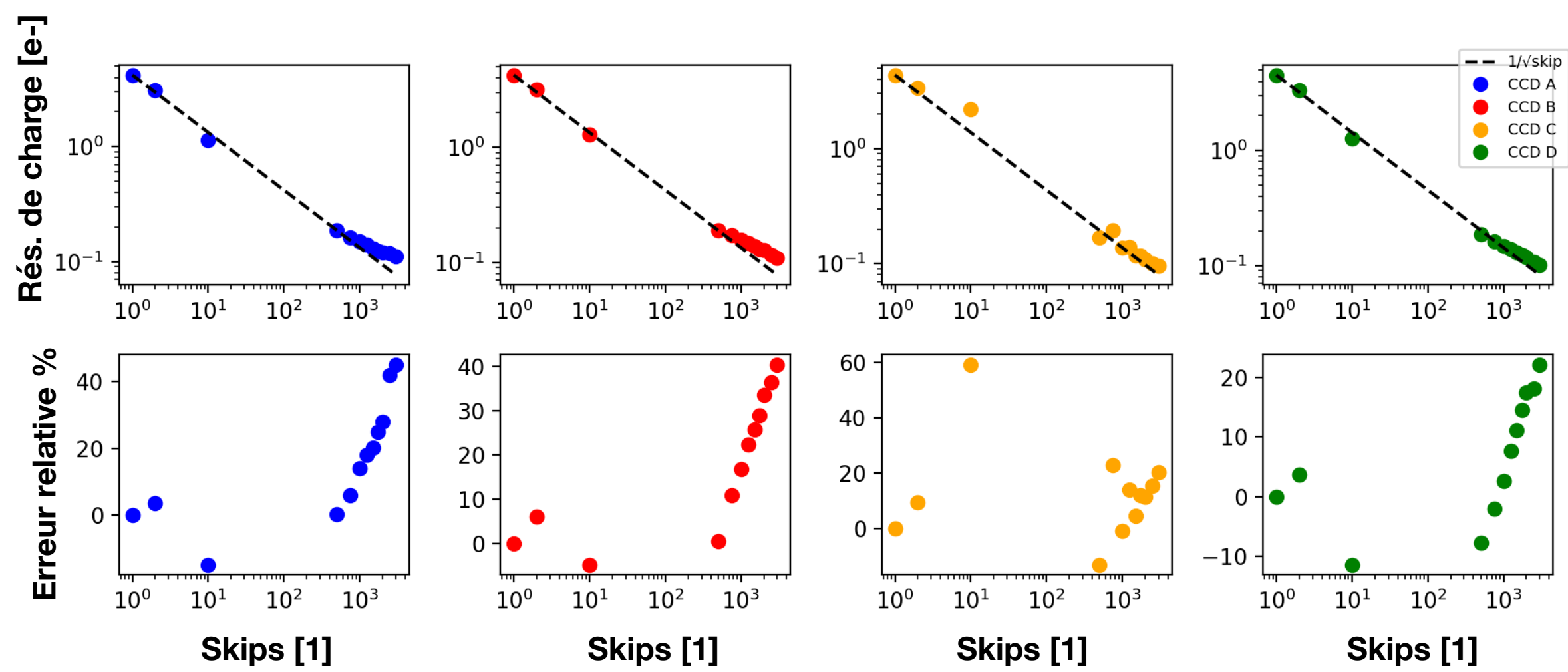
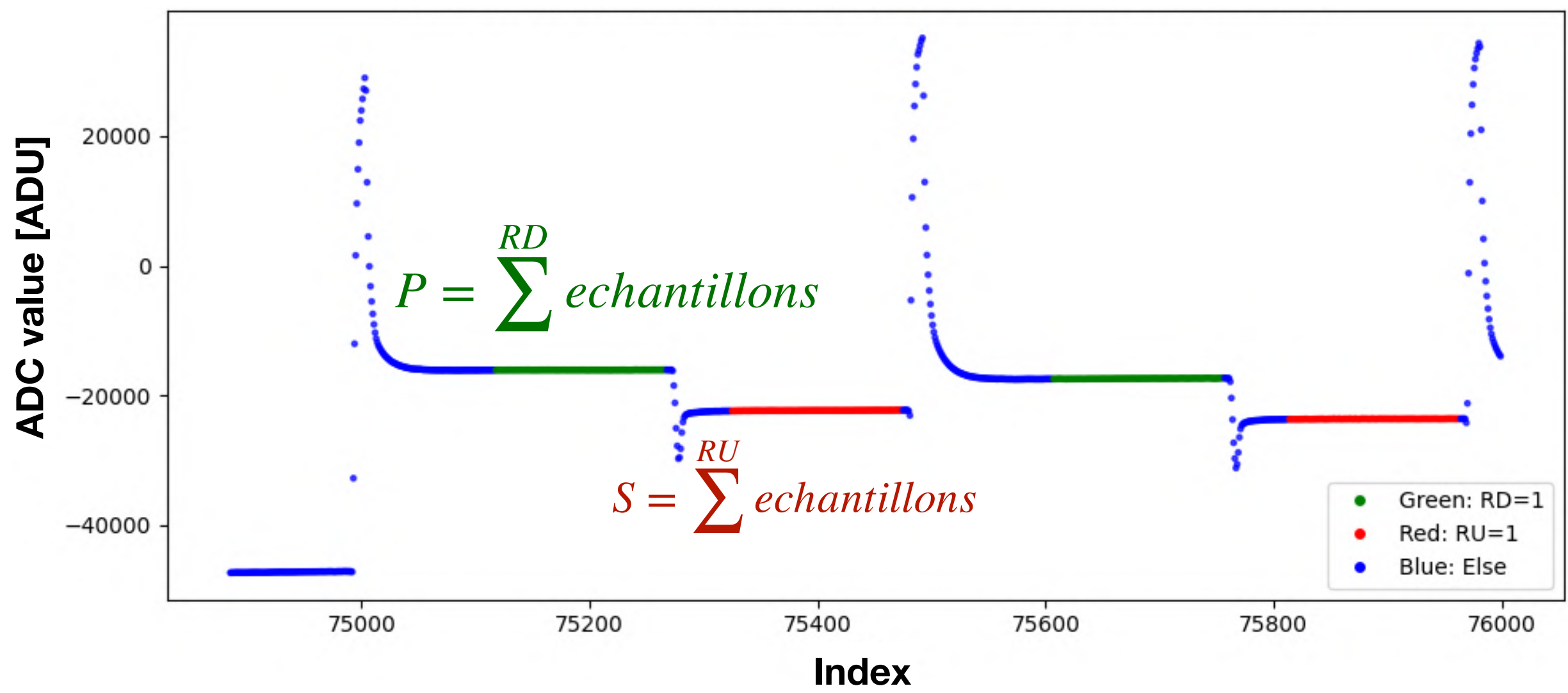


Bruit intrinsèque

et l'enjeu d'une lecture skipper

Implémentation firmware :

$$valeur_du_pixel = \frac{1}{\underbrace{skips}_{\text{DAQ}}} \sum_1^{\underbrace{skips}_{\text{FPGA}}} (S - P)$$



➔ Résolution de **0.158 e⁻** à 500 skips

Bruit intrinsèque

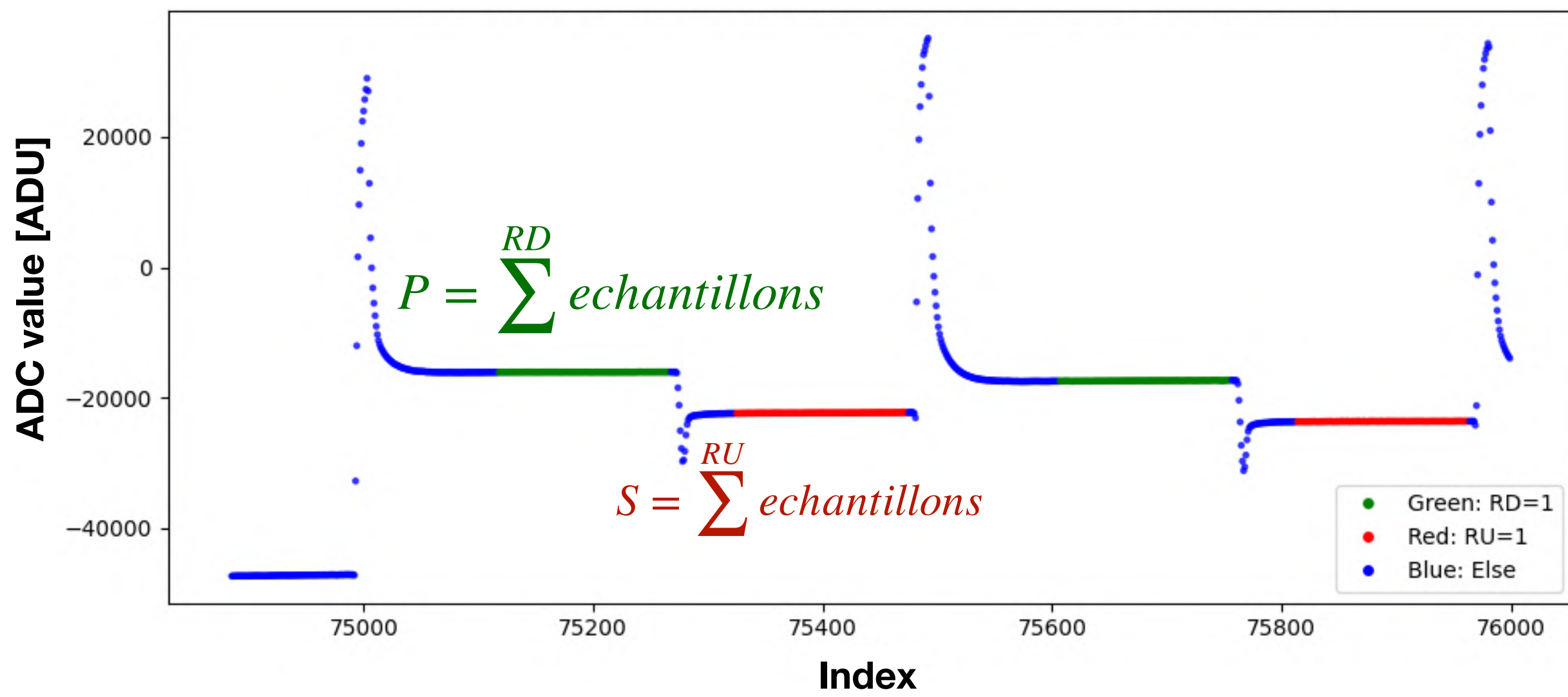
et contrôle de la lecture skipper

Implémentation firmware :

$$valeur_du_pixel = \frac{1}{skips} \sum_1^{skips} (S - P)$$

FPGA

DAQ



➔ Introduction de niveaux de **verbosité**

Niveau de verbosité	Flux de données
2	Valeur du pixel
1	Valeur des rampes intégrées (P , S)
0	Données brutes (Échantillons d'ADCs à 15MHz)

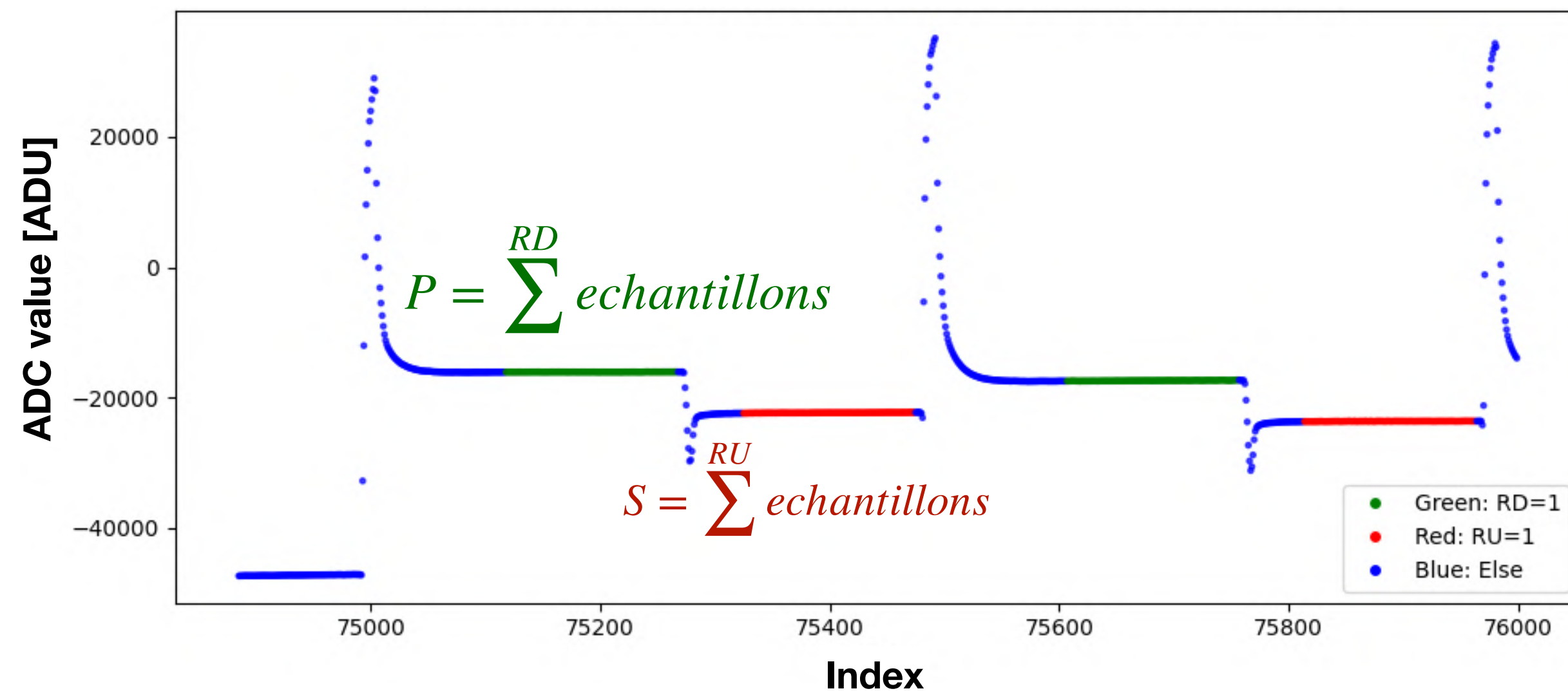
Bruit intrinsèque

et contrôle de la lecture skipper

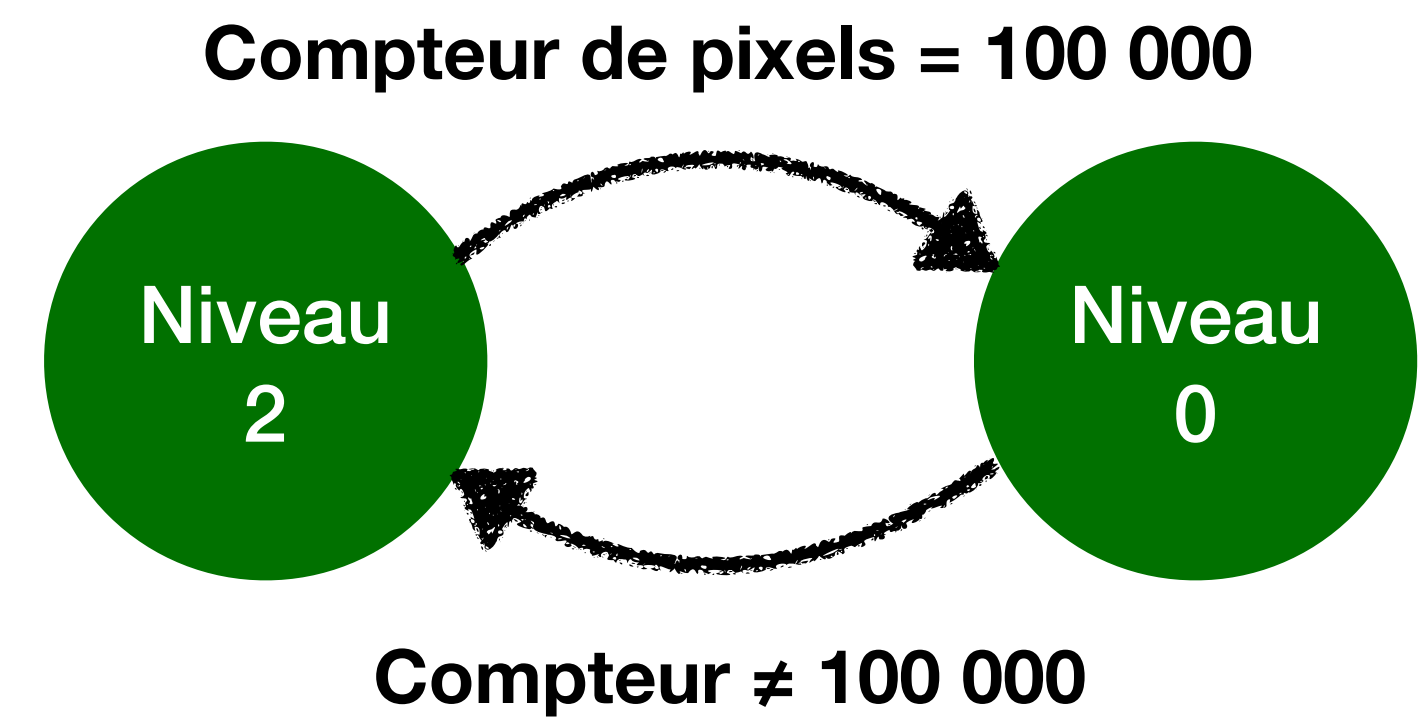
Implémentation firmware :

$$valeur_du_pixel = \frac{1}{skips} \sum_1^{skips} (S - P)$$

■ FPGA
■ DAQ



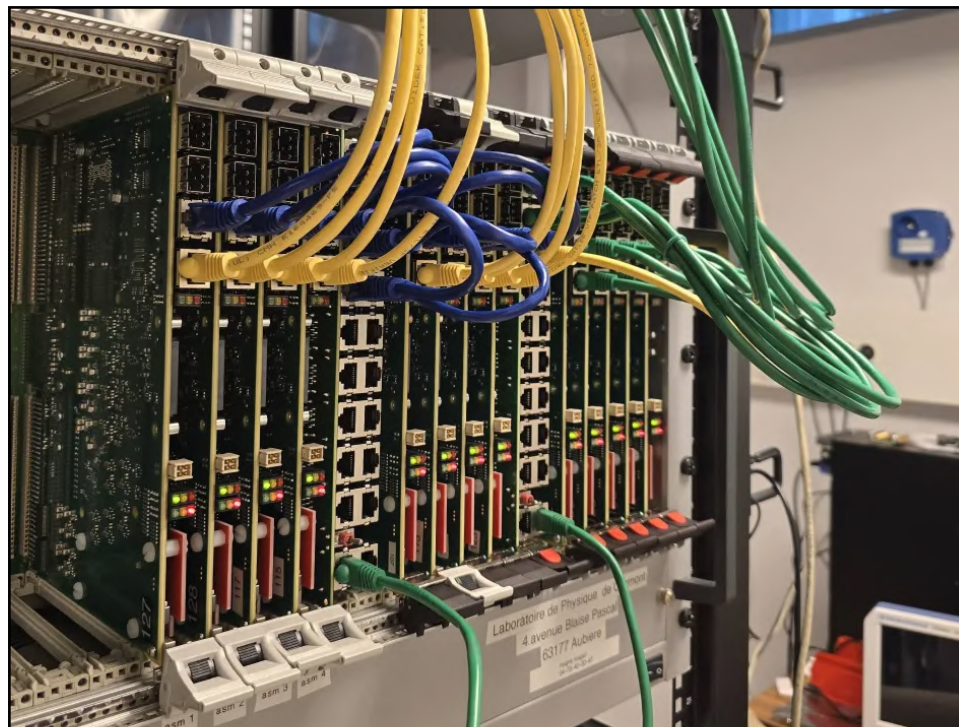
→ Introduction d'un système de contrôle de la **qualité** et de l'**intégrité** des données



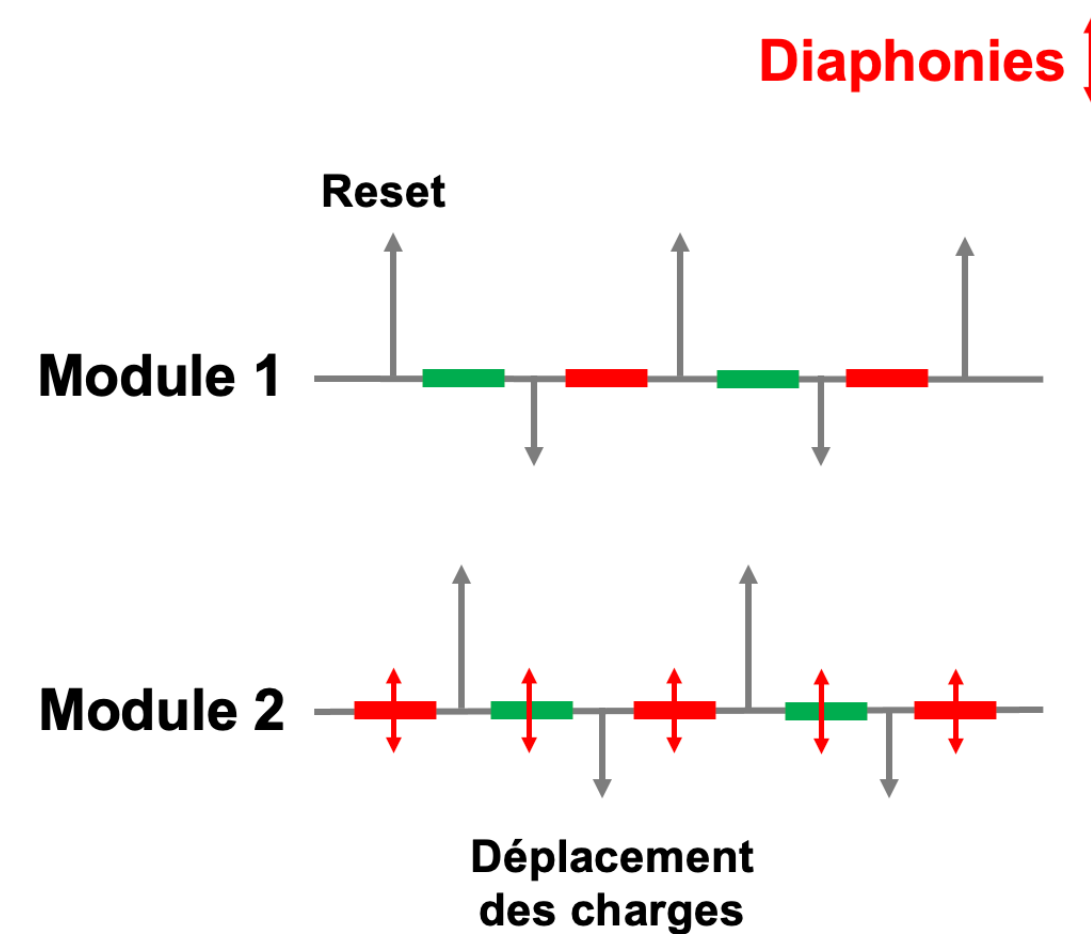
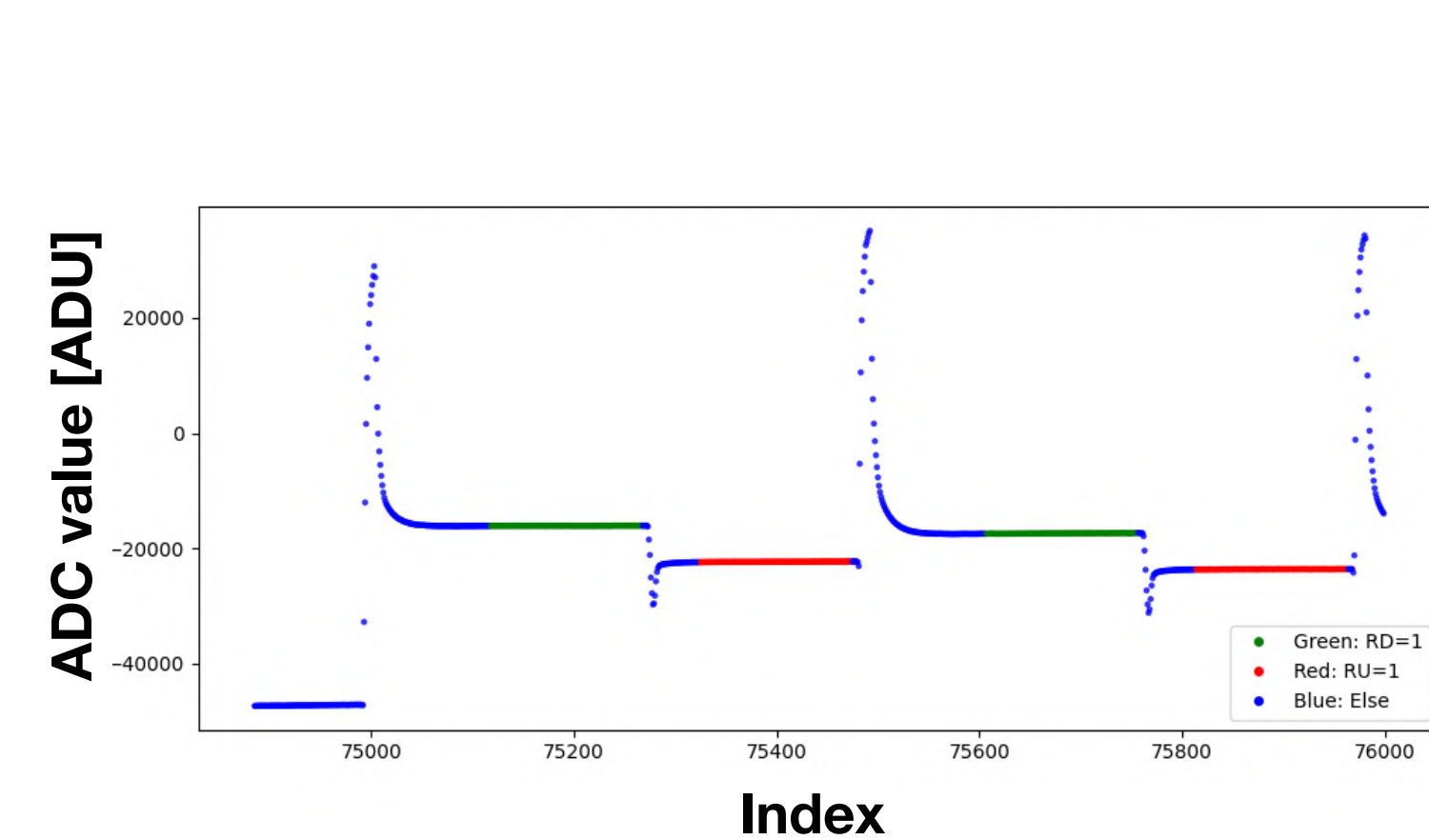
Bruit d'interférence

Bruit d'interférence

Diaphonie

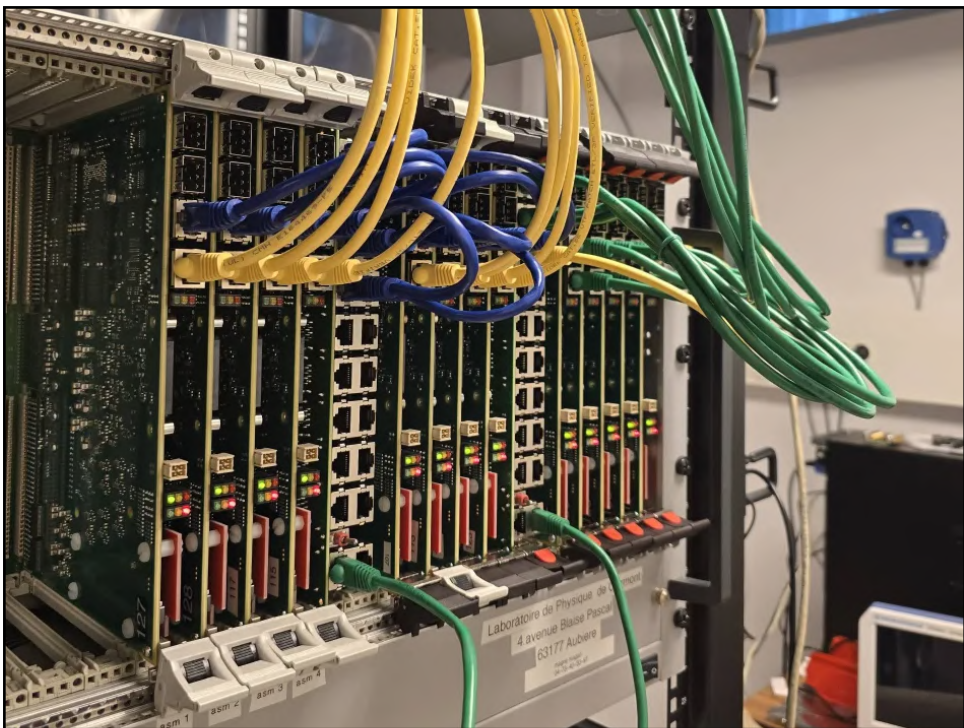


- 52 chaînes d'acquisition
- Réparties en 3 groupes

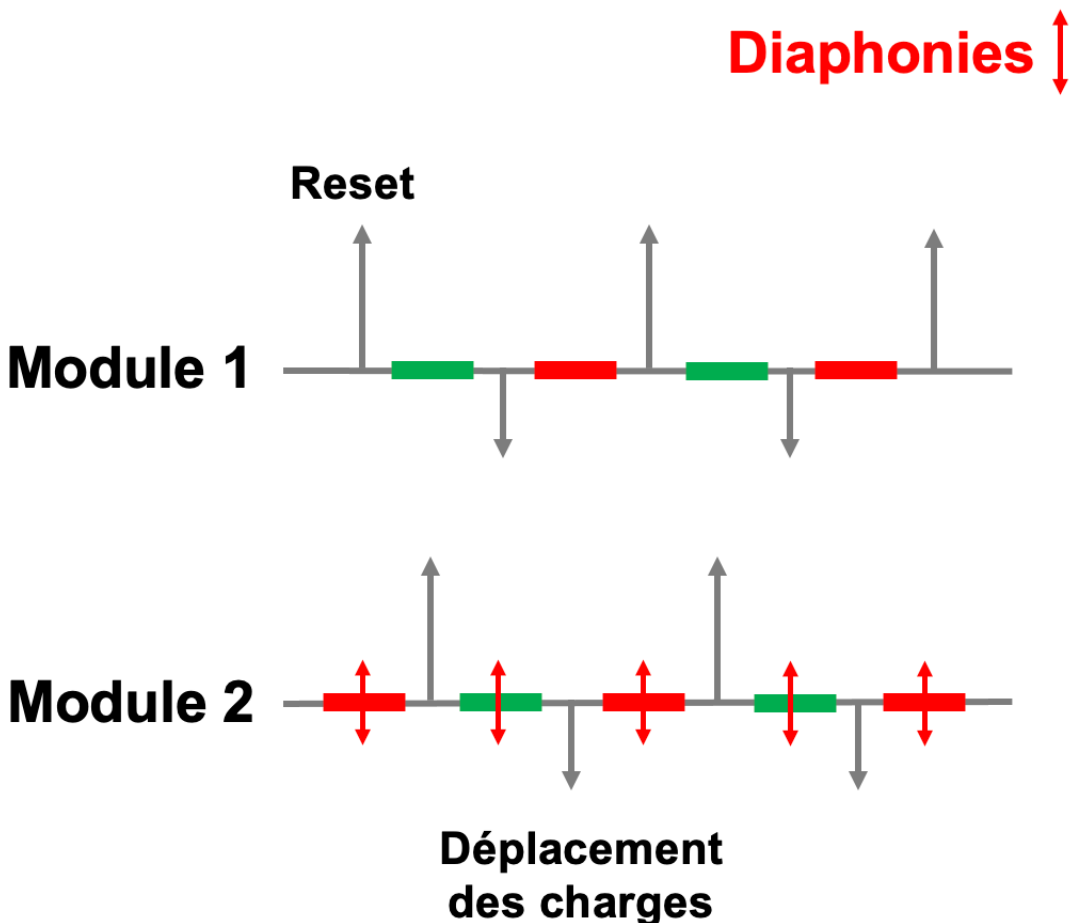
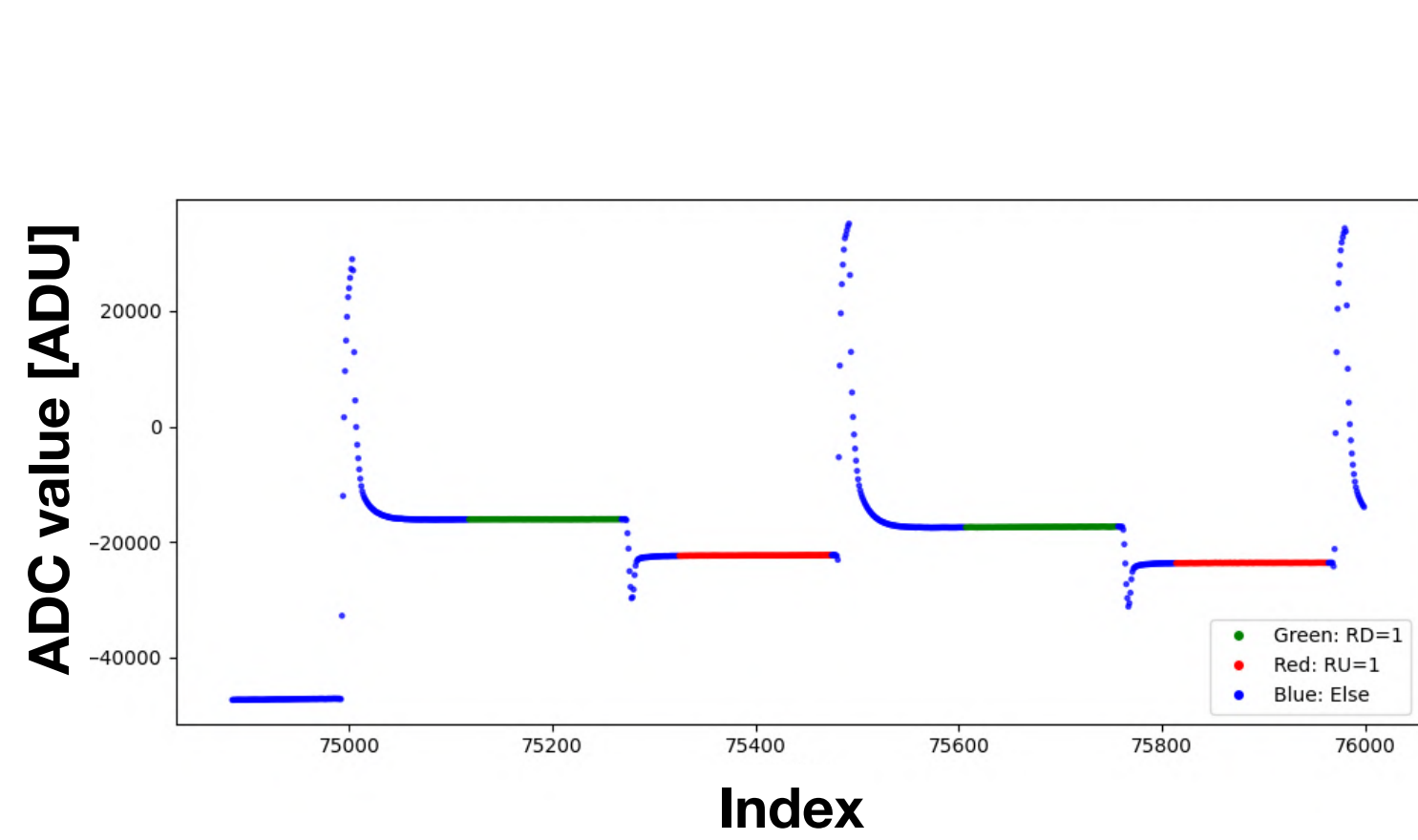


Bruit d'interférence

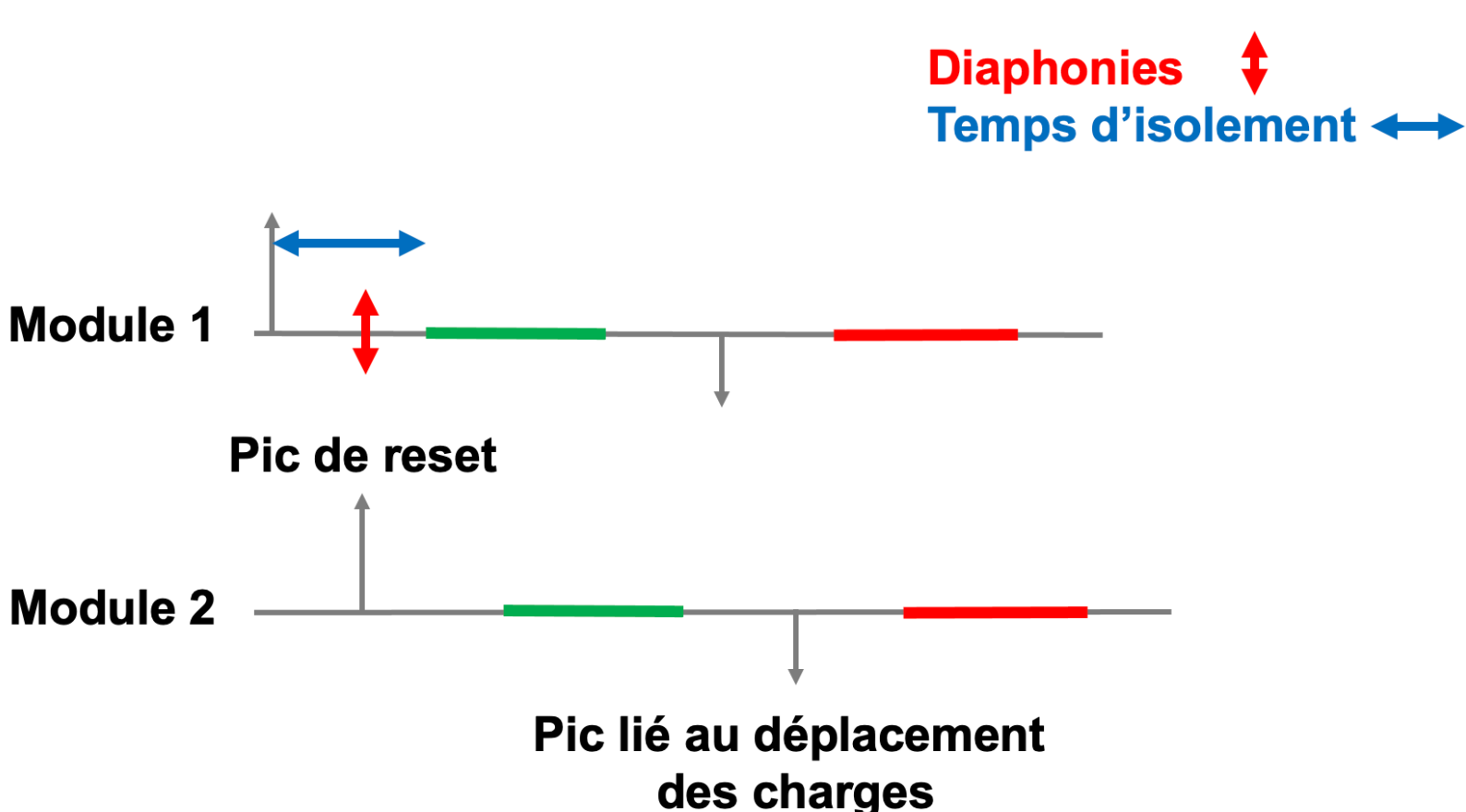
Diaphonie



- 52 chaînes d'acquisition
- Réparties en 3 groupes

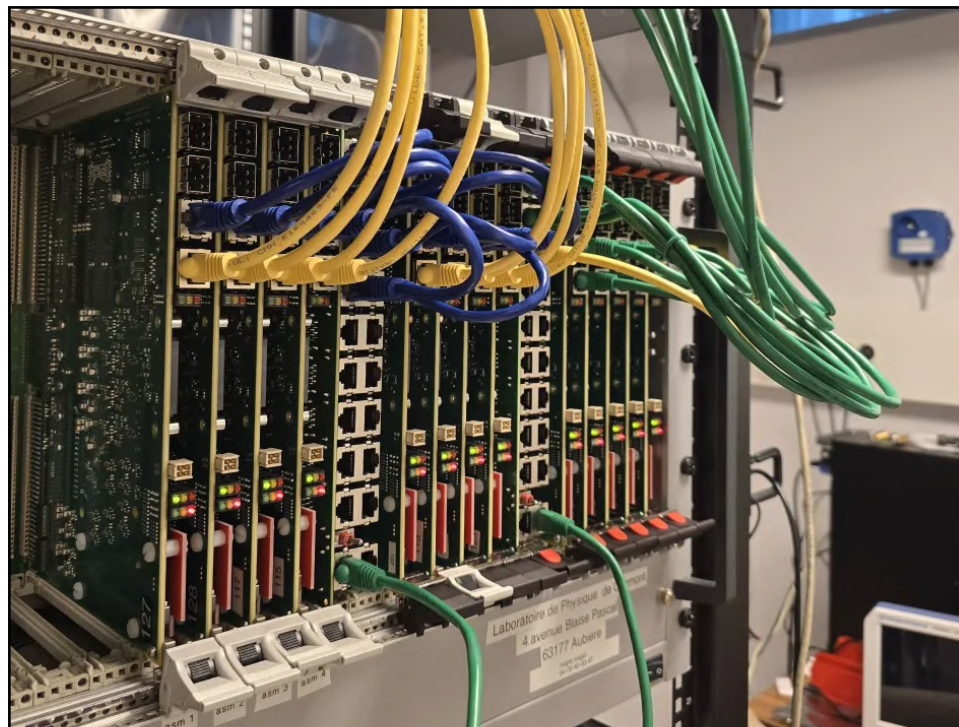


- ✓ Déclenchement simultanée
- Temps d'isolement ($\sim \mu s$)
- Écart toléré de **100ns**

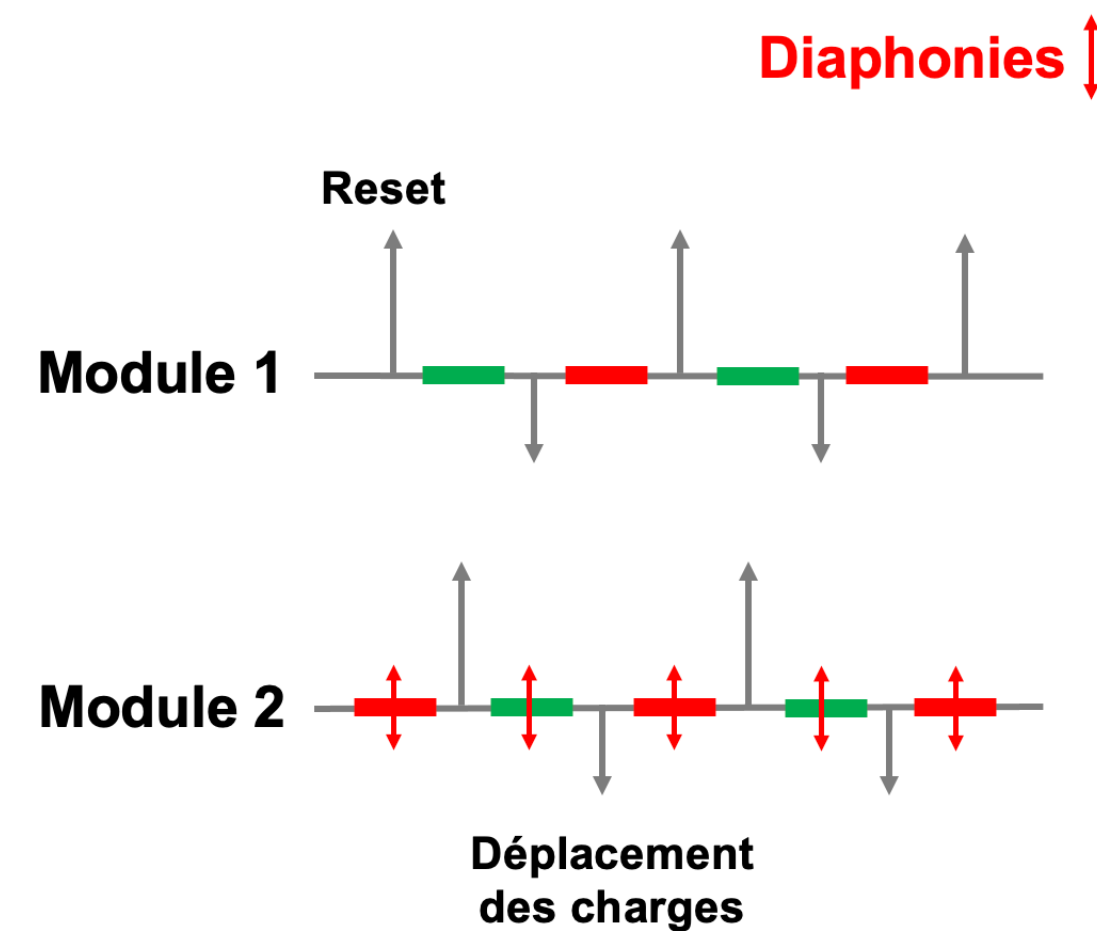
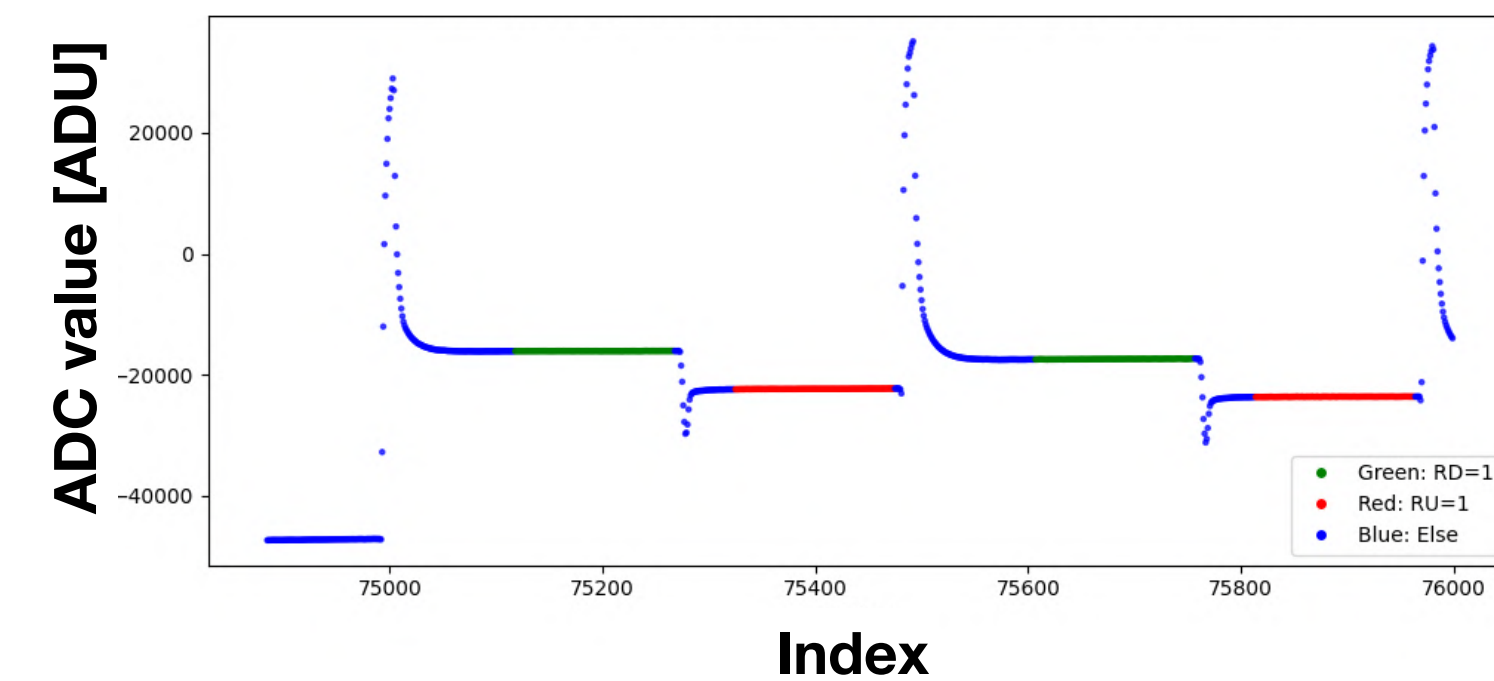


Bruit d'interférence

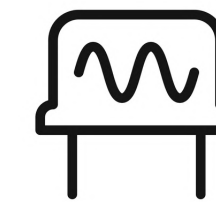
Diaphonie



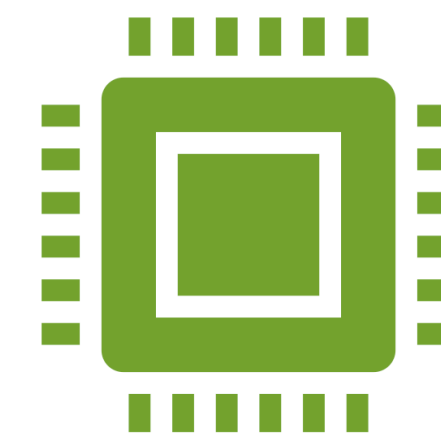
- 52 chaînes d'acquisition
- Réparties en 3 groupes



Minimisation de la dérive des séquences



Oscillateur



FPGA



Stabilité d'horloge de **± 50 ppm**

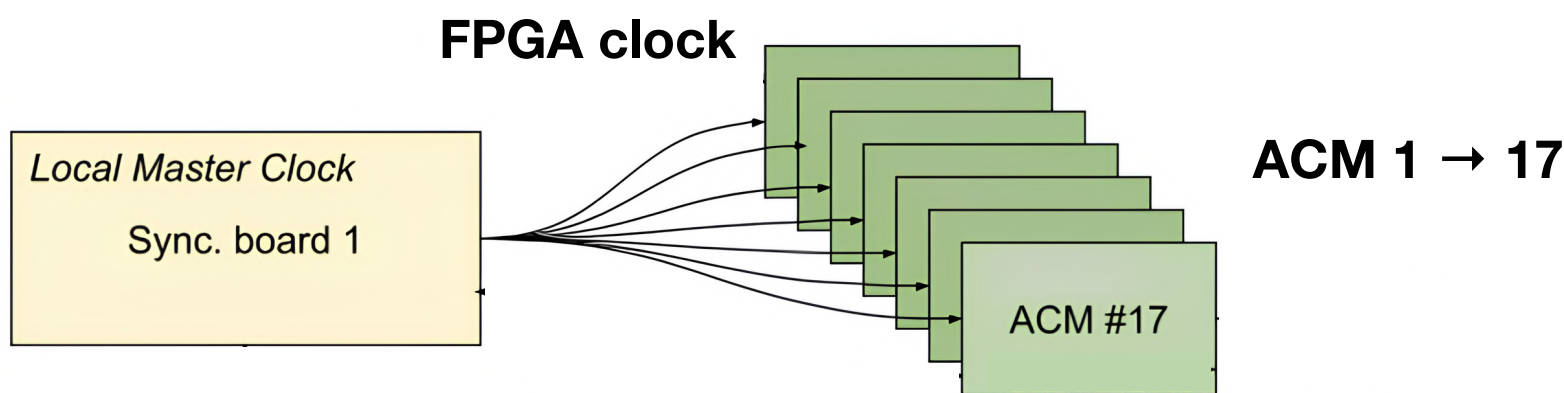


Une dérive de l'ordre de **$50\mu\text{s}$**
par seconde de lecture.

Systeme de synchronisation de DAMIC-M

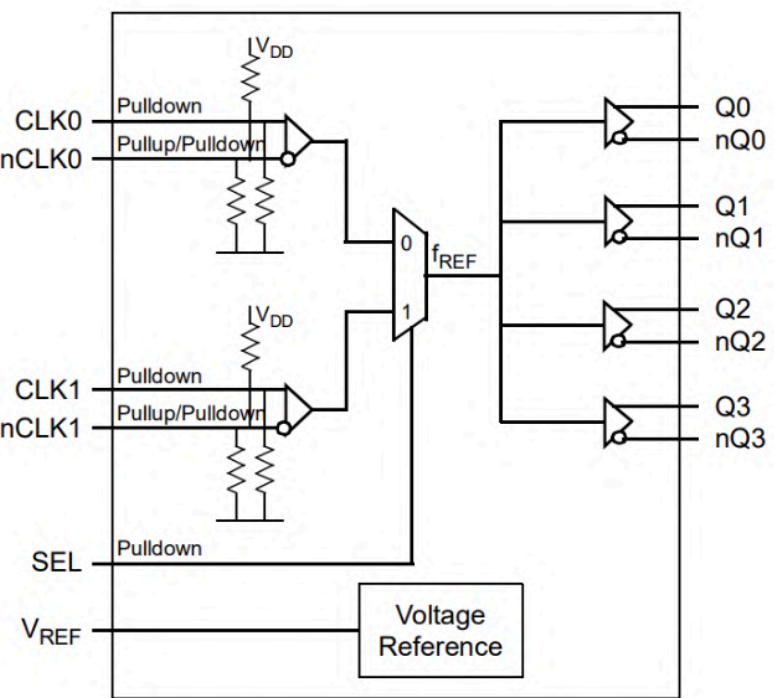
Horloge commune

Etude technique

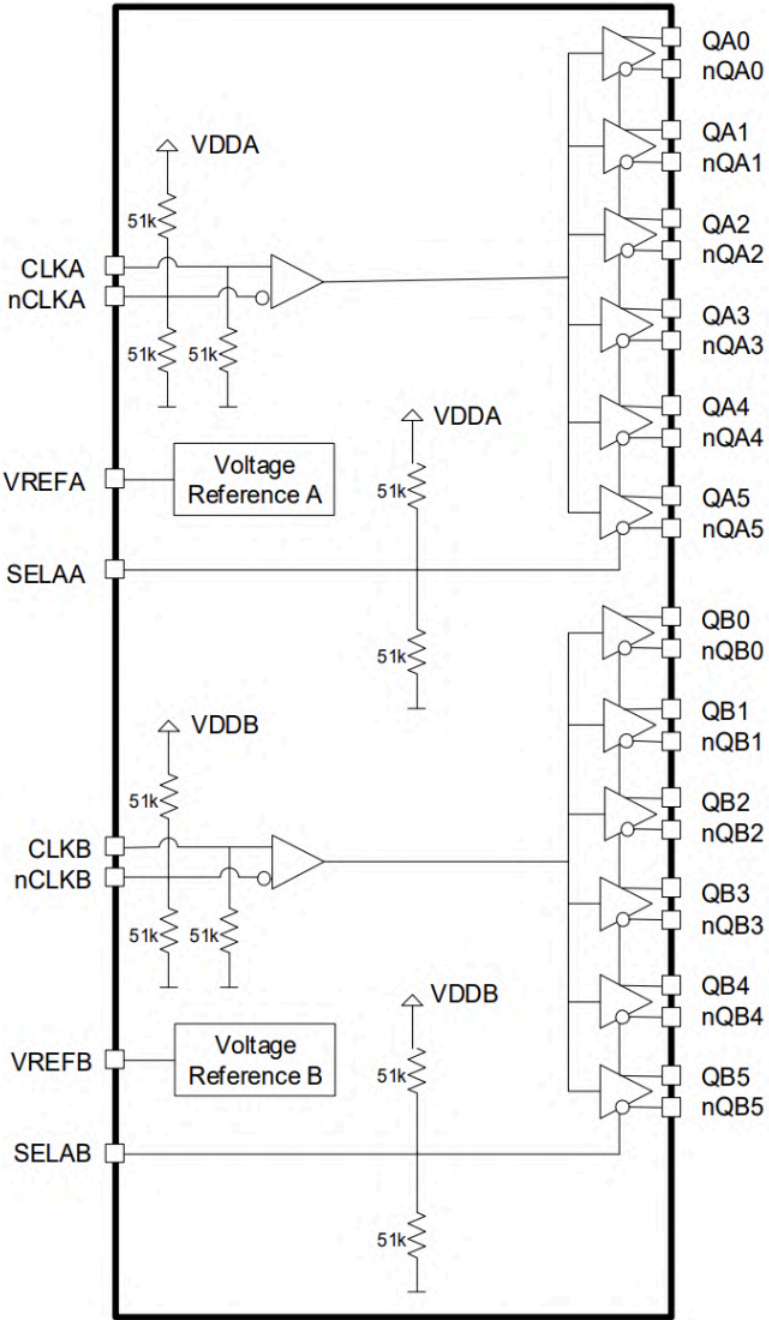


Réalisation technique

Oscillateur interne



(a) 8P34S1204

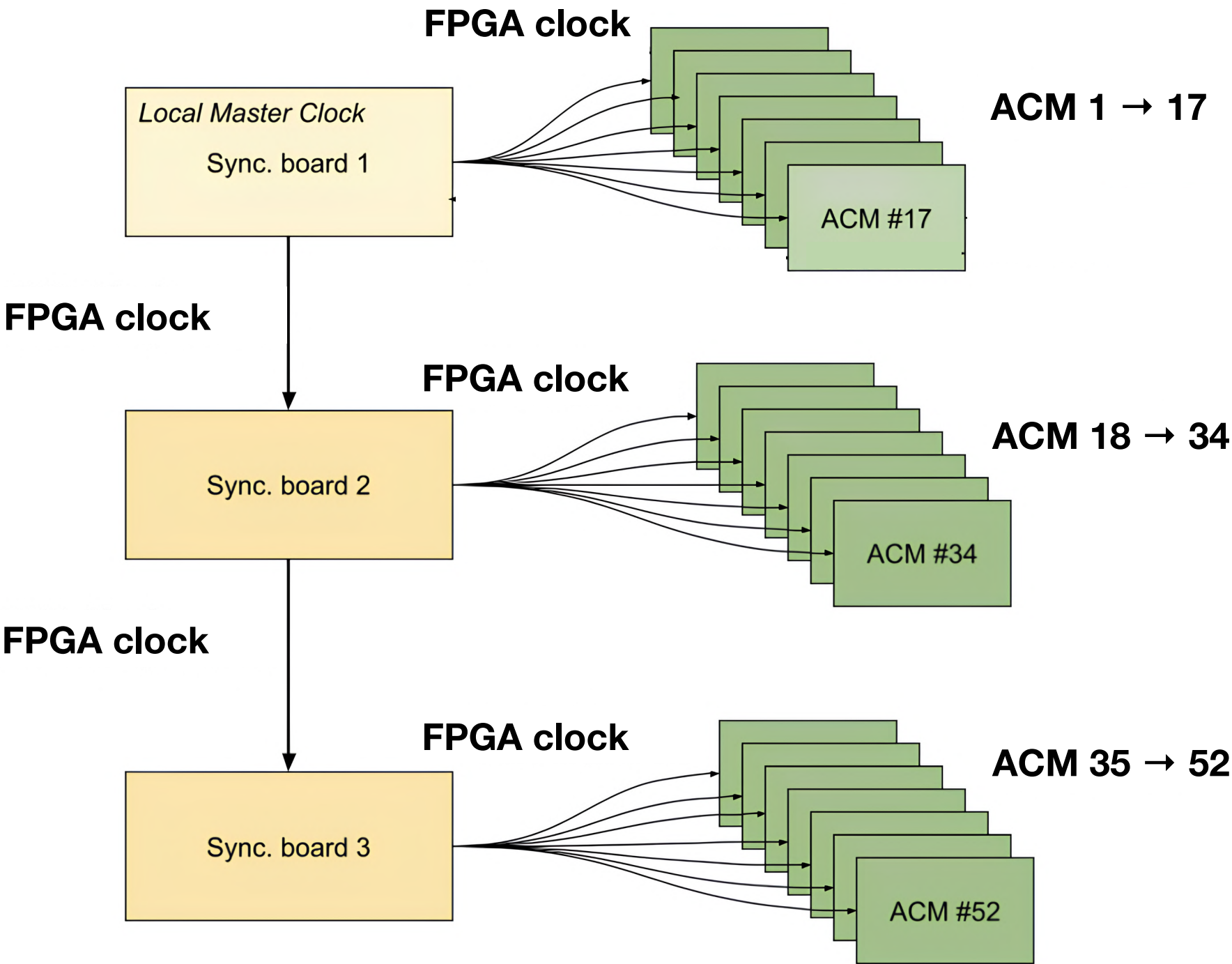


(b) 8P34S2106A (x2)

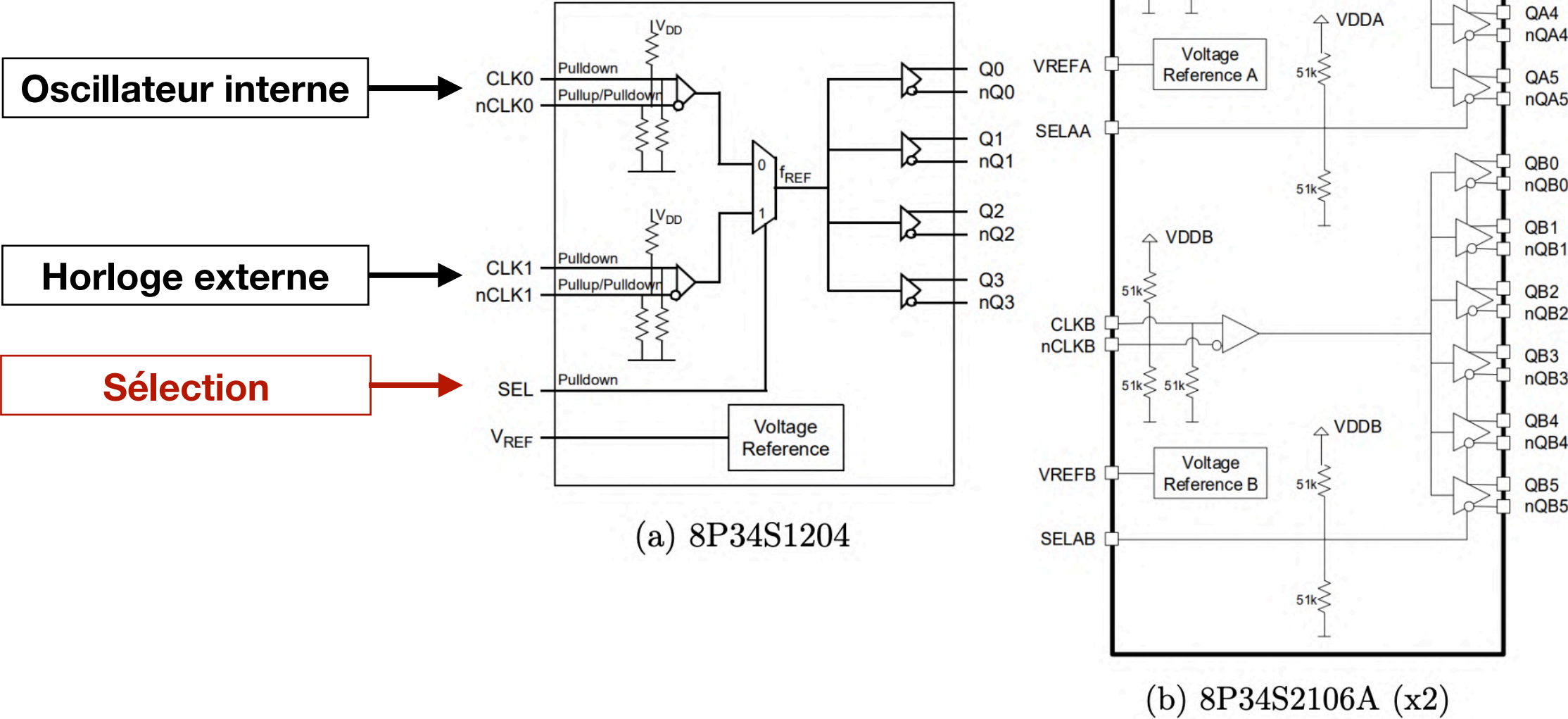
Systeme de synchronisation de DAMIC-M

Horloge commune

Etude technique



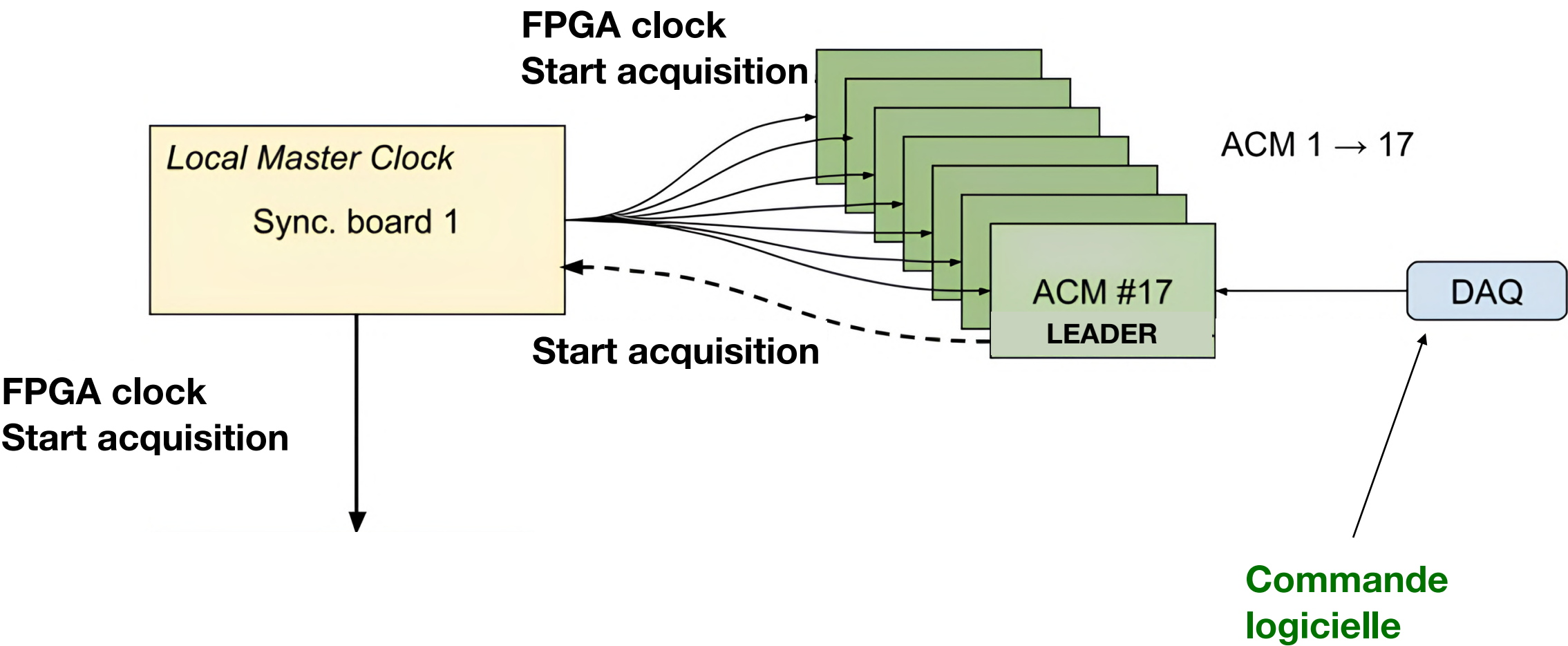
Réalisation technique



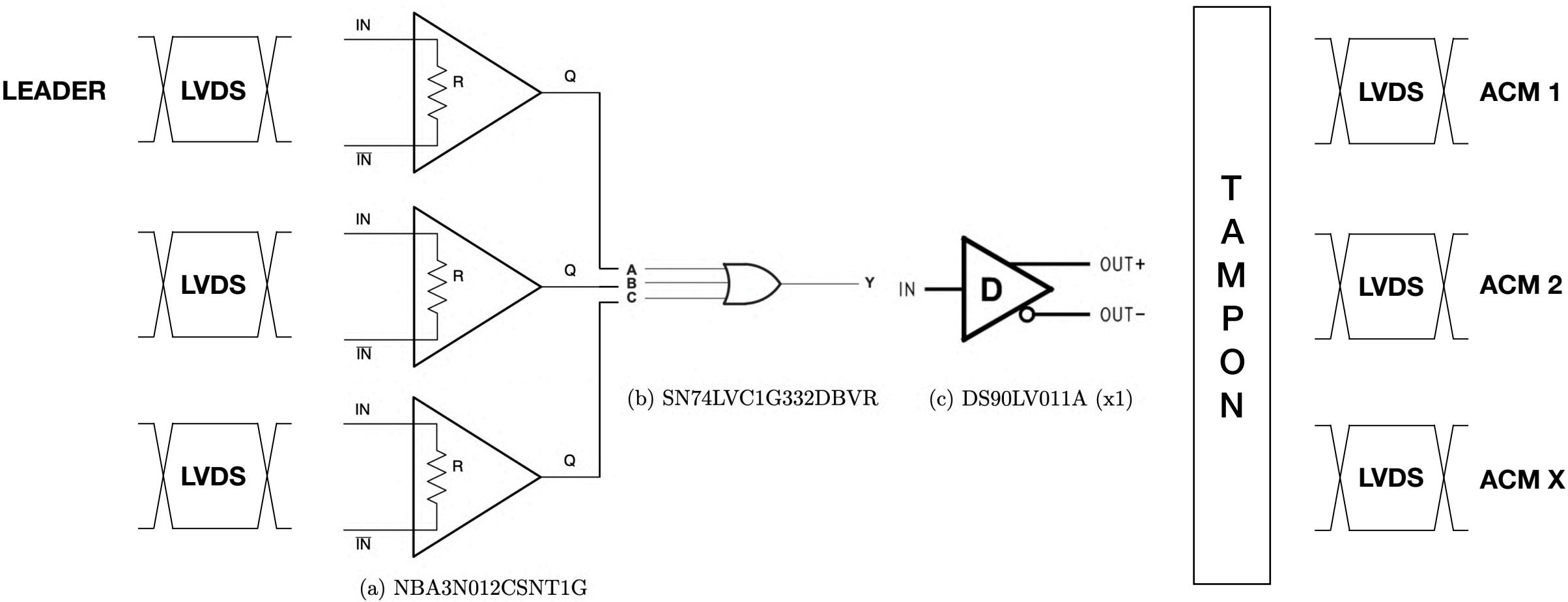
Systeme de synchronisation de DAMIC-M

Déclencheur

Etude technique

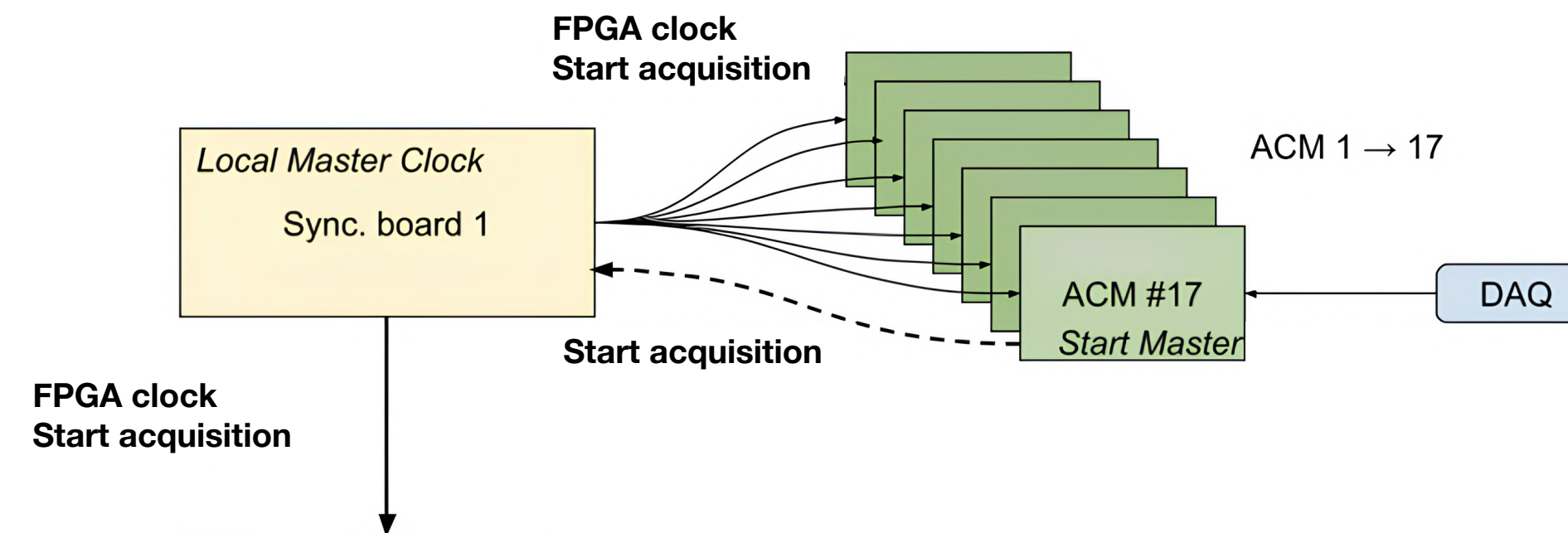


Réalisation technique

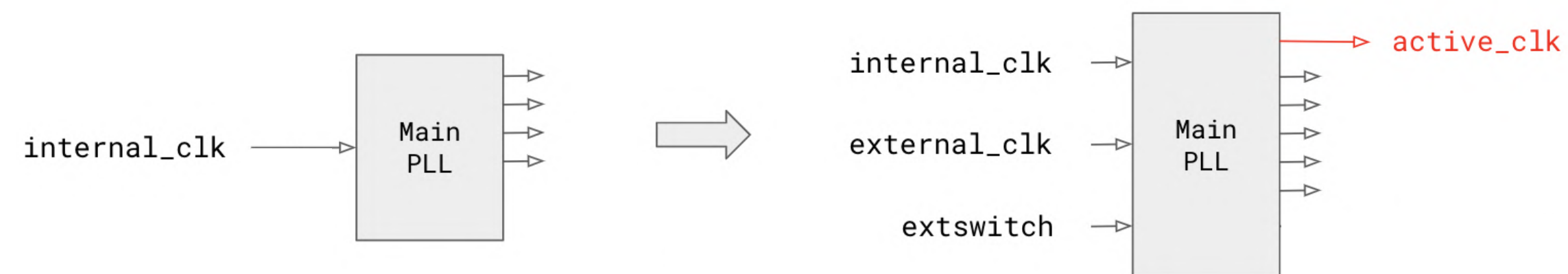


Système de synchronisation de DAMIC-M

Électronique numérique

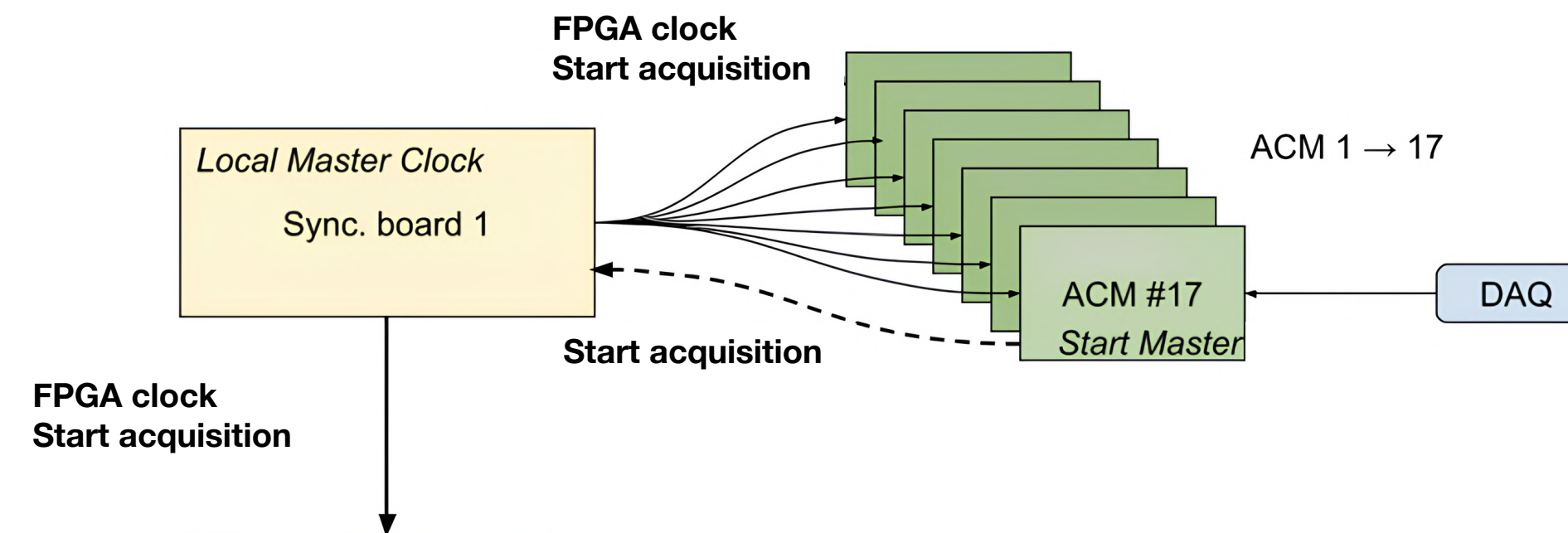


Adaptation du firmware à la lecture synchrone

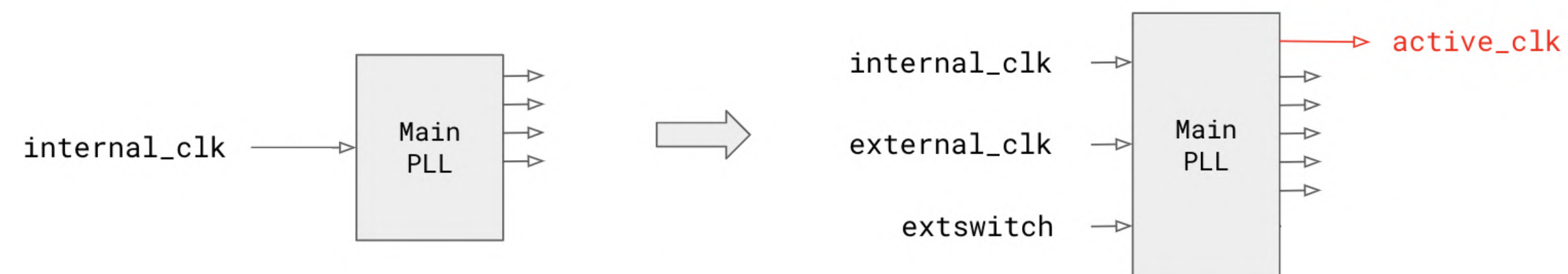


Système de synchronisation de DAMIC-M

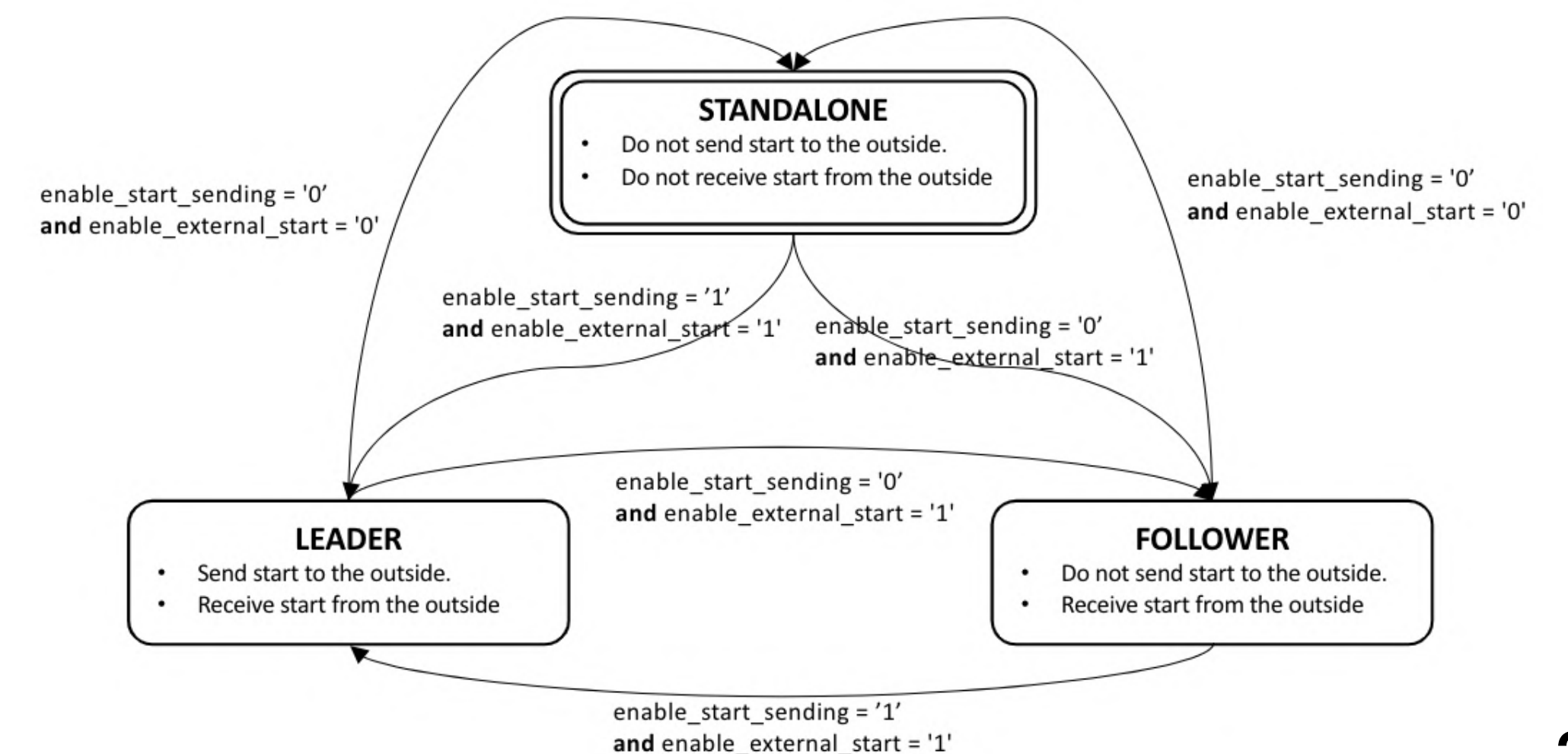
Électronique numérique



Adaptation du firmware à la lecture synchrone

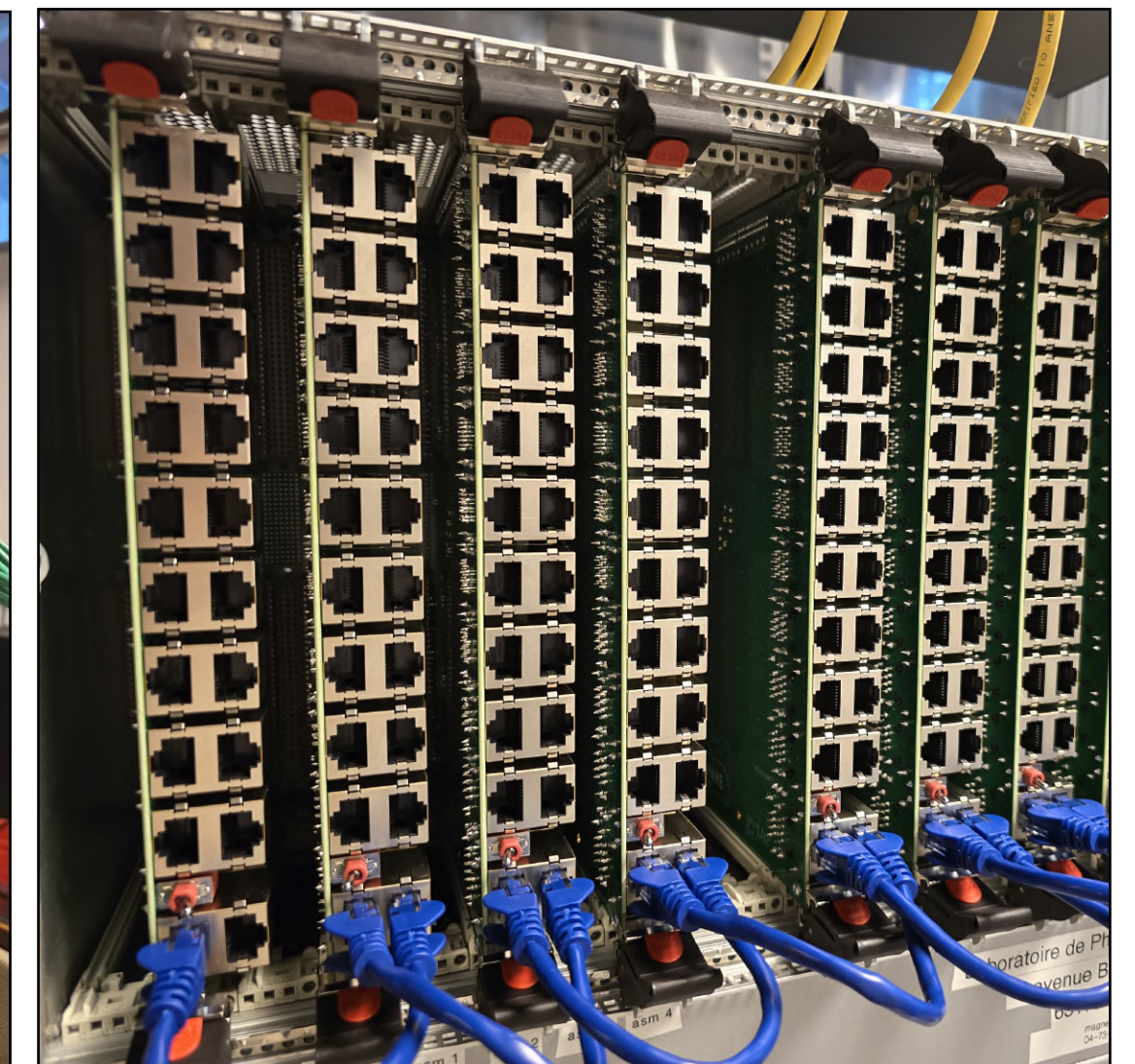
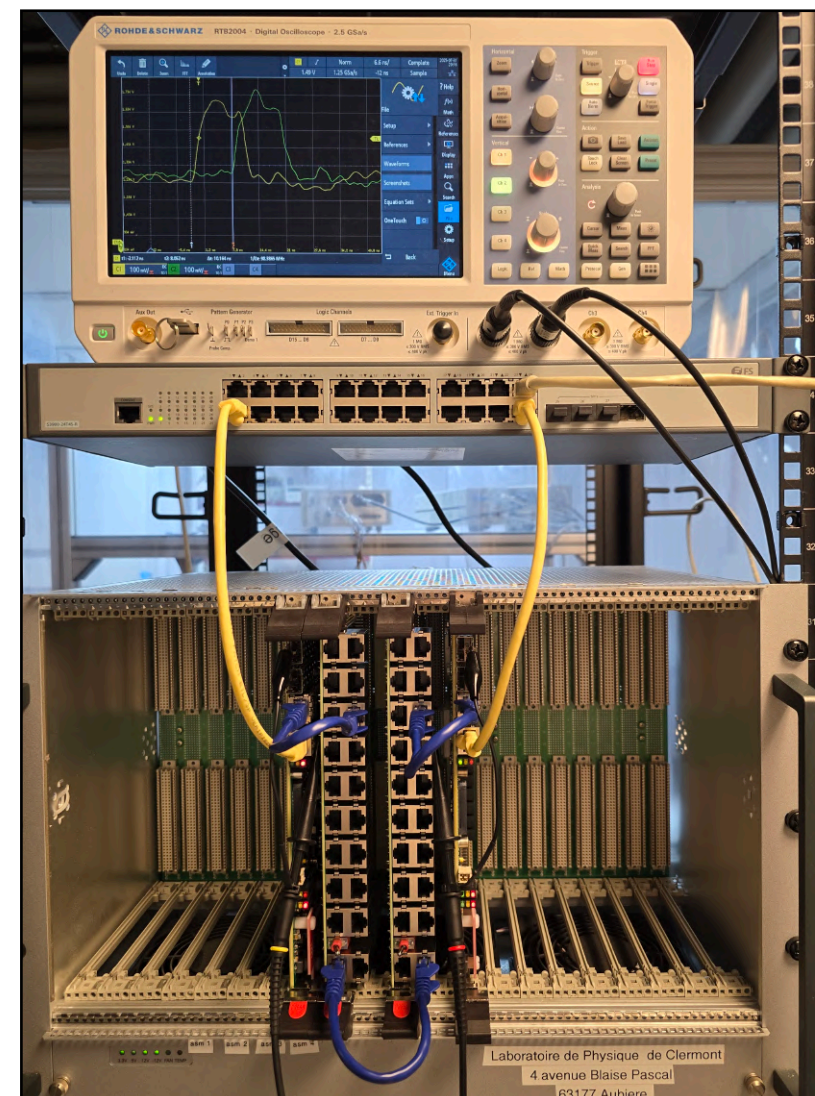
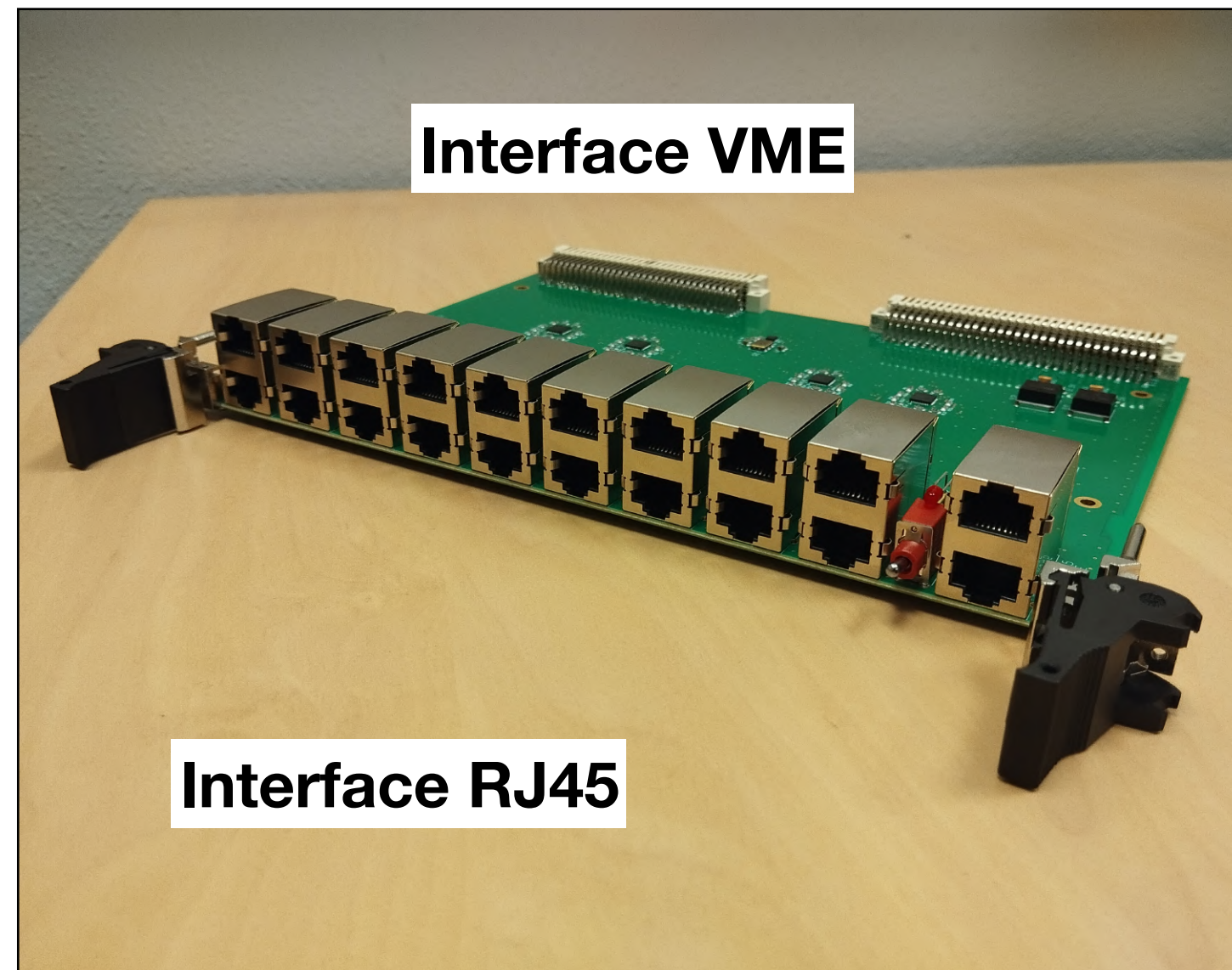


Implémentation firmware d'un système de synchronisation



Systeme de synchronisation de DAMIC-M

Production et qualification



➔ Cumul de plus de **7 mois**
de fonctionnement stable.

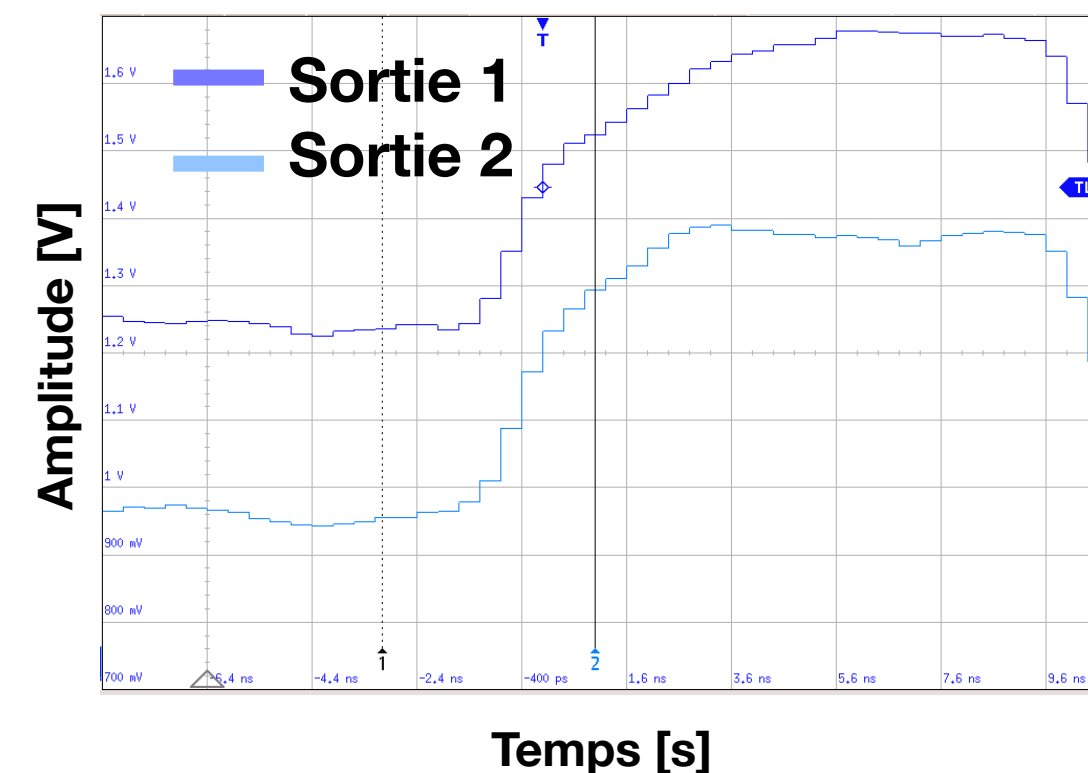
Systeme de synchronisation de DAMIC-M

Résultats

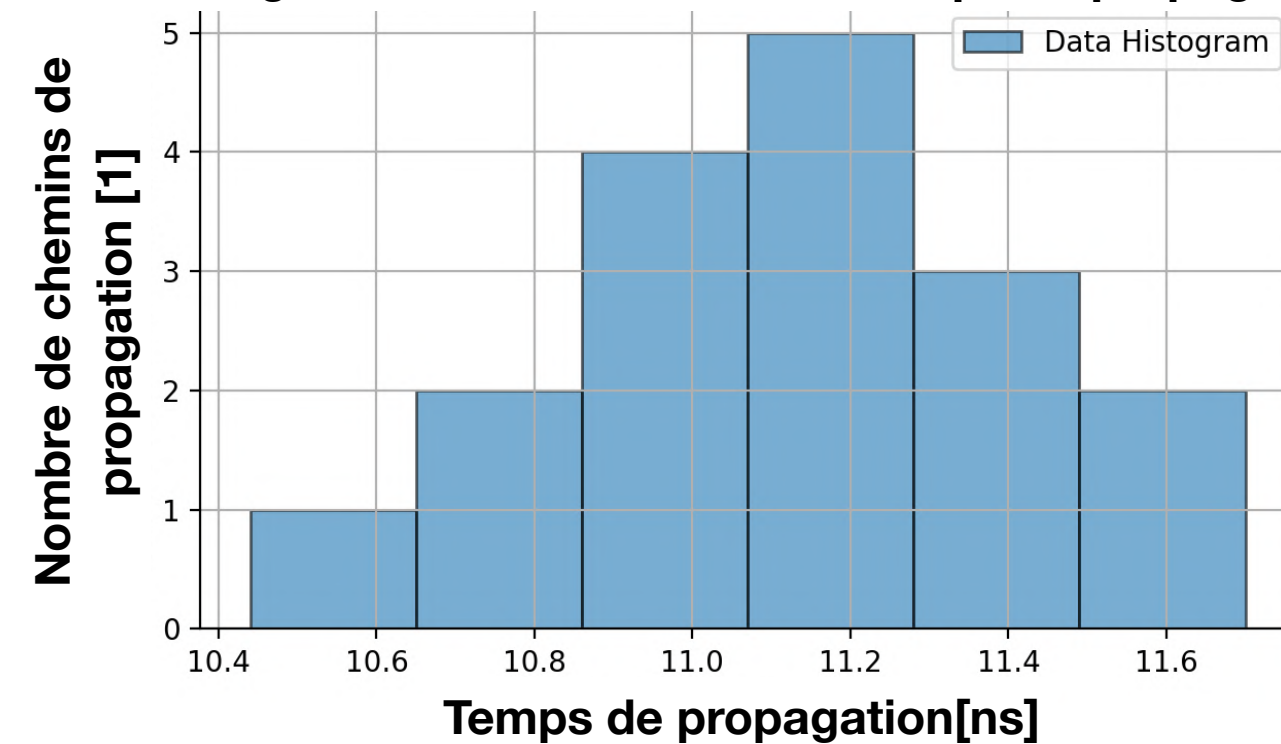
1 Temps de propagation du déclencheur:

- Sur la même carte de synchronisation : $< 1\text{ns}$
 - Sur 2 cartes de synchronisation chaînées : $\sim 11\text{ns}$
- $< 100\text{ns}$

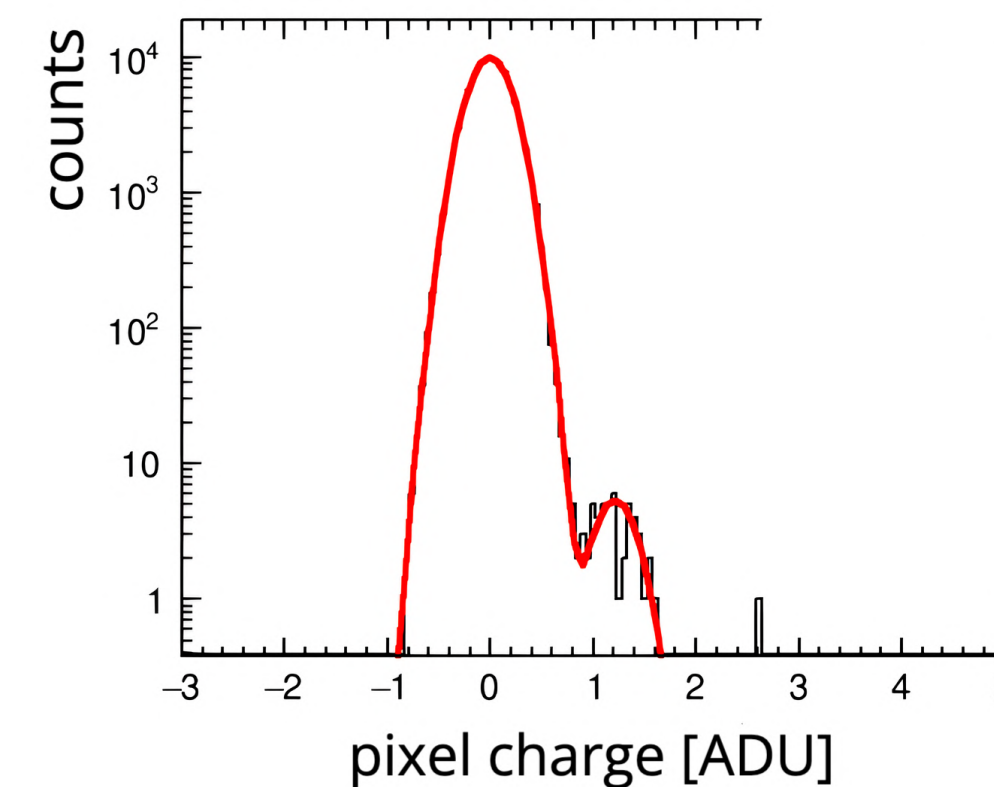
Déclencheurs observés sur deux sorties différentes d'une carte de synchronisation



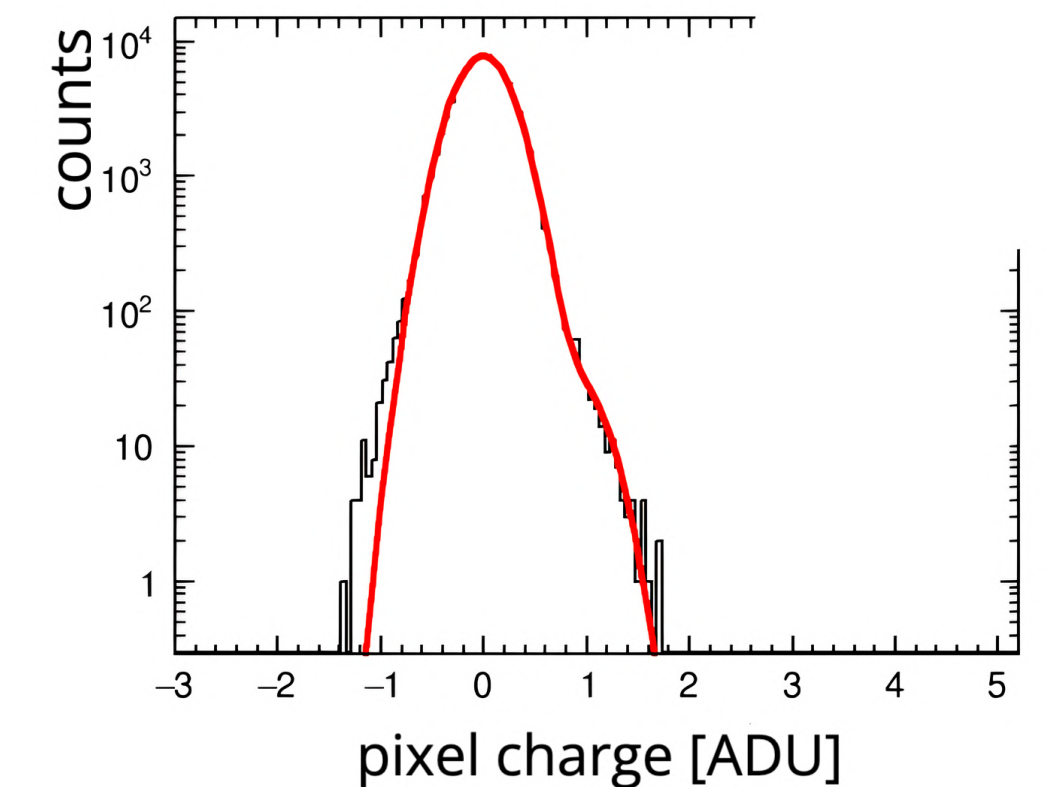
Histogramme des mesures des temps de propagation



2 Évolution de la résolution de charge:



Lecture **synchrone**
de 2 modules

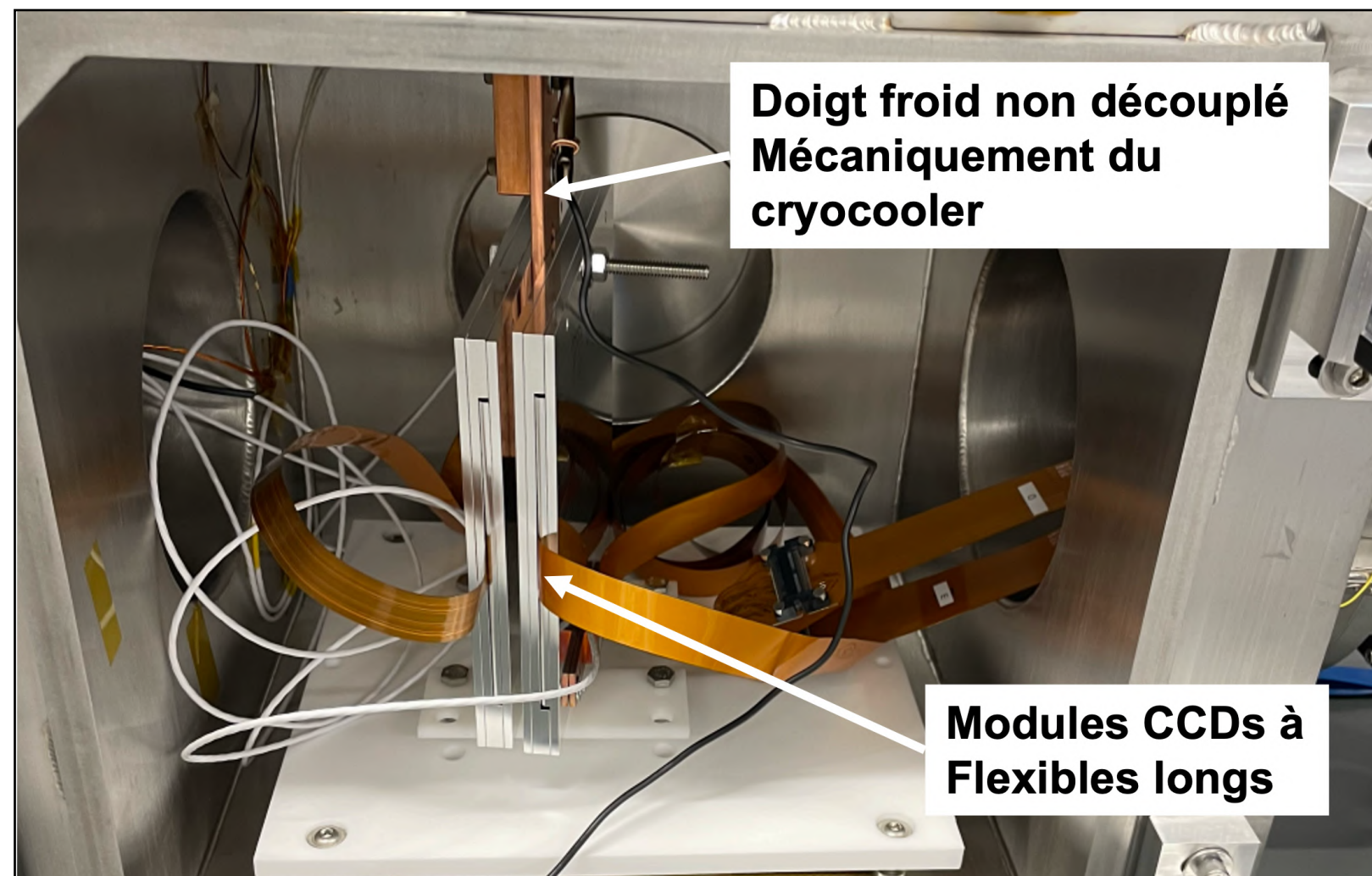
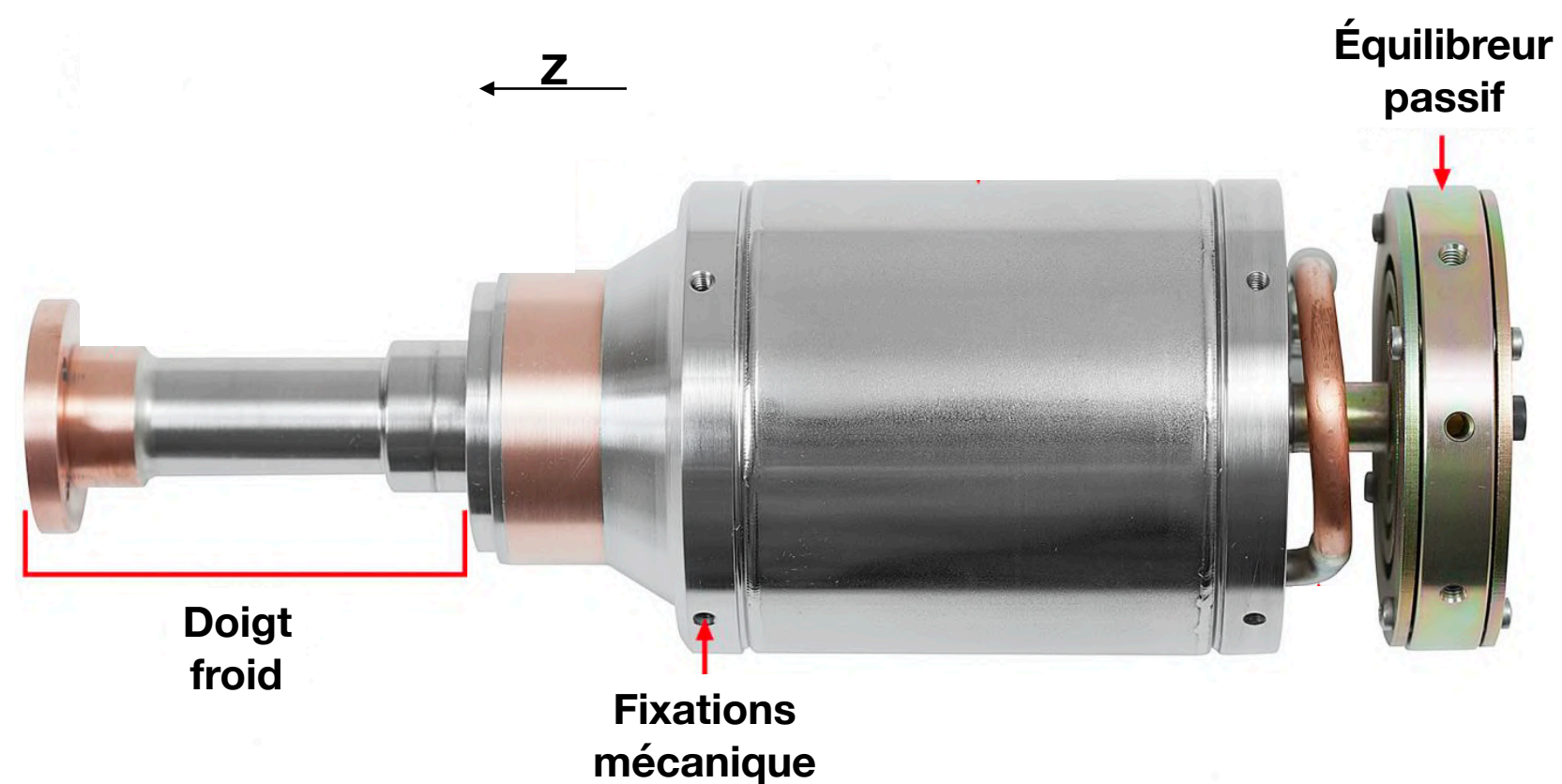


Lecture **asynchrone**
de 2 modules

→ Résolution de
0.16e⁻
à 500 skips

Bruit d'interférence

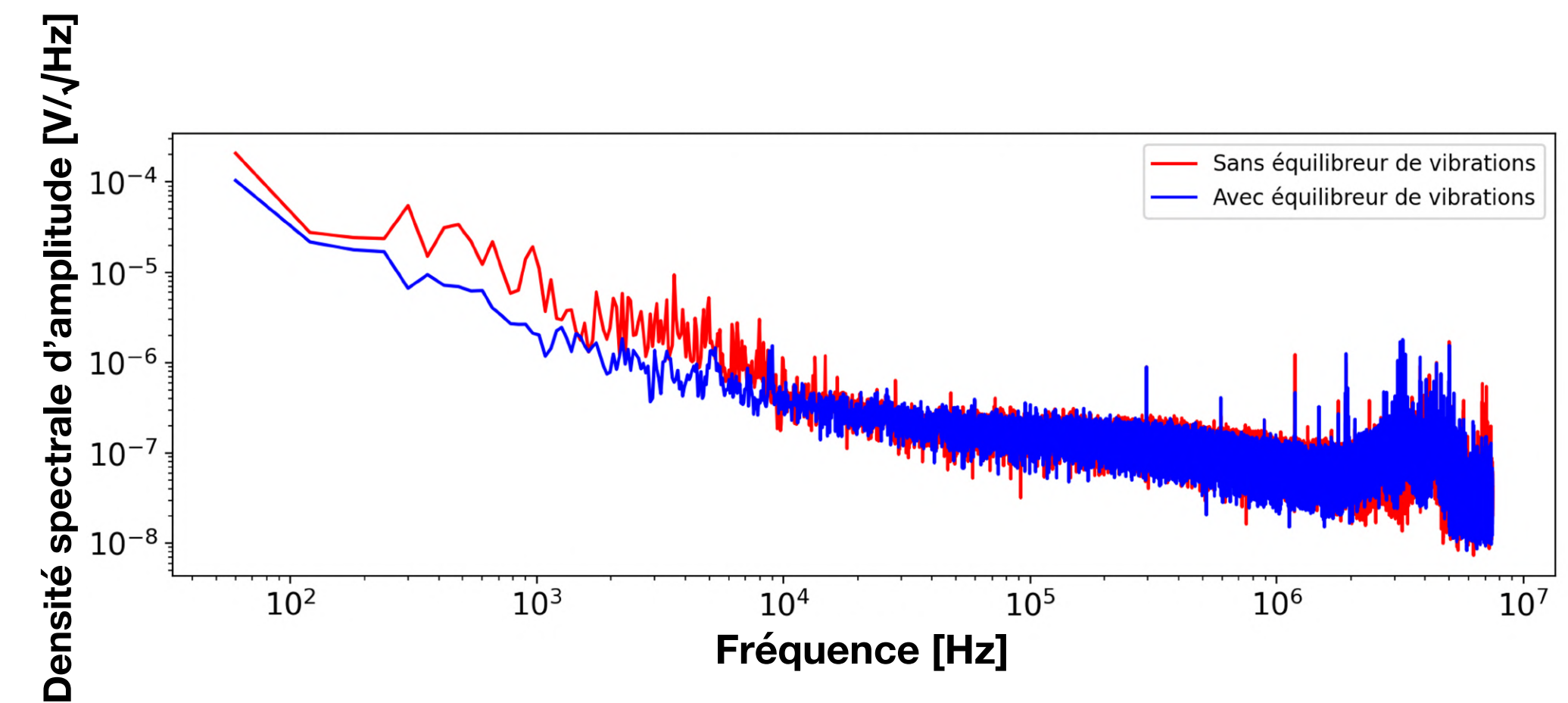
Environnement instrumental



1

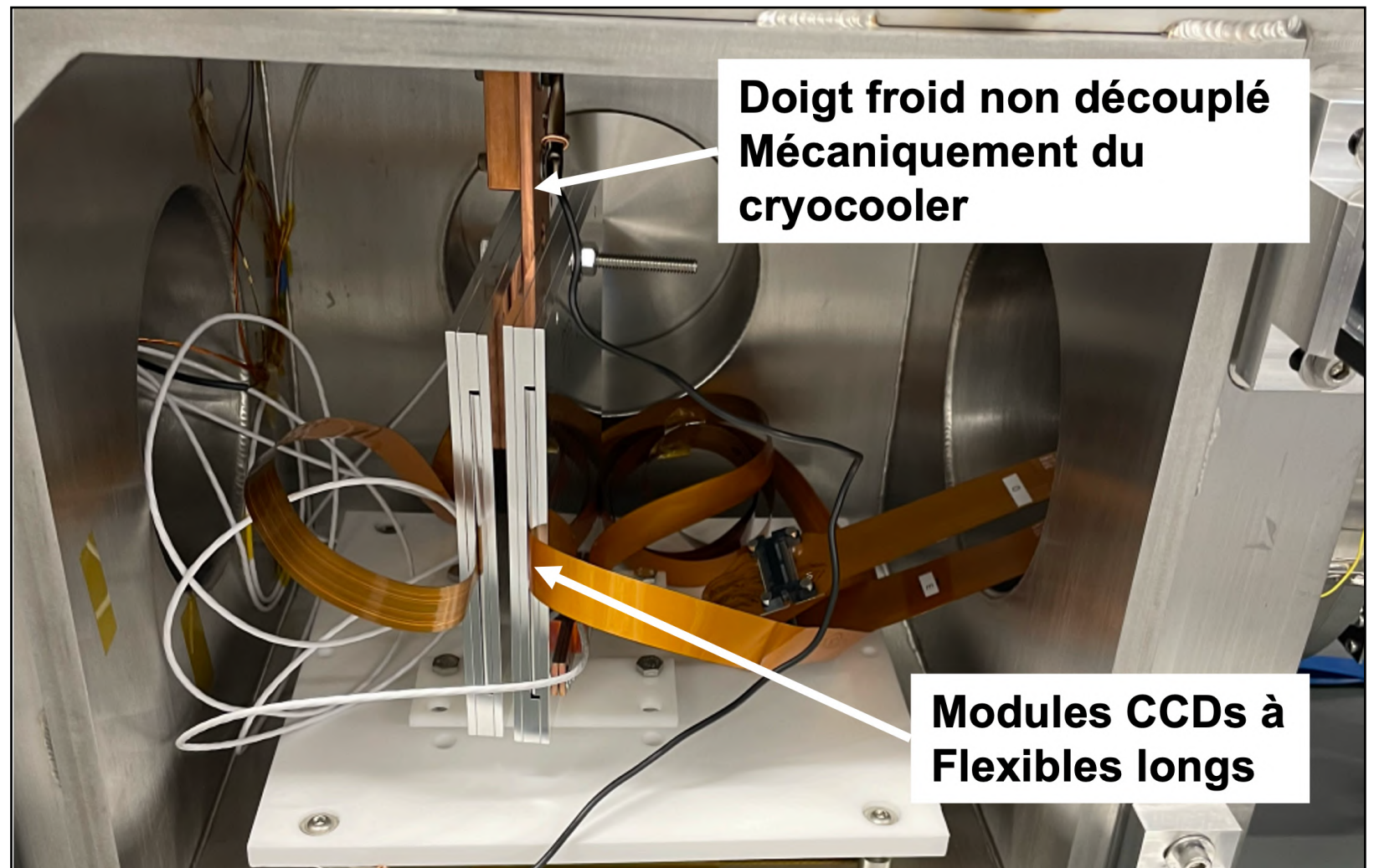
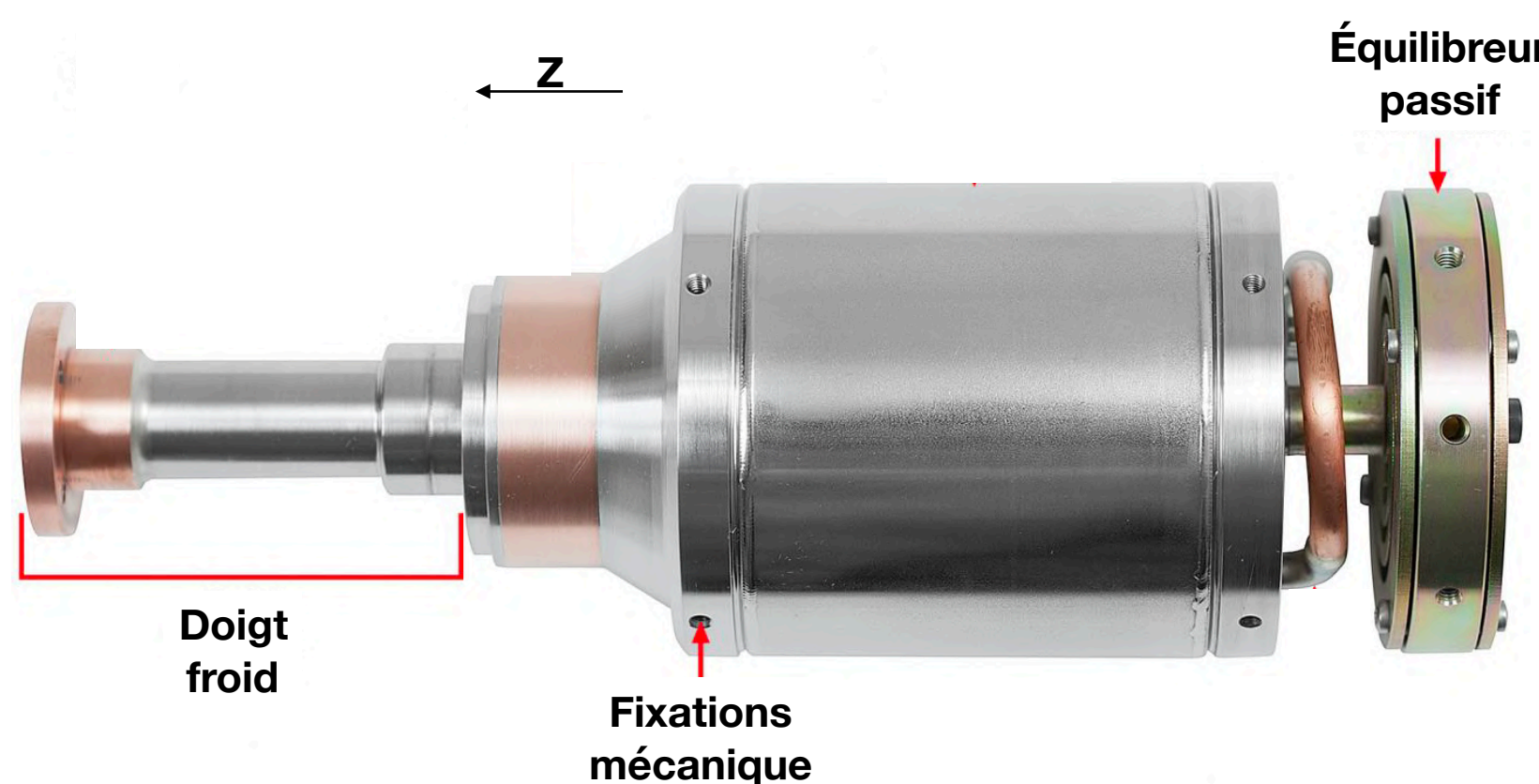
Vibrations mécaniques du cryocooler

Spectres de bruit d'une ligne vidéo de CCD



Bruit d'interférence

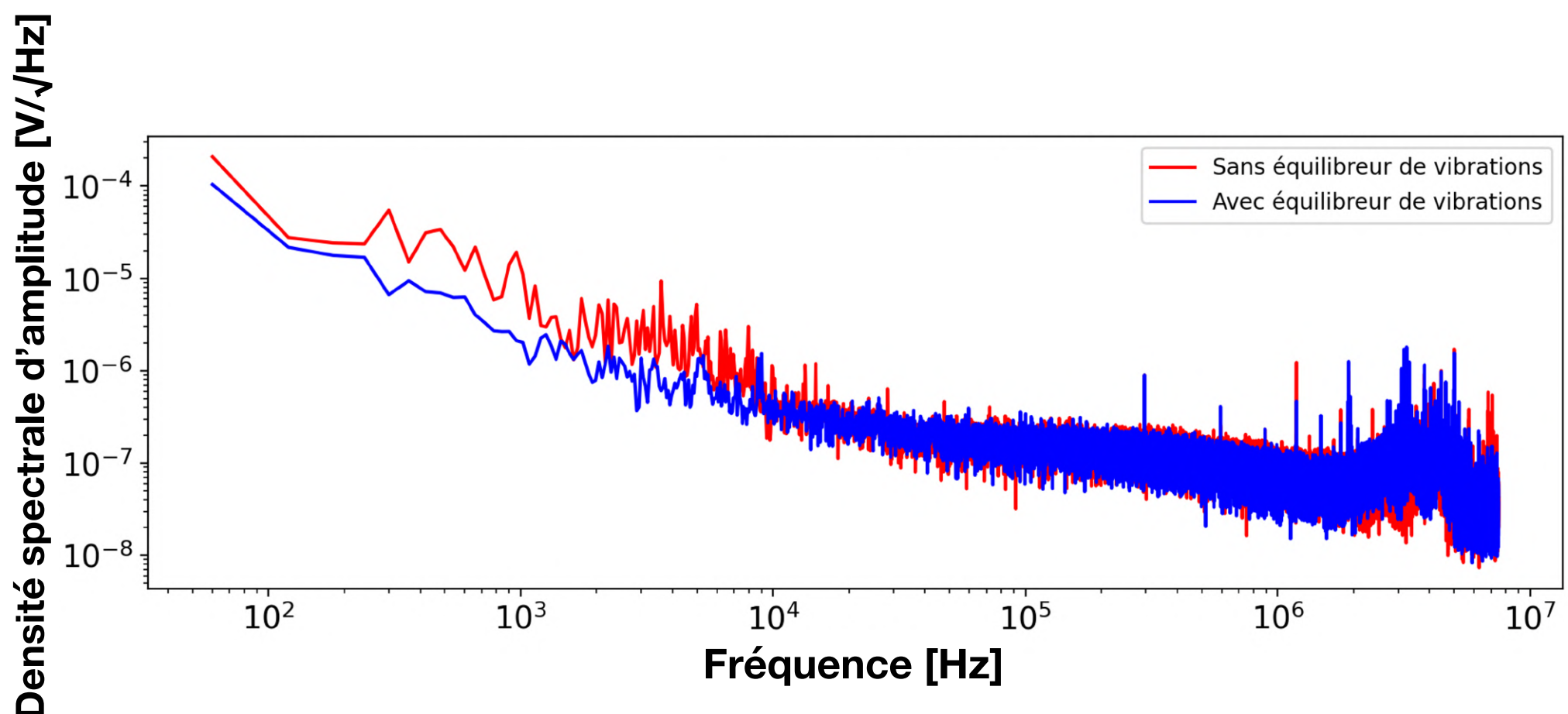
Environnement instrumental



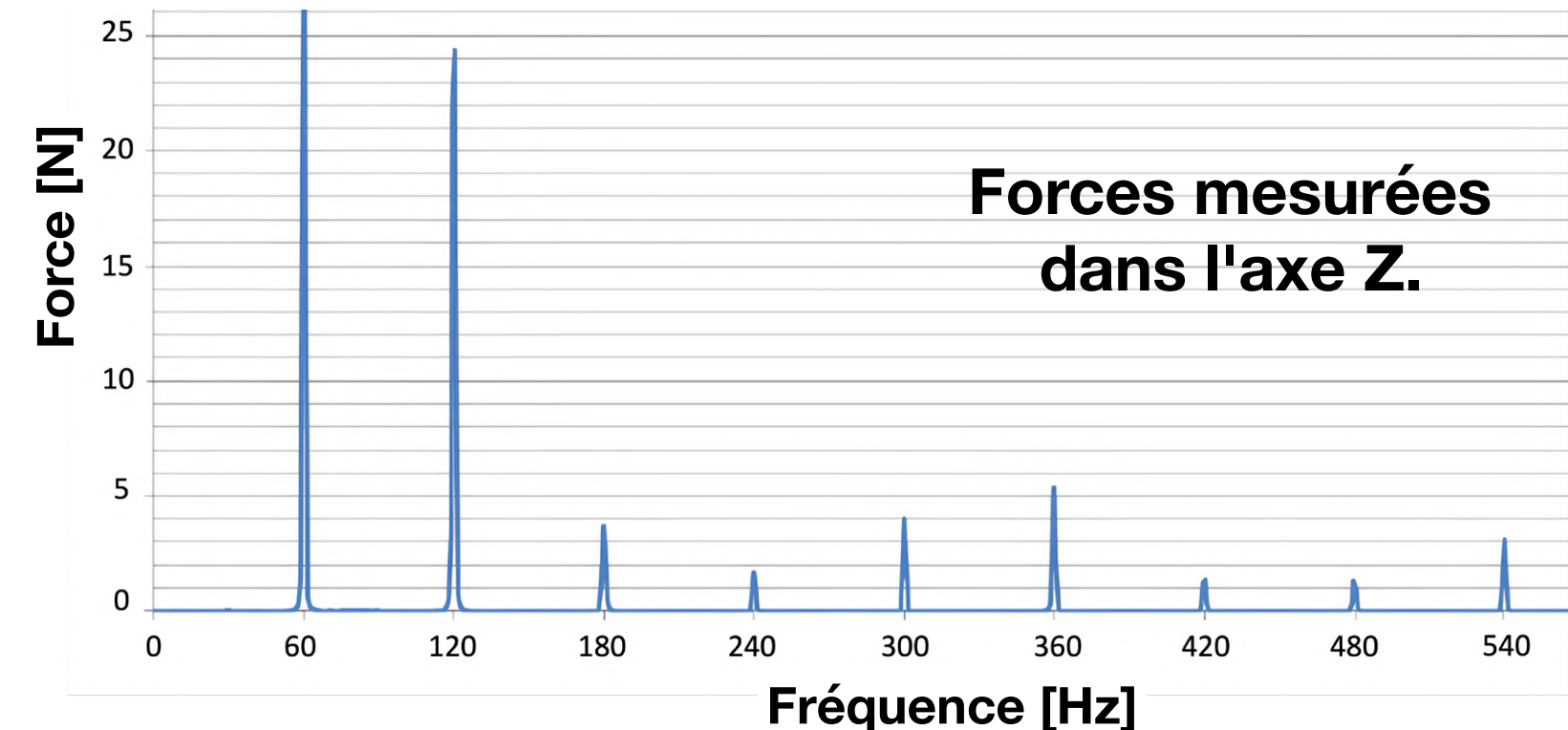
1

Vibrations mécaniques du cryocooler

Spectres de bruit d'une ligne vidéo de CCD



Vibrations basses fréquences

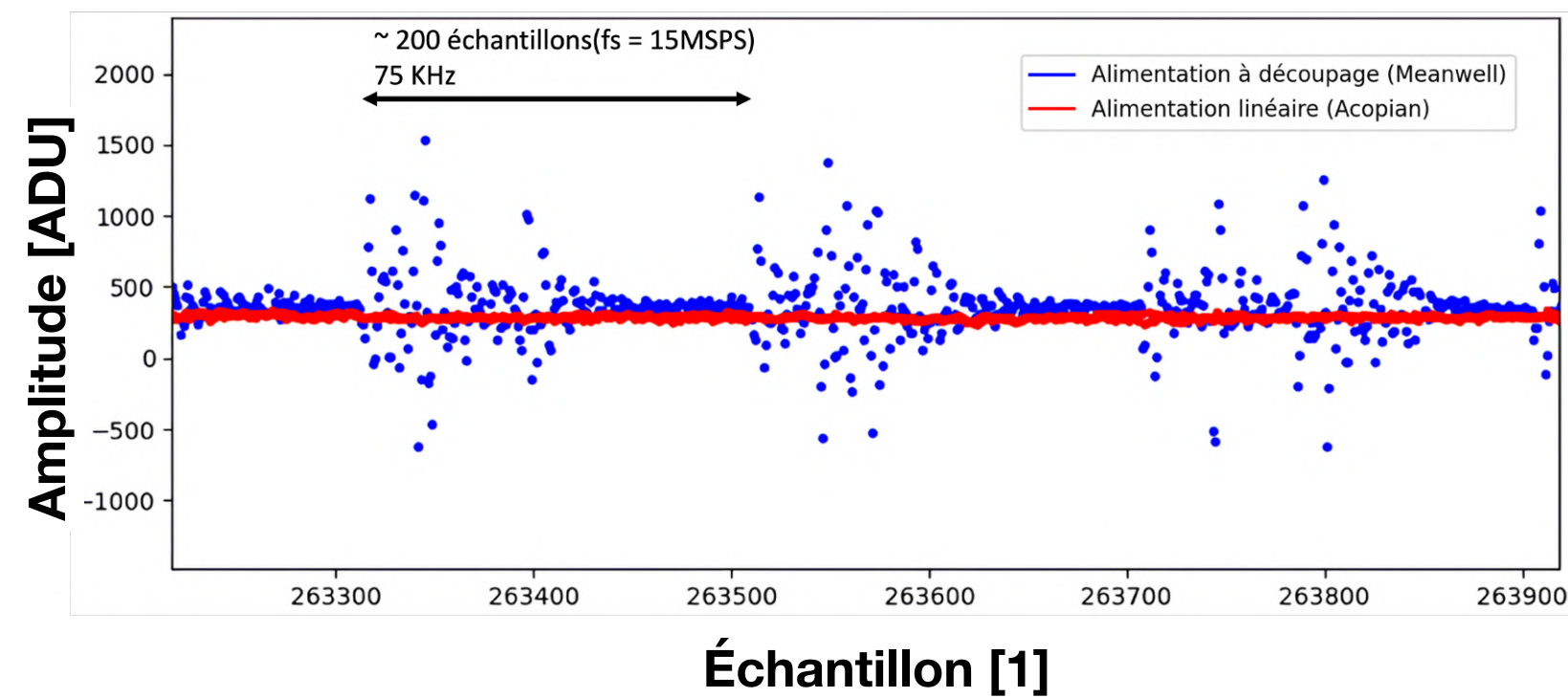


Bruit d'interférence

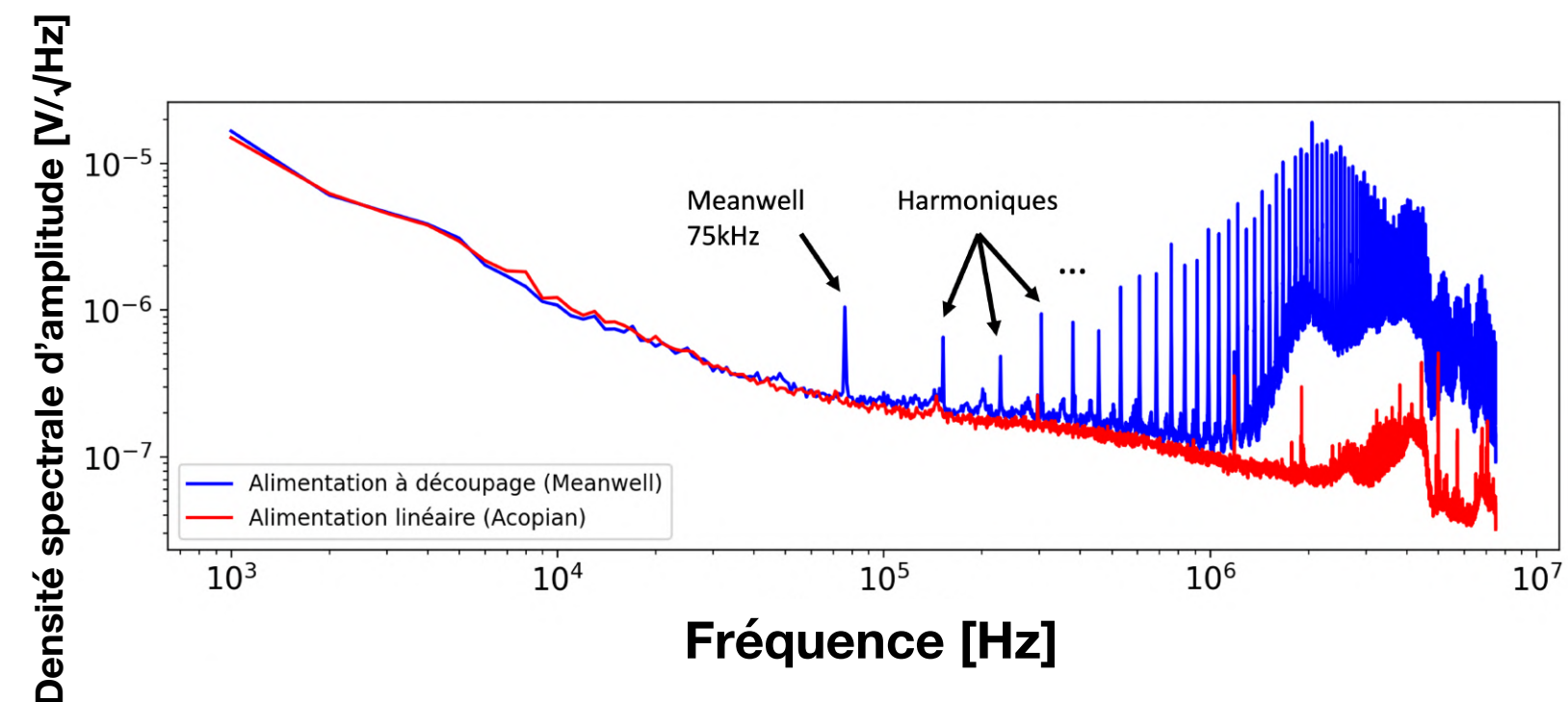
Environnement instrumental

2 Alimentation du cryocooler: linéaire ou à découpage?

Trace brute d'une
ligne vidéo de CCD



Spectres de bruit d'une
ligne vidéo de CCD

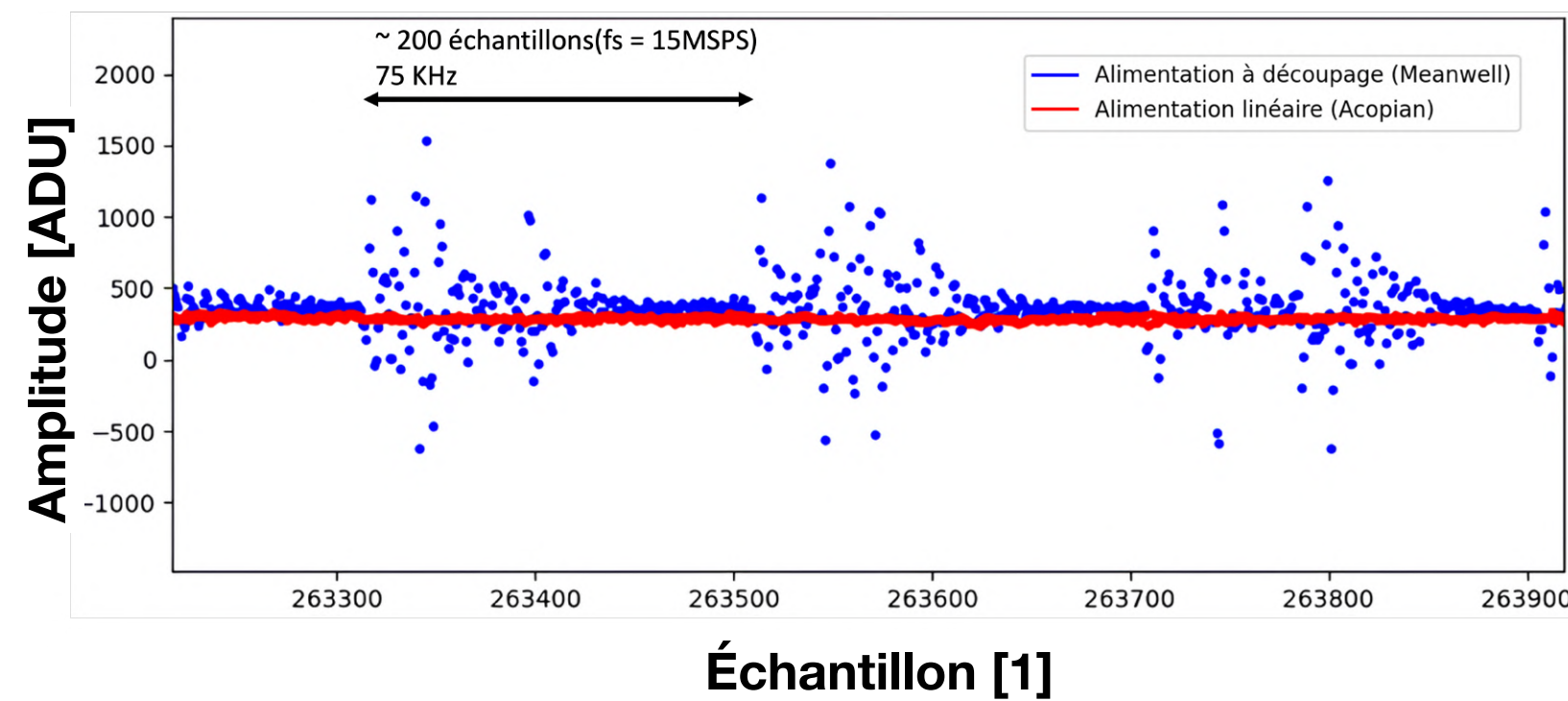


Bruit d'interférence

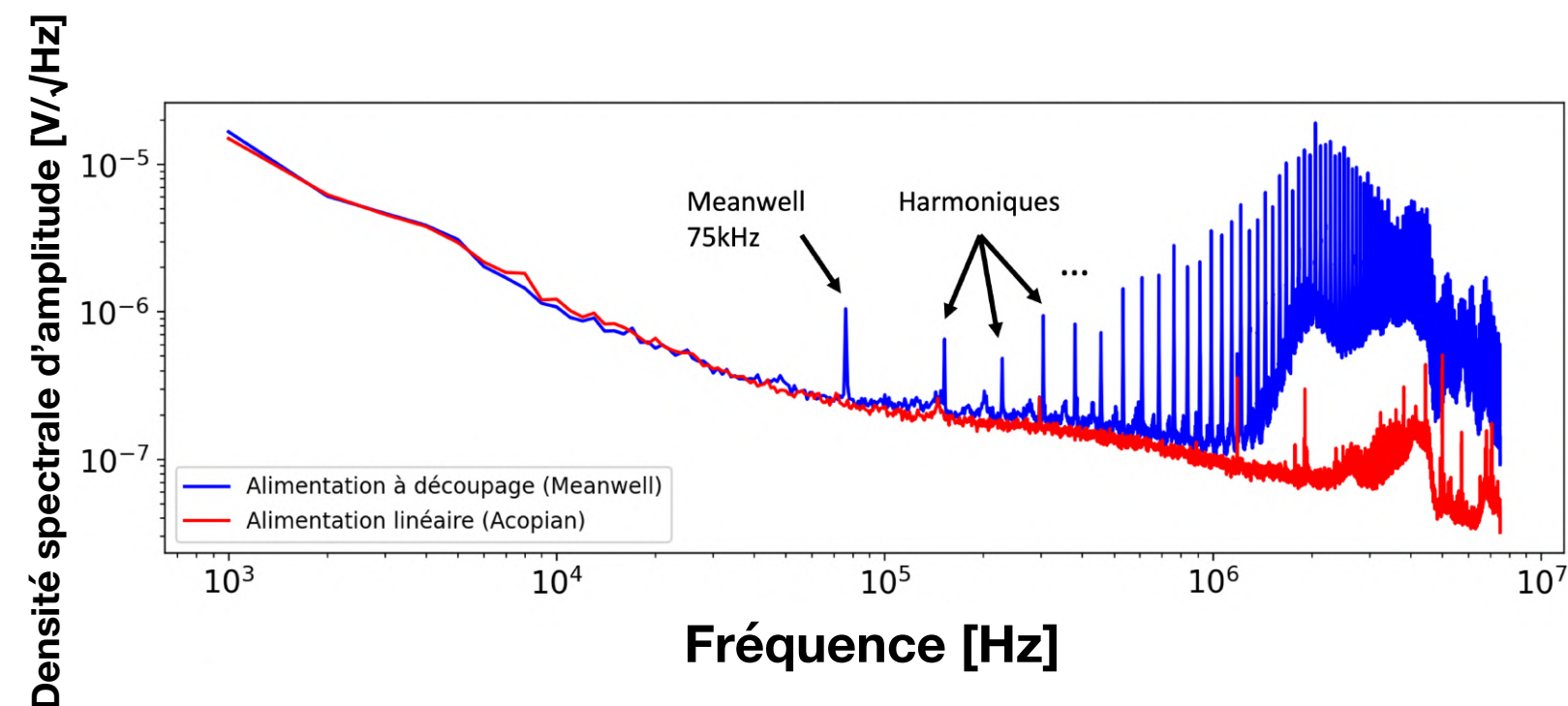
Environnement instrumental

2 Alimentation du cryocooler: linéaire ou à découpage?

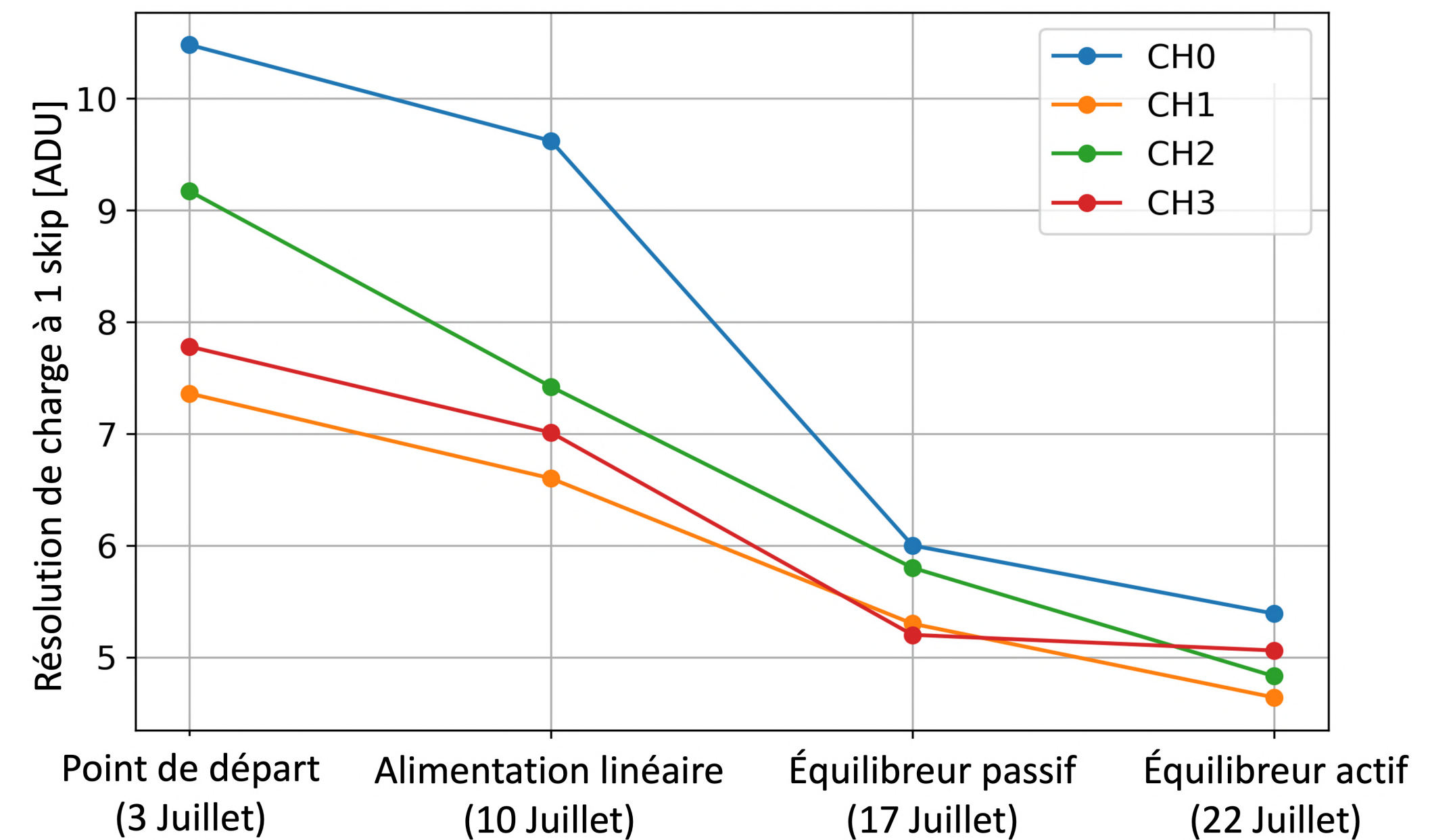
Trace brute d'une
ligne vidéo de CCD



Spectres de bruit d'une
ligne vidéo de CCD



Évolution de la résolution de charge en fonction de l'optimisation



© P. Privitera et C. Zhu

Campagnes expérimentales in-situ et résultats

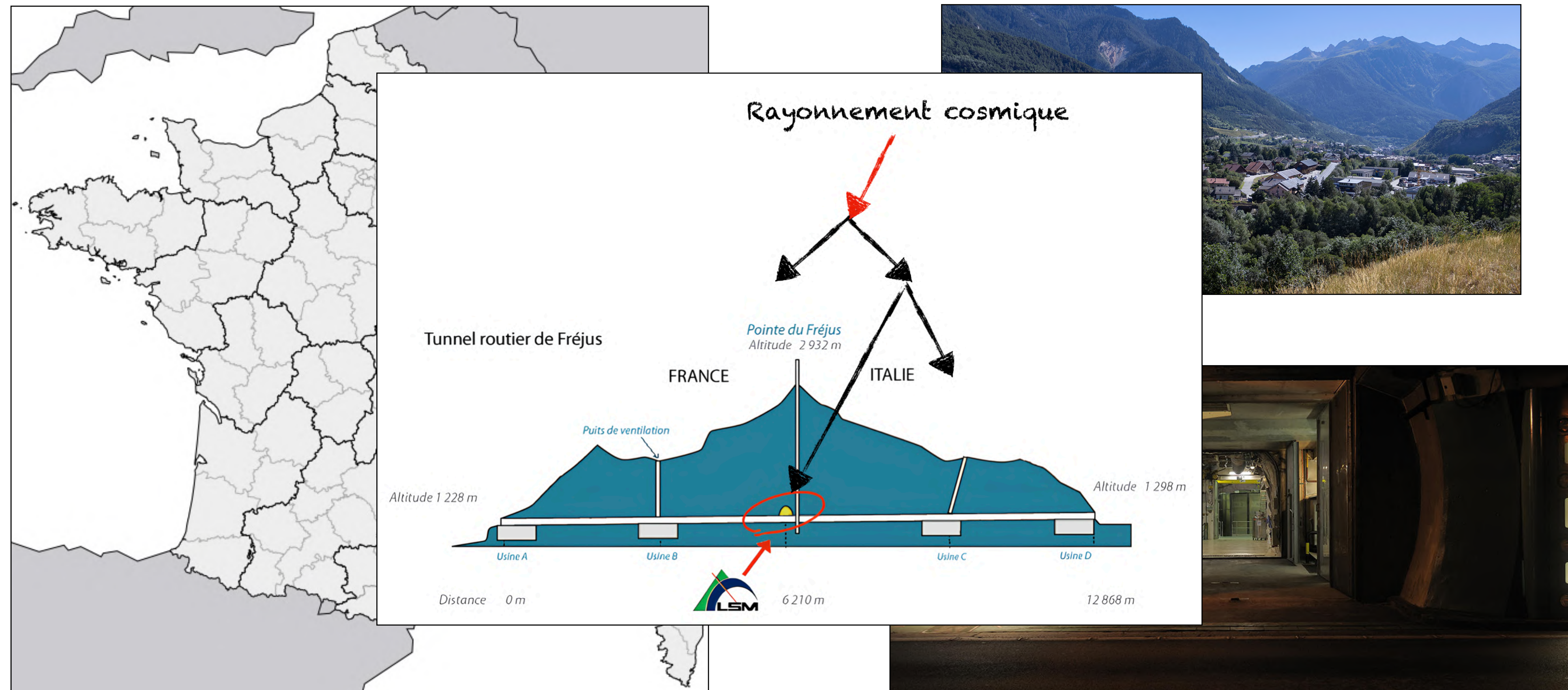
Campagnes expérimentales et résultats

Prototype du détecteur



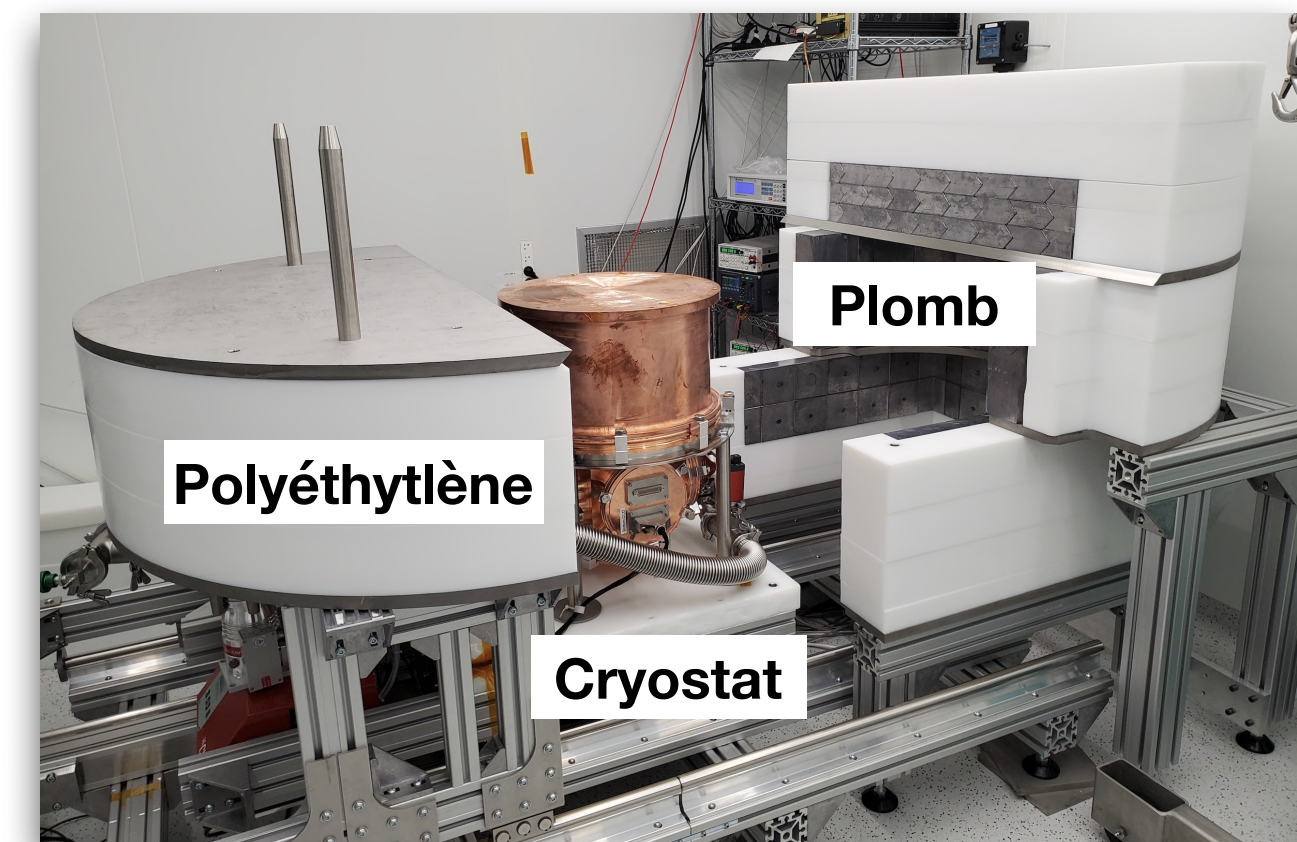
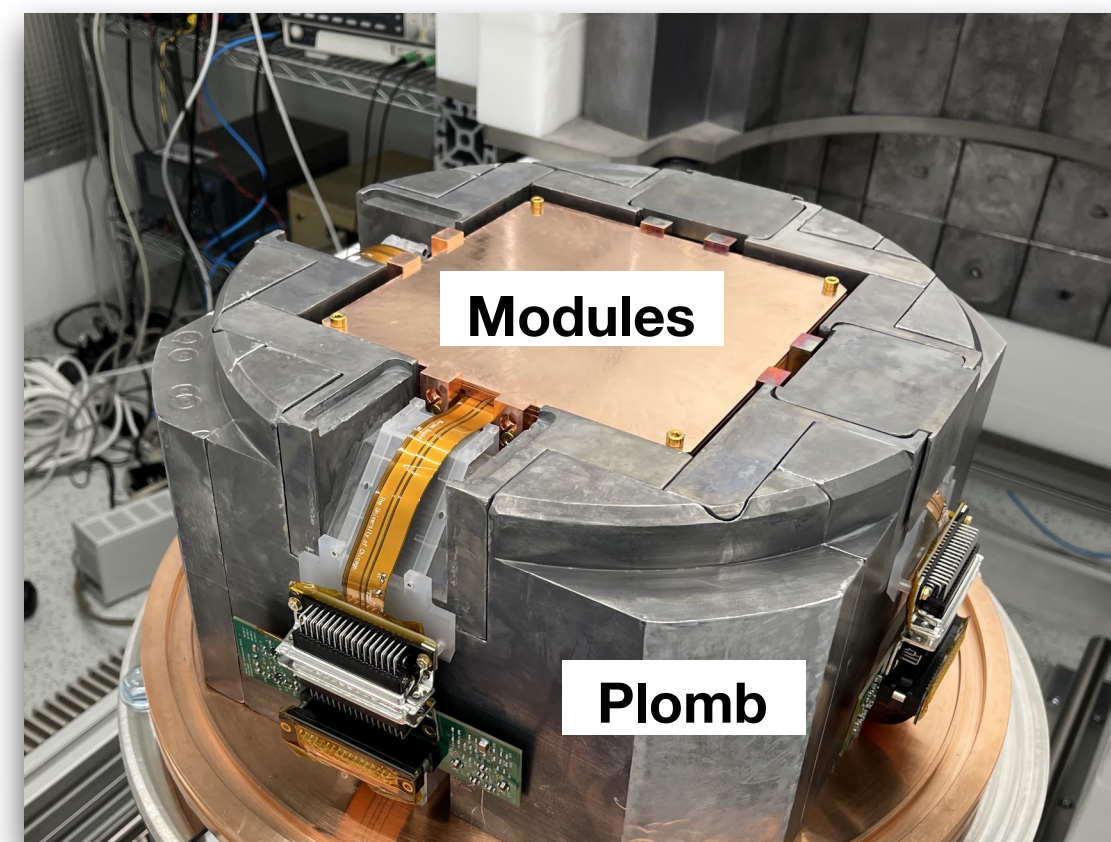
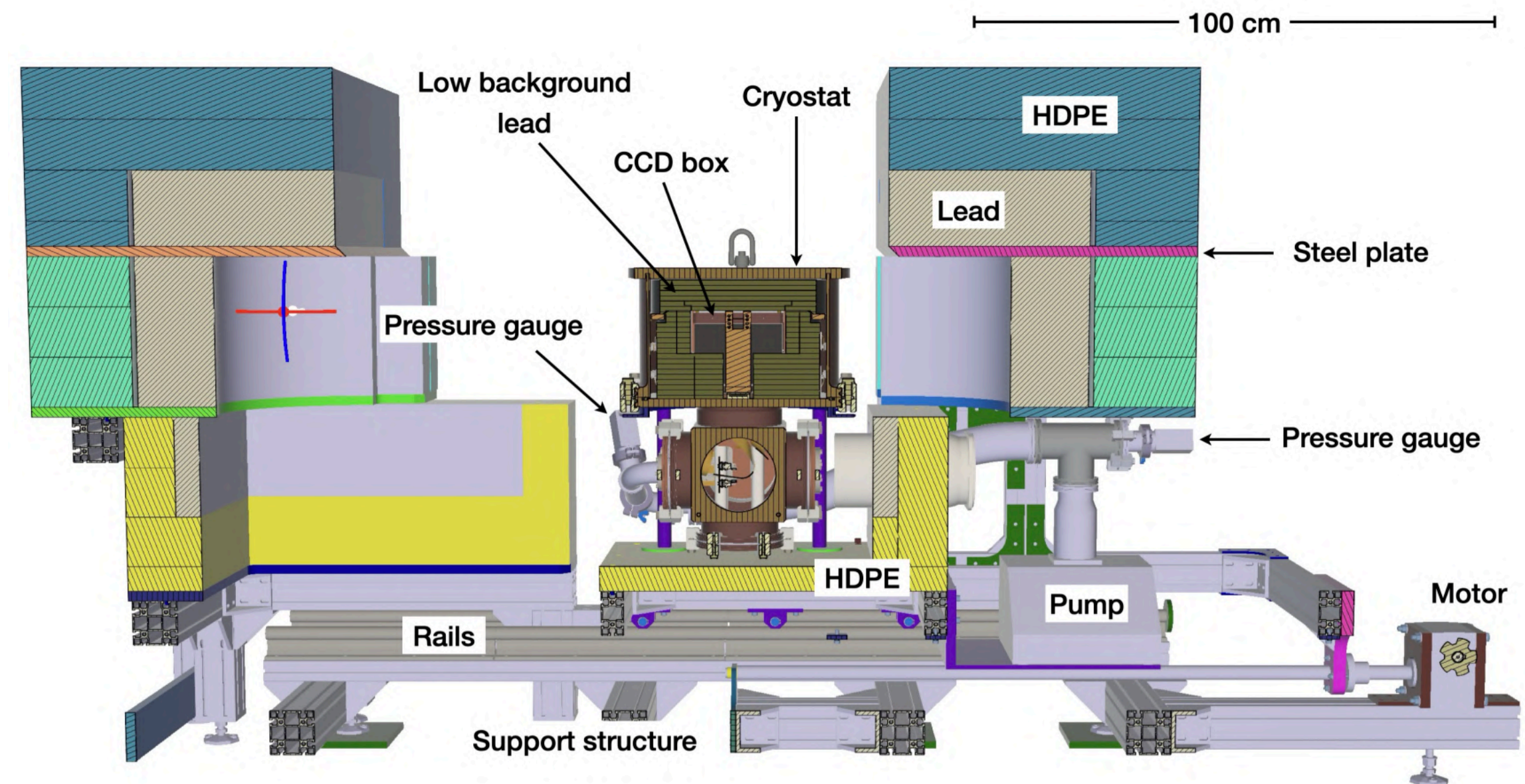
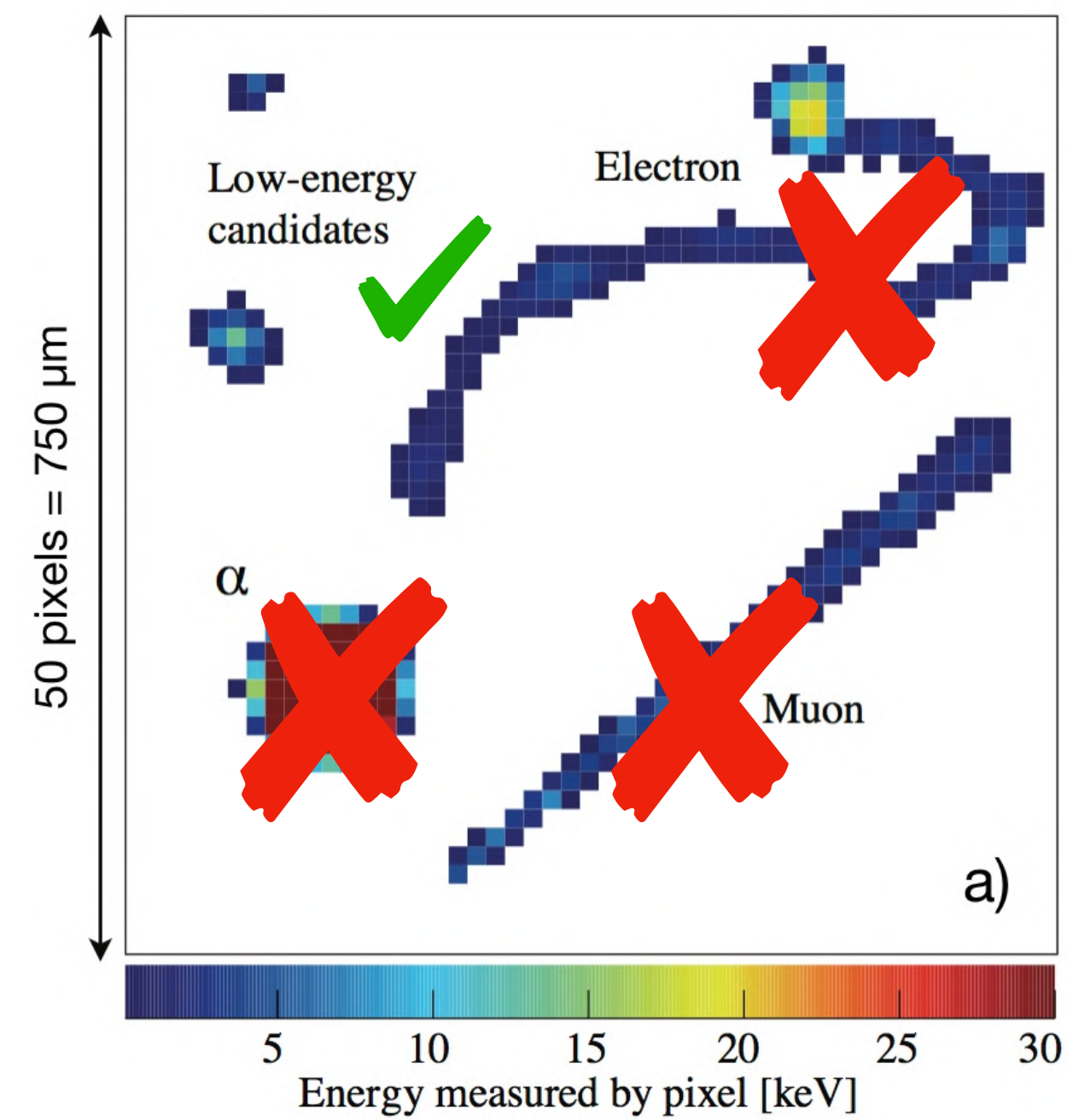
Campagnes expérimentales et résultats

Prototype du détecteur



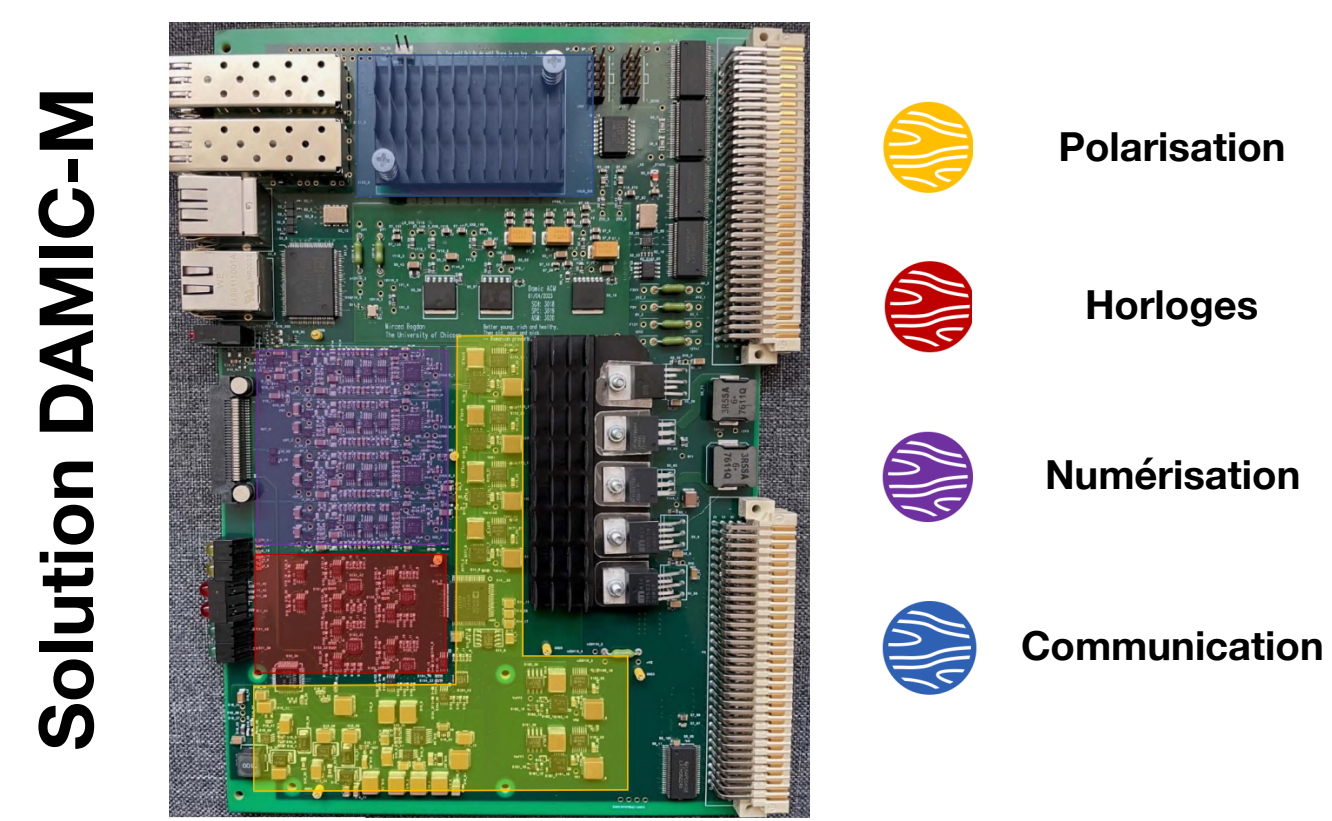
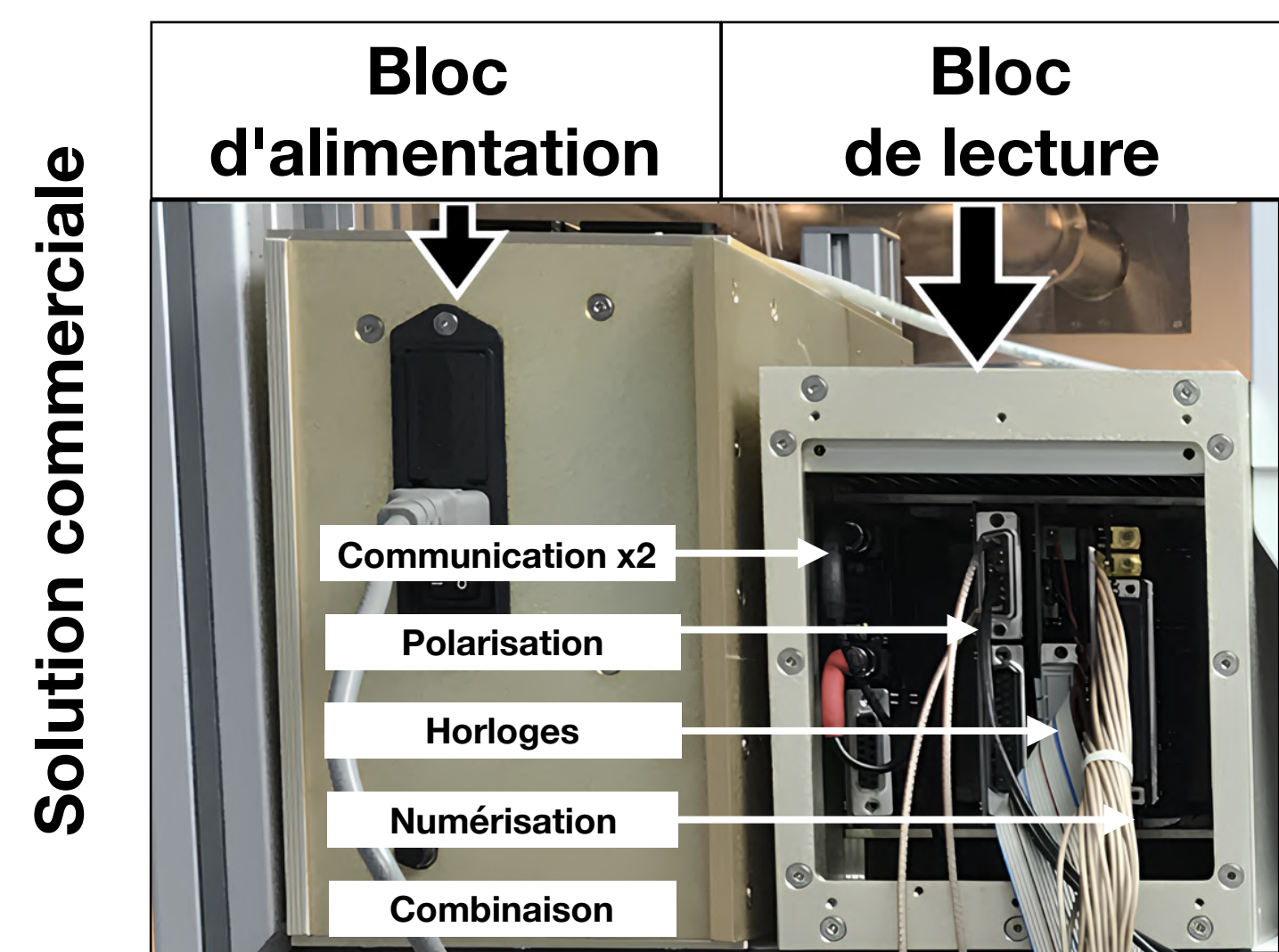
Campagnes expérimentales et résultats

Prototype du détecteur



Campagnes expérimentales et résultats

Comparaison des chaînes d'acquisition



Électronique de lecture	Commerciale	DAMIC-M
Nombre de modules CCD	2	2
Dimensions des modules CCD	6144 × 4128	4 × 6144 × 1536
Lecture synchrone	Non	Oui
Temps d'intégration	10 μ s	10 μ s
Résolution de charge à 1 skip	5e ⁻	3.5e ⁻
Résolution de charge à N skips	0.2e ⁻ à 650 skips	0.16e ⁻ à 500 skips

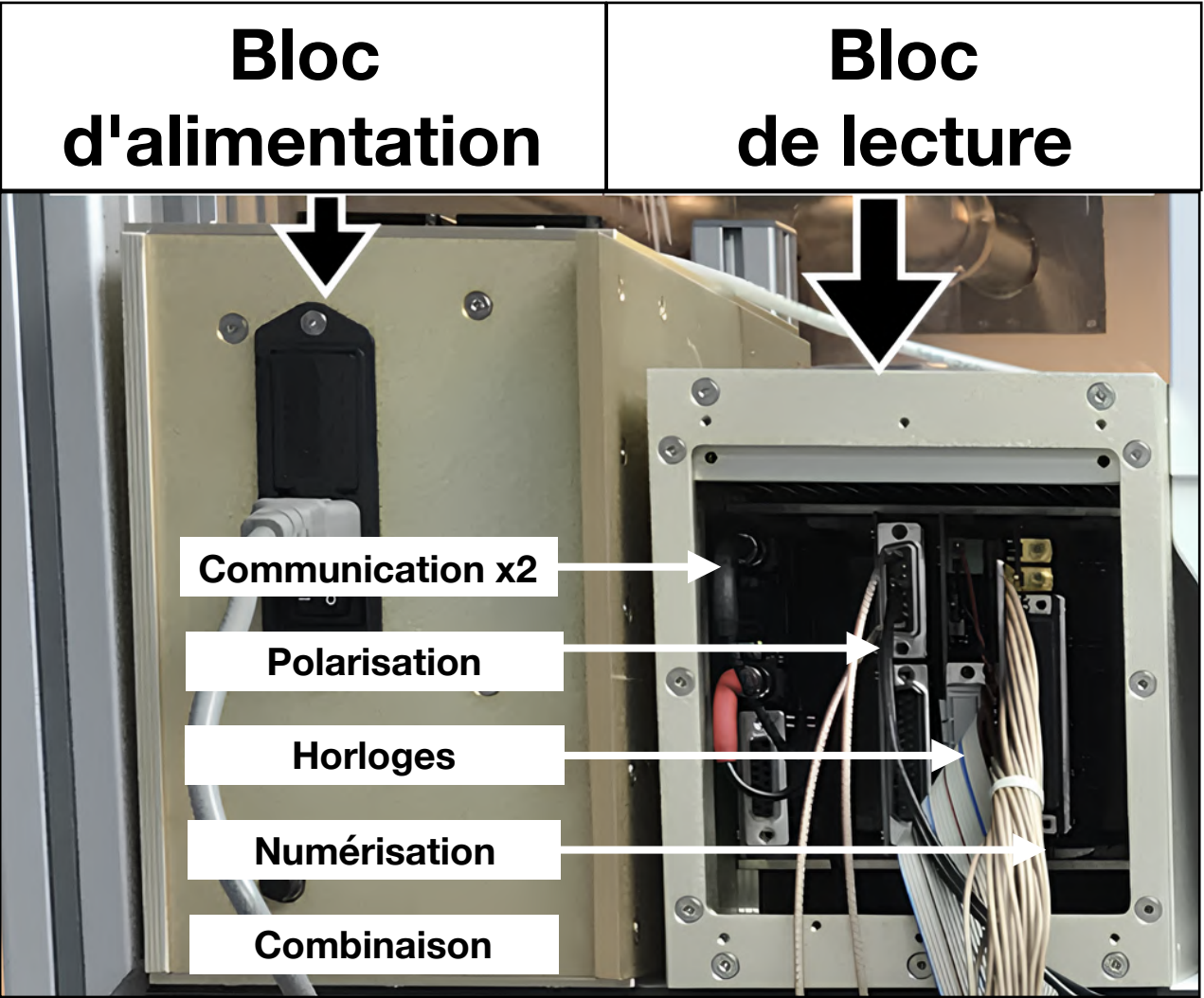
Une contribution aux objectifs techniques:

- Une électronique moins encombrante.
- Un meilleur contrôle des paramètres d'optimisation.
- Évolution vers un système **synchronisable**
- De meilleures performances en bruit, avec une réduction du temps de lecture de **30%** par CCD.

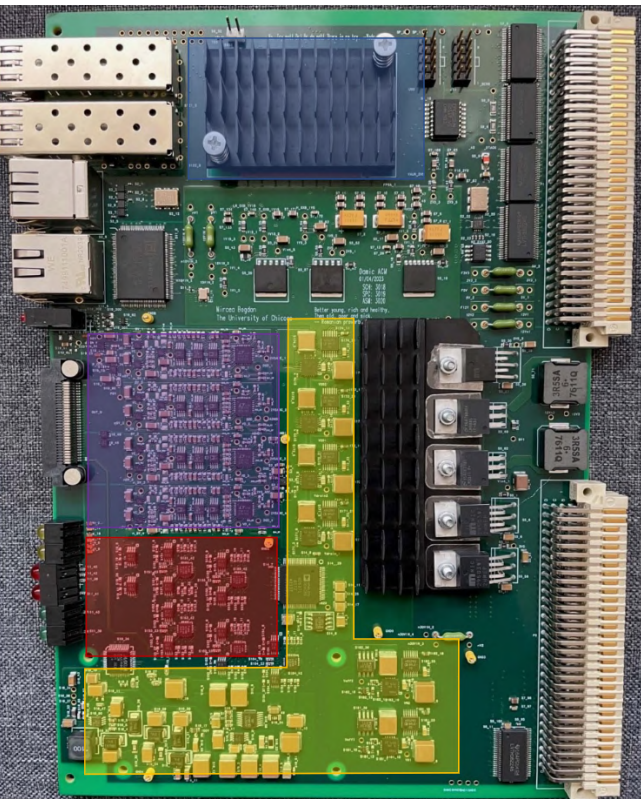
Campagnes expérimentales et résultats



Comparaison des chaînes d'acquisition

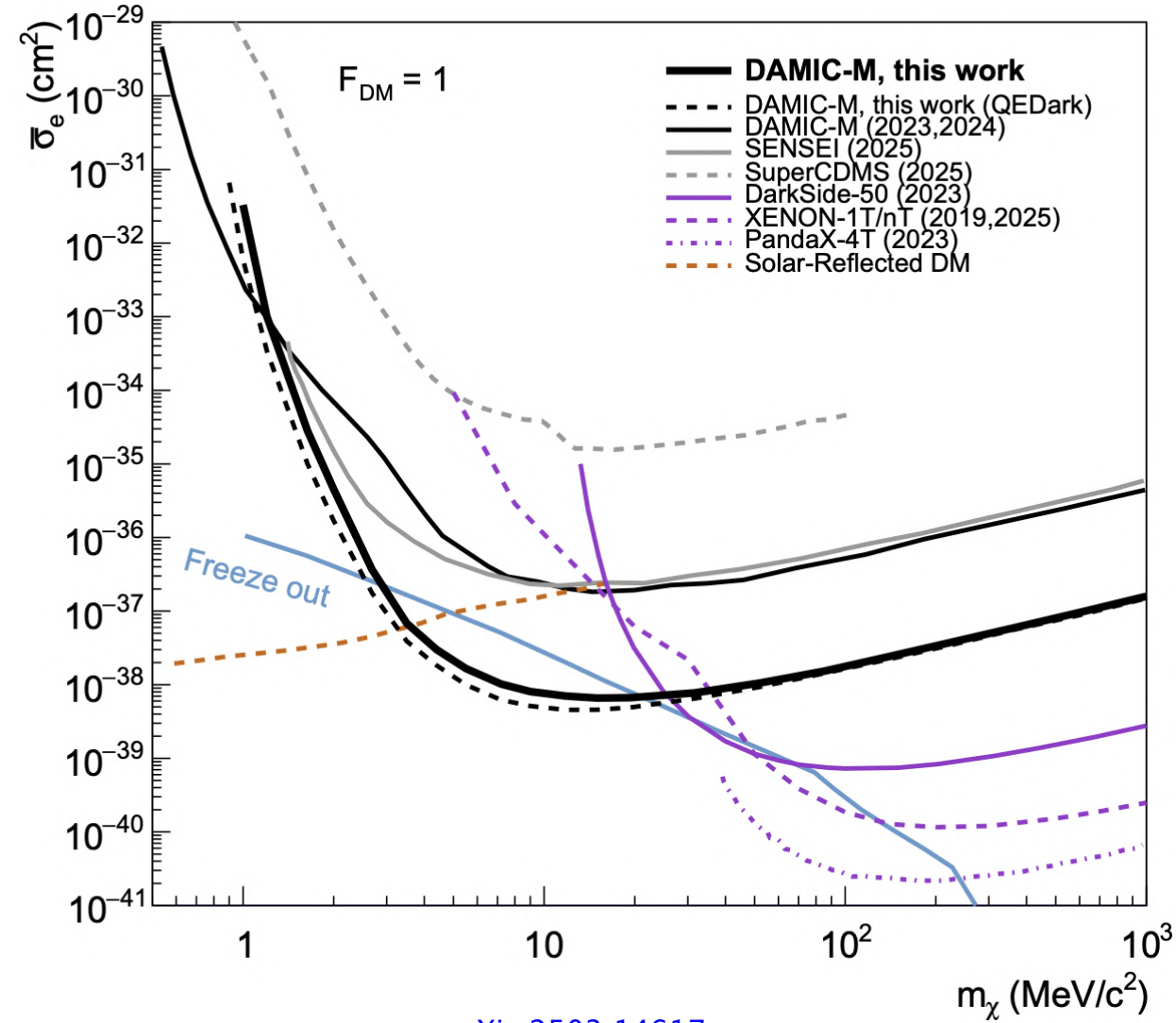
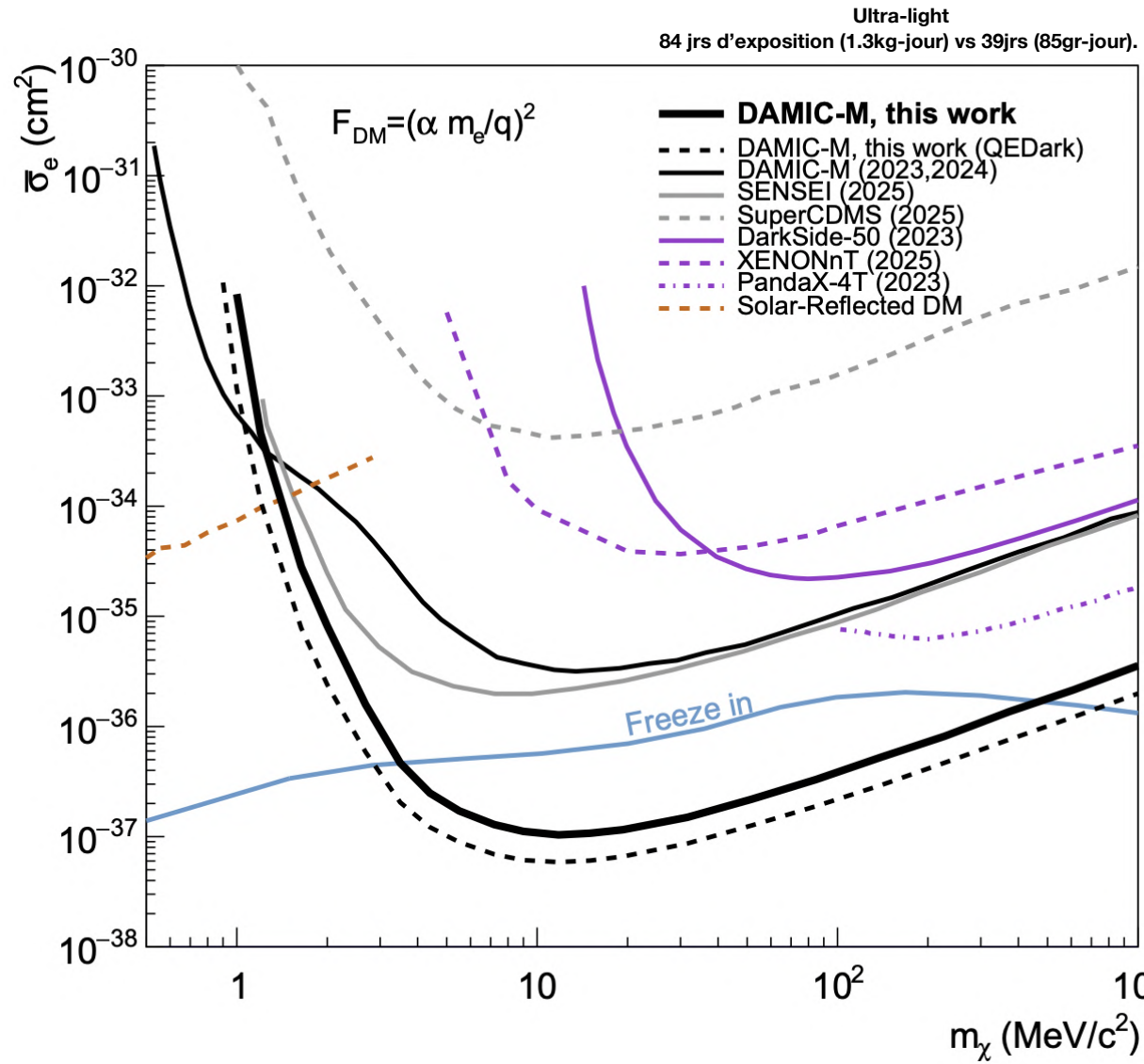
Solution commerciale



Solution DAMIC-M



-  Polarisation
-  Horloges
-  Numérisation
-  Communication

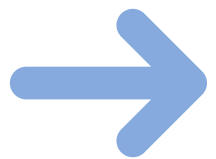


[arXiv:2503.14617](https://arxiv.org/abs/2503.14617)

Une contribution aux objectifs scientifiques:



Amélioration des limites de détection de
l'expérience de **2 ordres de grandeur**
pour des masses entre 1MeV/c² et 1GeV/c²



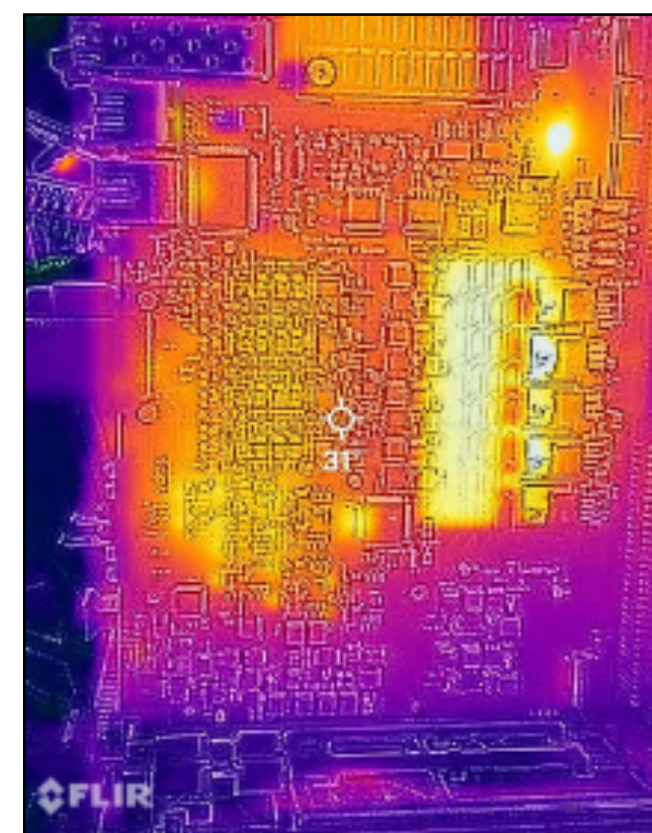
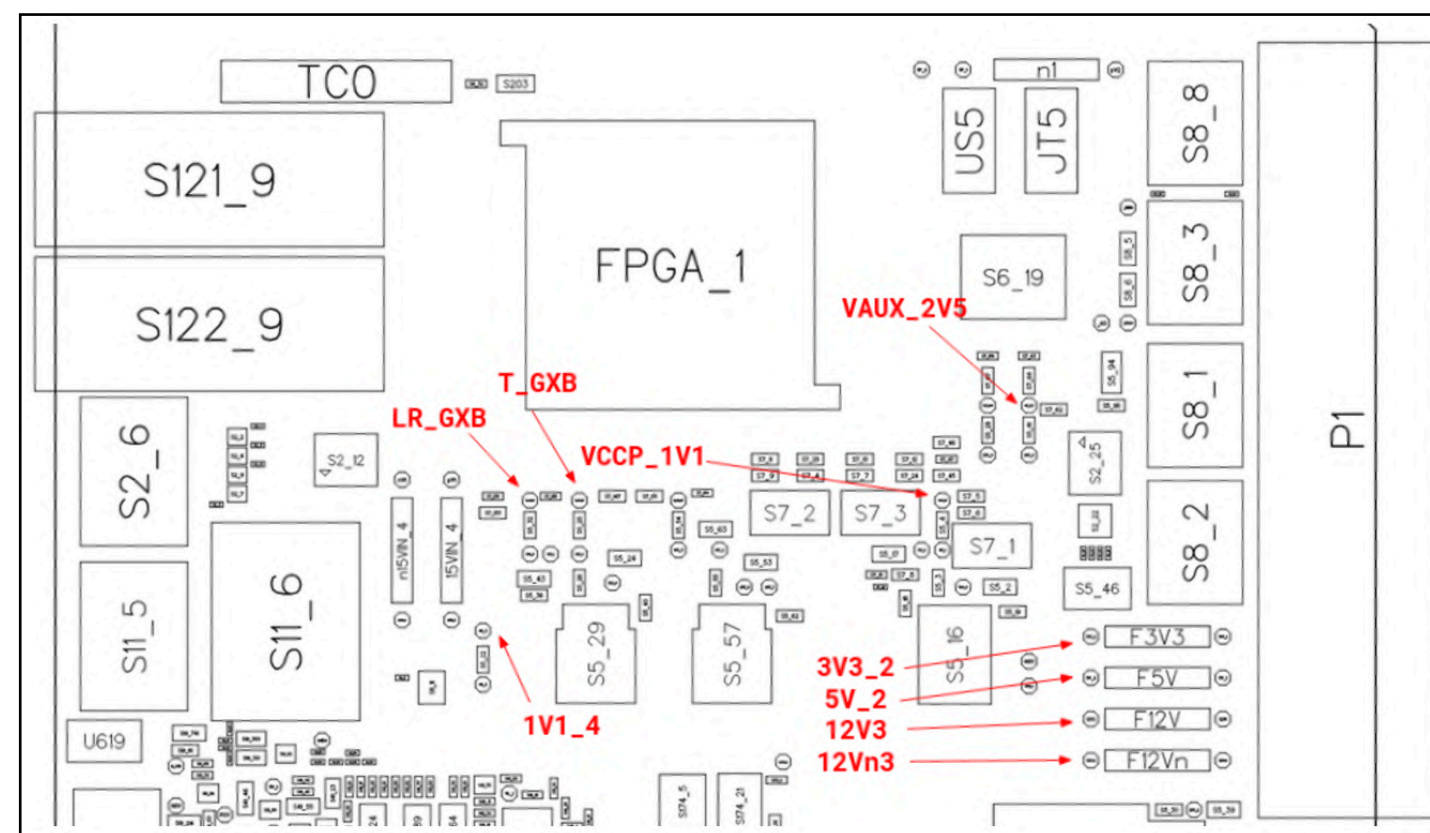
Choix technologiques : **Validés !**

Campagnes expérimentales et résultats

Production et qualification des ACMs

1 Protocoles de test

➔ Objectif: Prévenir très tôt tout dysfonctionnement majeur.



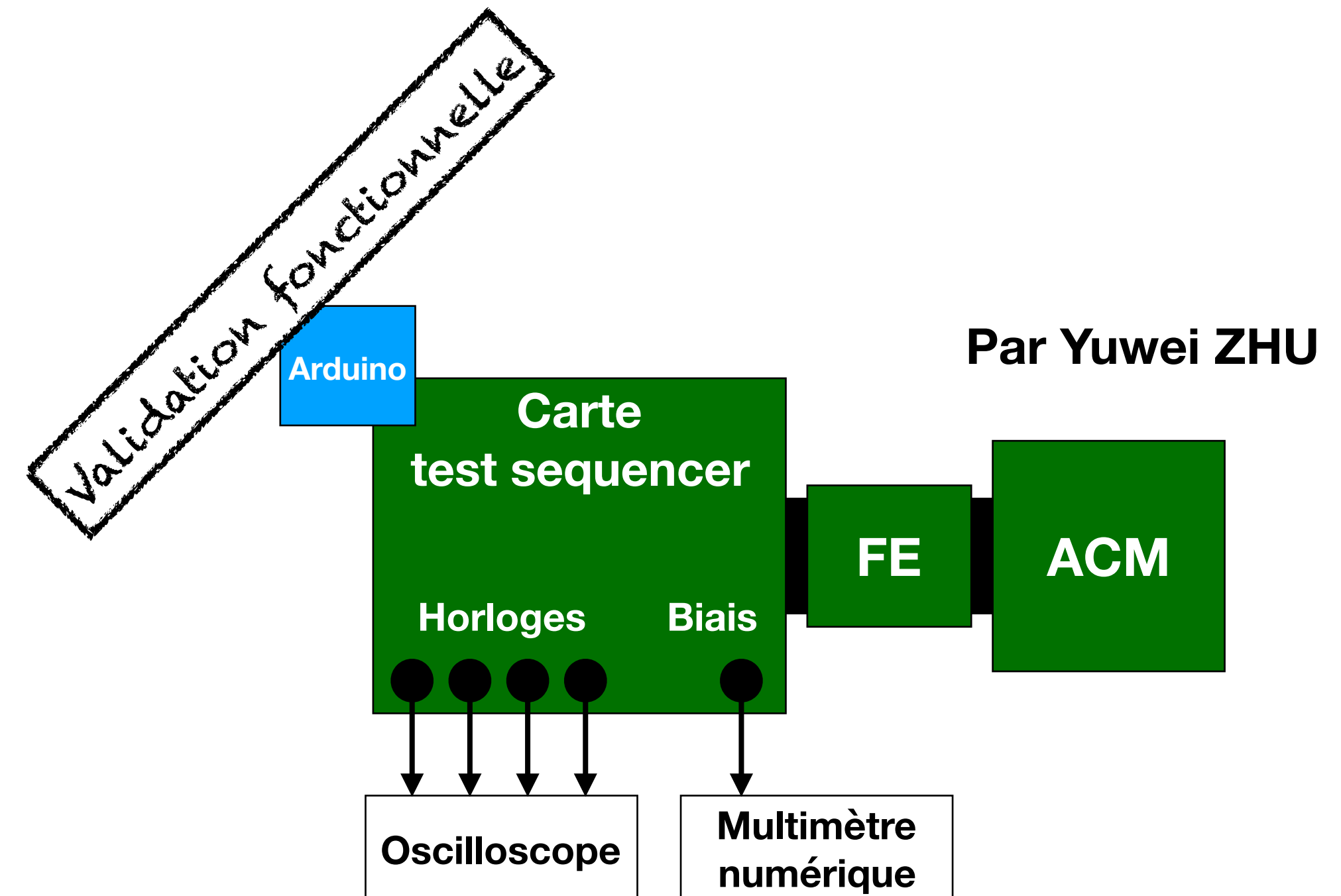
Contrôles
visuels

Contrôles
électriques
et thermique

Programmation
firmware

Communication

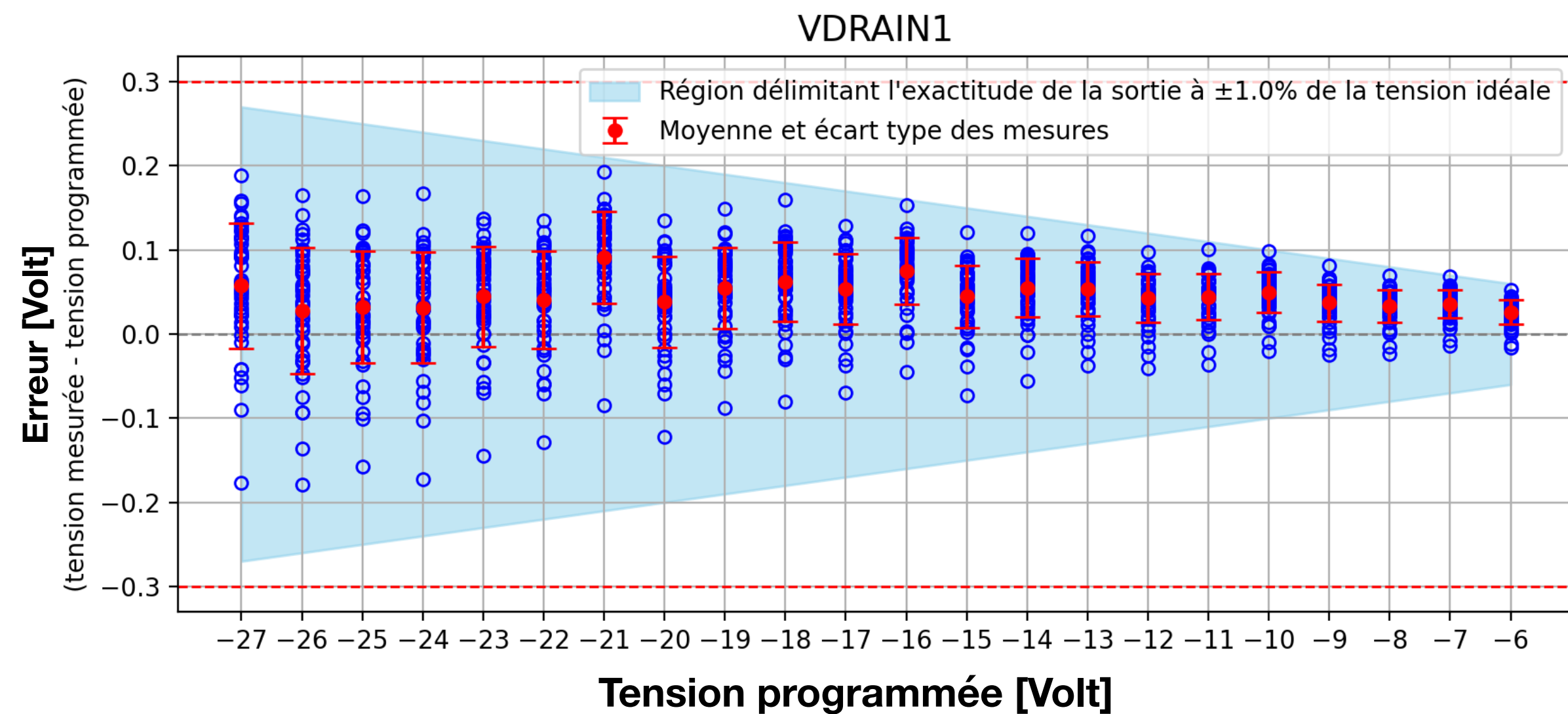
2 Automatisation des tests



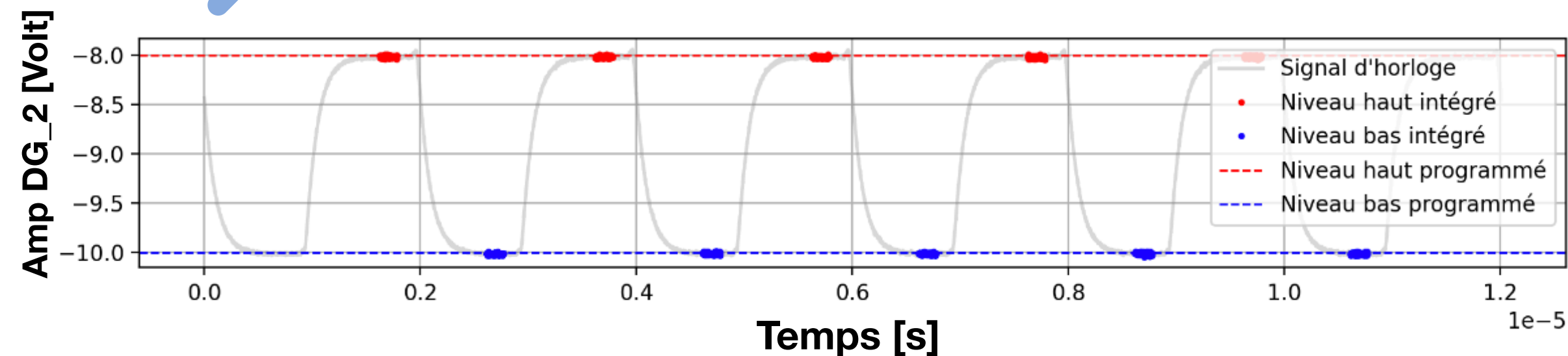
Campagnes expérimentales et résultats

Production et qualification des ACMs

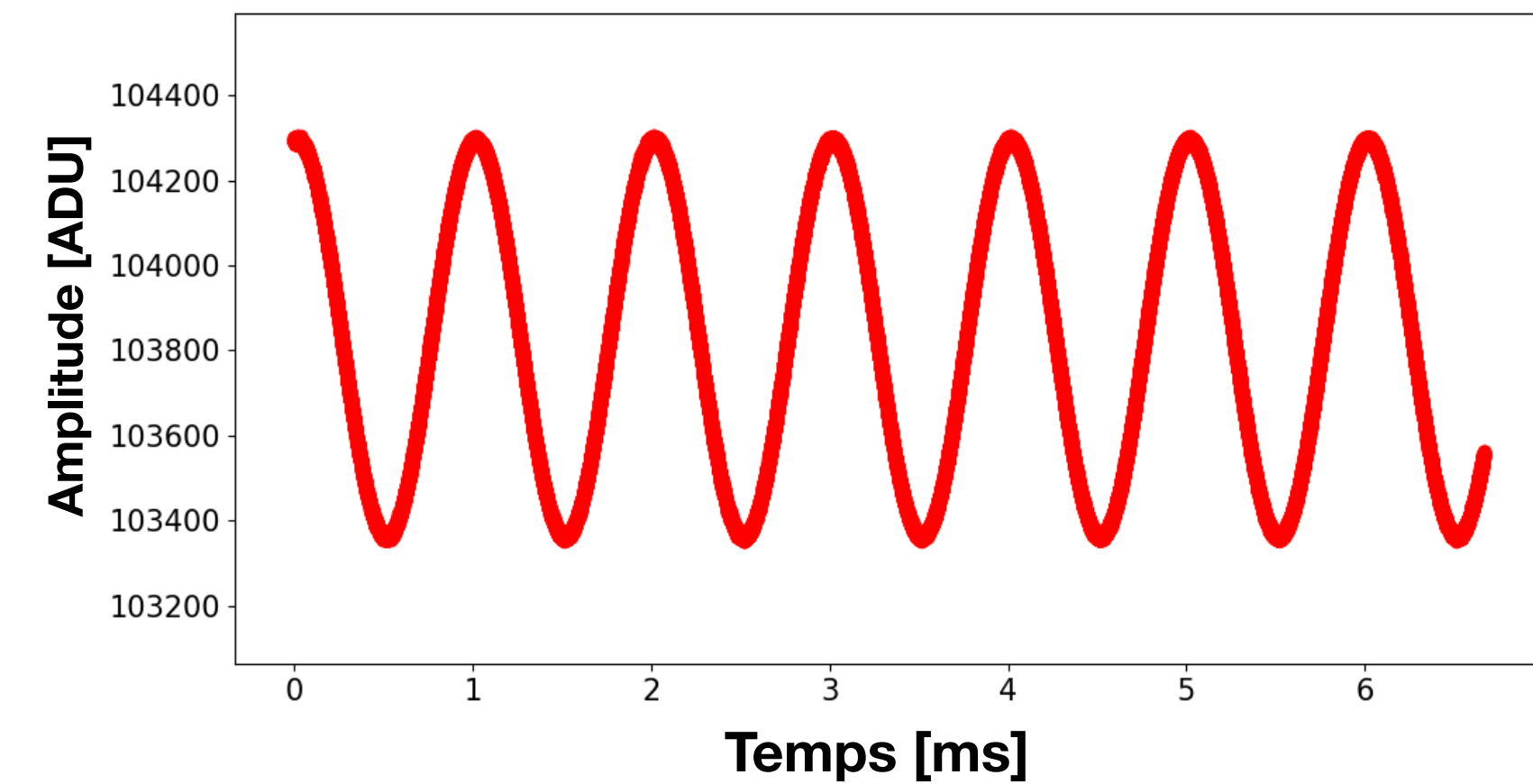
→ Validation des circuits de polarisation



→ Validation des circuits de cadencement



→ Validation des circuits de numérisation



→ Validation de la lecture d'un module CCD



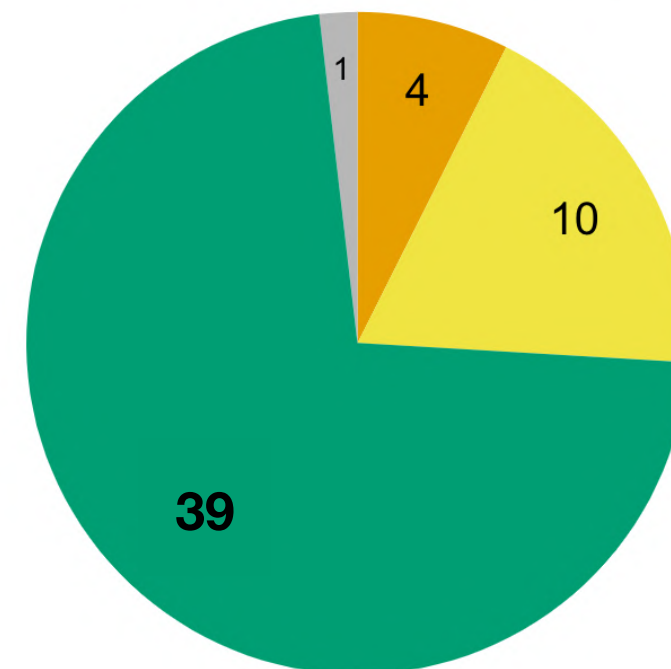
Campagnes expérimentales et résultats

Production et qualification des ACMs

3 Rendement

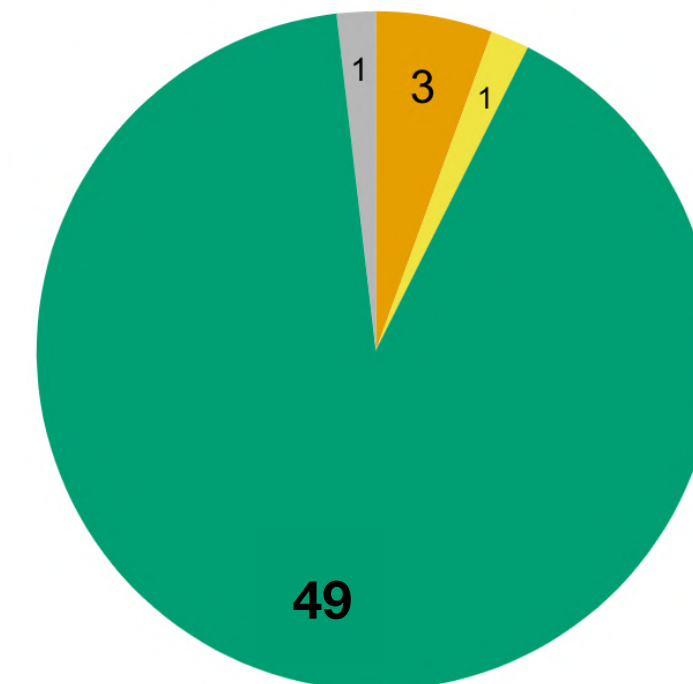
Anomalies majeures liées aux biais de polarisation

- 2 régulateurs changés
- 1 régulateur changé
- Biais fonctionnels
- Pas d'information



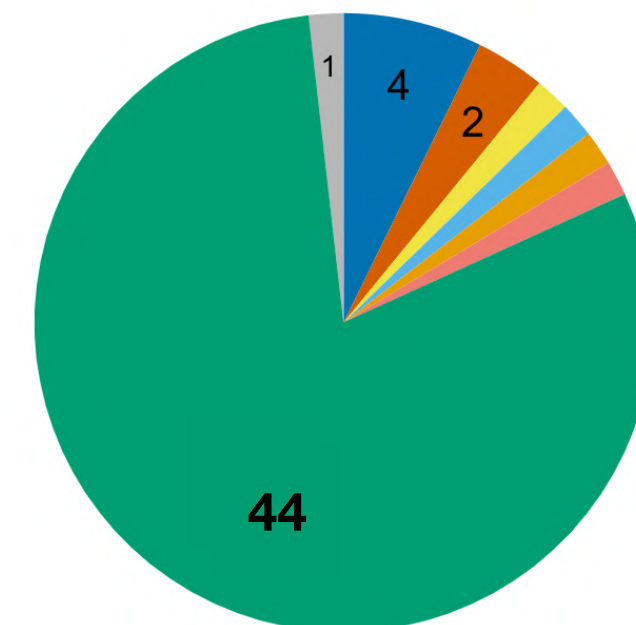
Anomalies majeures liées au FPGA

- Mauvaise référence de FPGA
- FPGA non programmable
- FPGA fonctionnel
- Pas d'information



Anomalies mineures

- Fusible de biais discontinu
- Mauvaise référence de régulateur pour
- Canal ADC mal polarisé
- Horloge non fonctionnelle
- Communication par ethernet non
- EEPROM
- Absence d'anomalies mineures
- Pas d'information



Sur 54 cartes produites :

→ **31 qualifiées** du premier coup.

→ **22 réparées** dont 10 au LPNHE.

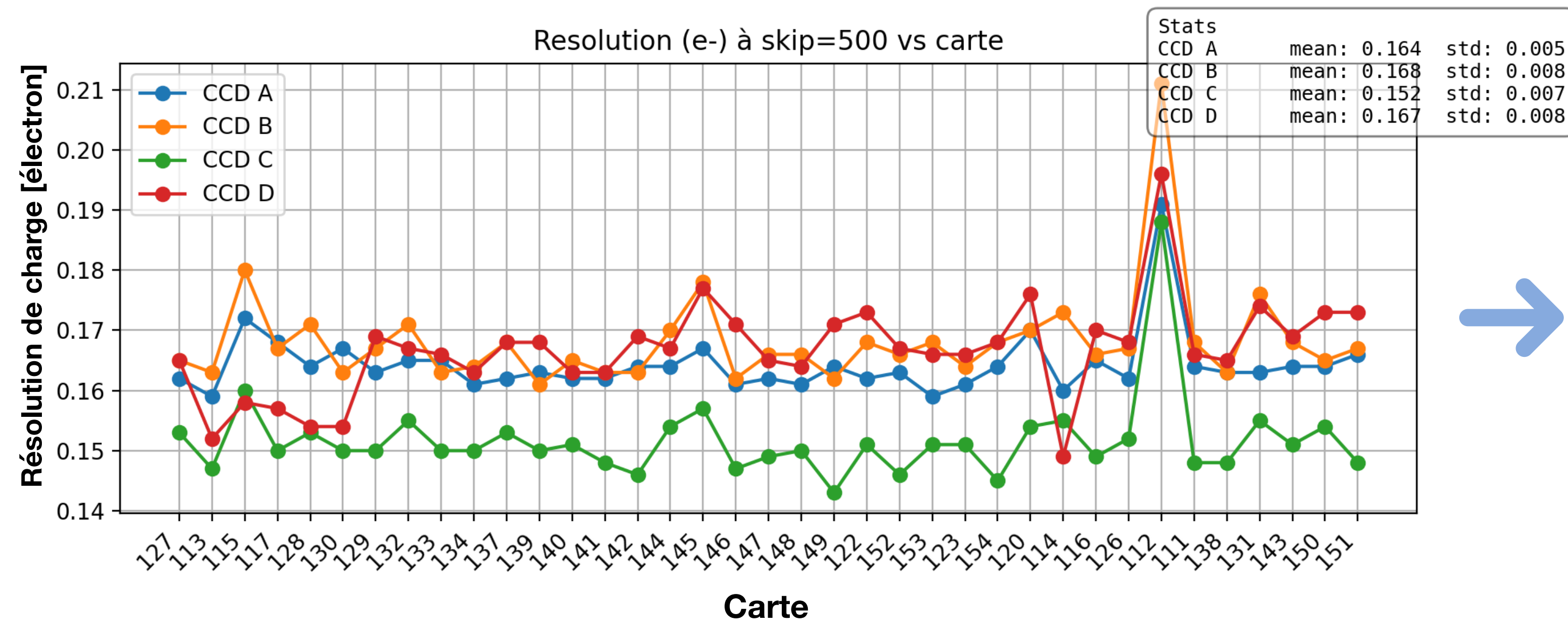
→ **1 éliminée**

Campagnes expérimentales et résultats

Production et qualification des ACMs

4

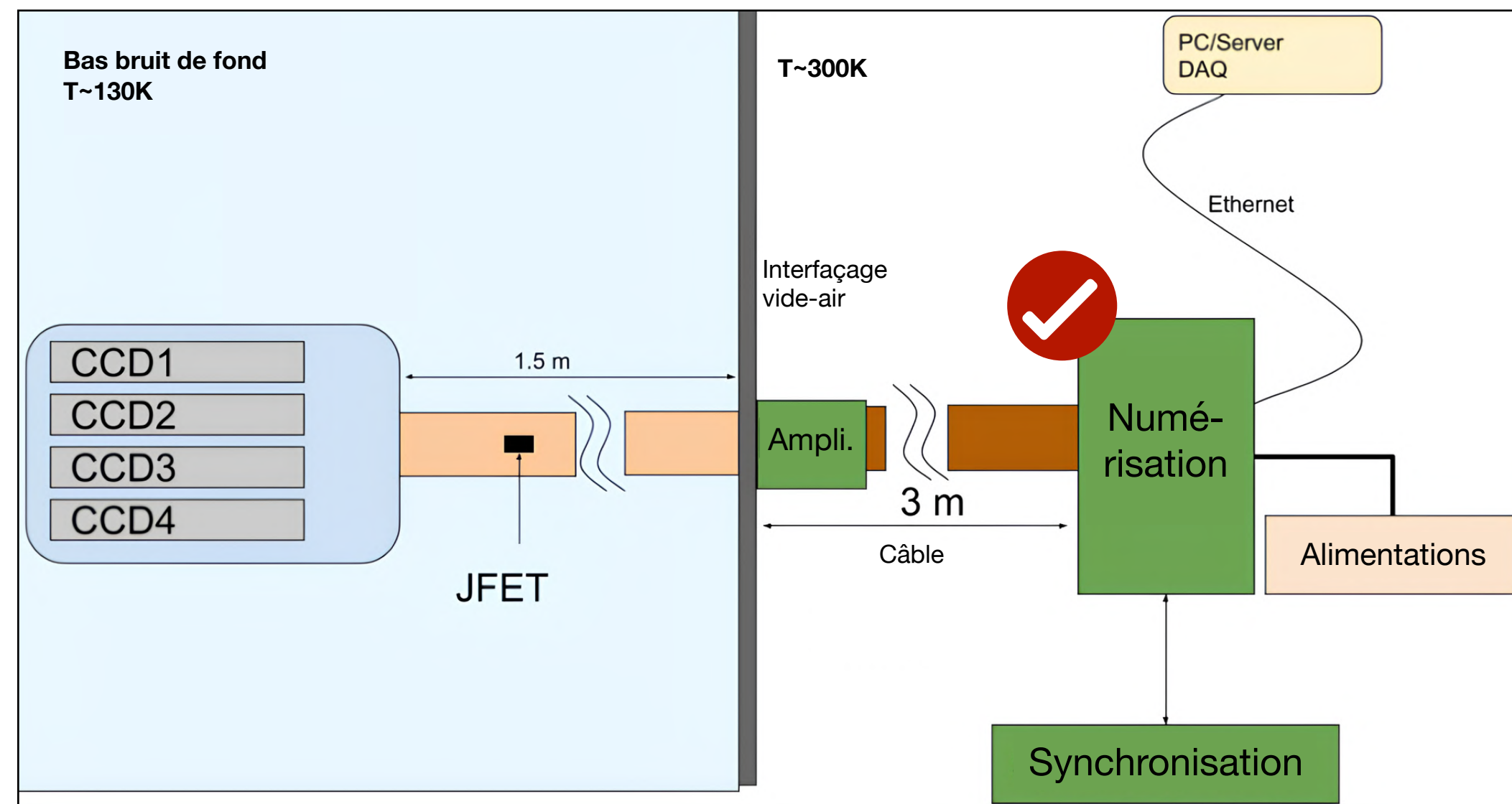
Performances



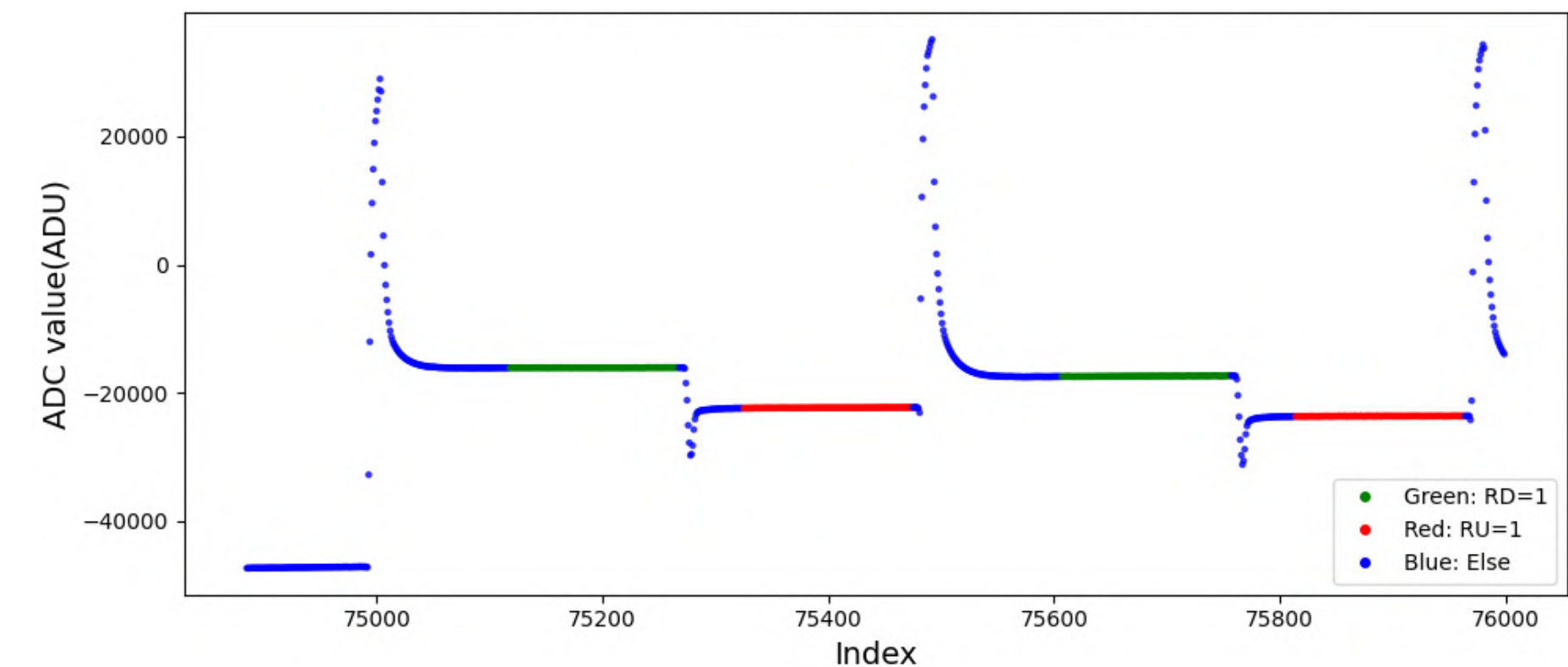
Sur 54 cartes produites : **53 qualifiées !**

Conclusion

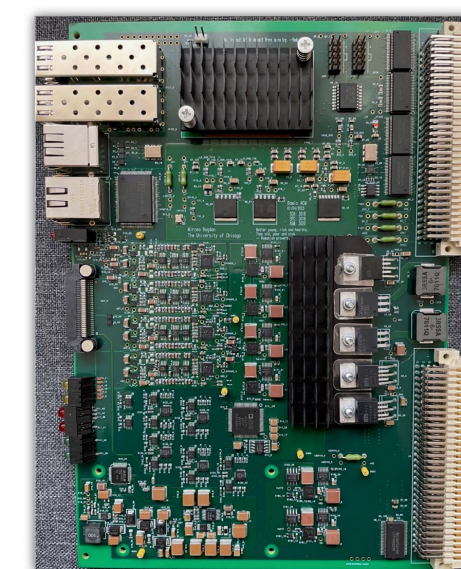
Conclusion et perspectives



➔ **Développements firmware :**
Numérisation et prétraitement (skipper)



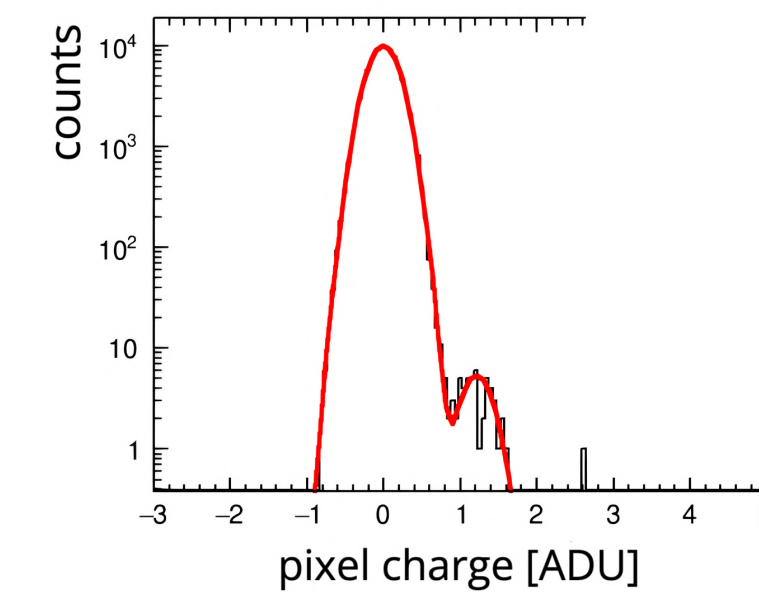
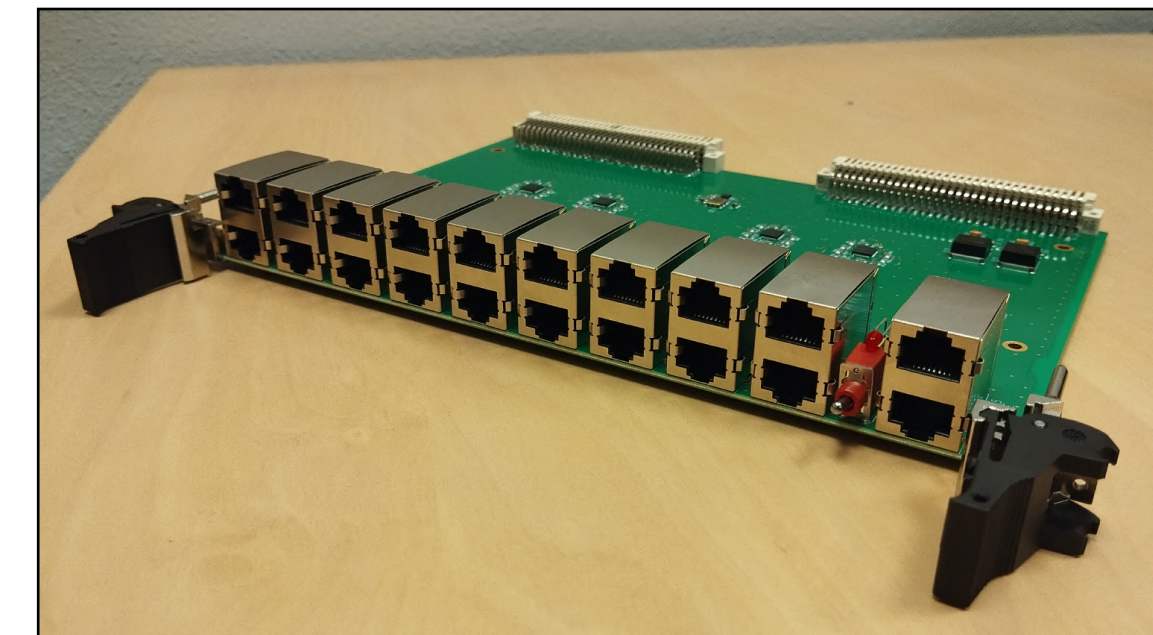
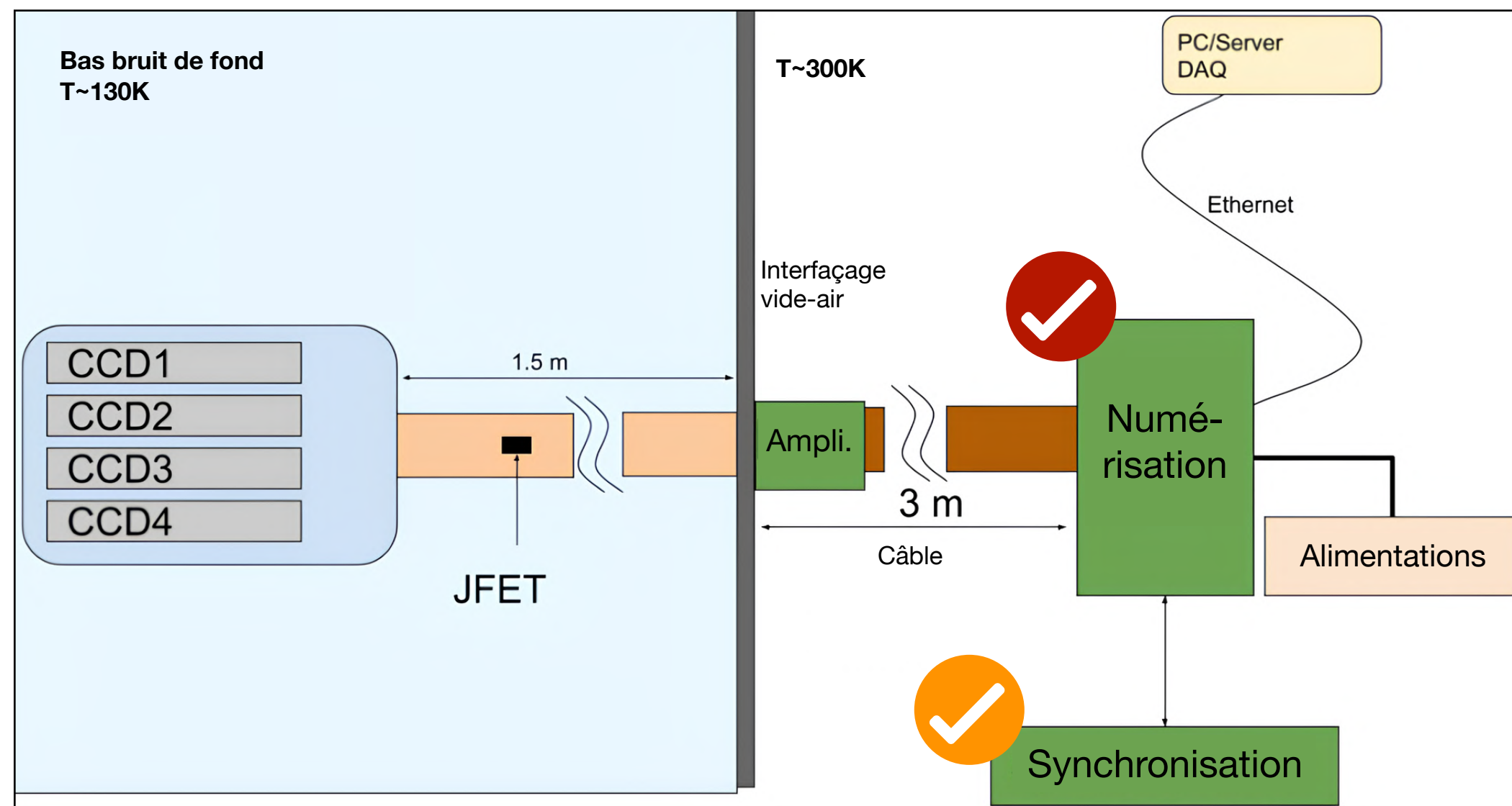
➔ **Qualification de la production finale des cartes ACMs.**



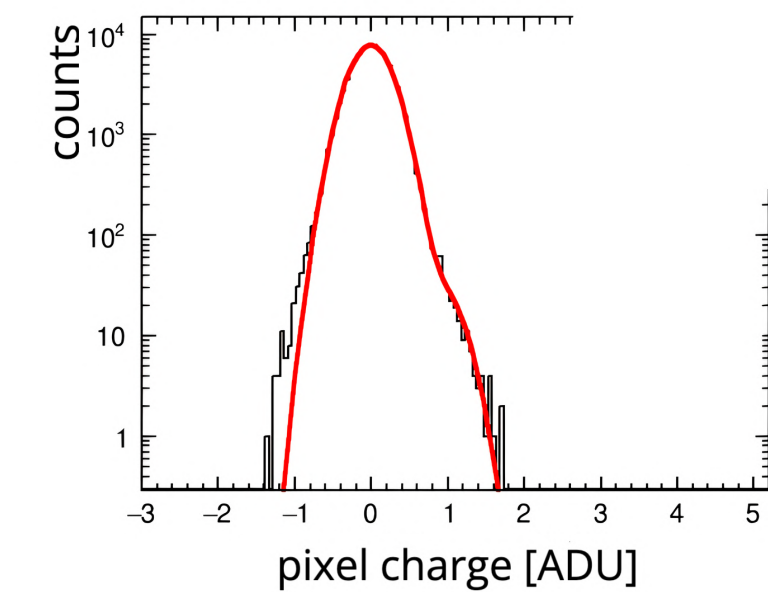
53 cartes qualifiées !

Conclusion et perspectives

➔ Développement d'un système de synchronisation.

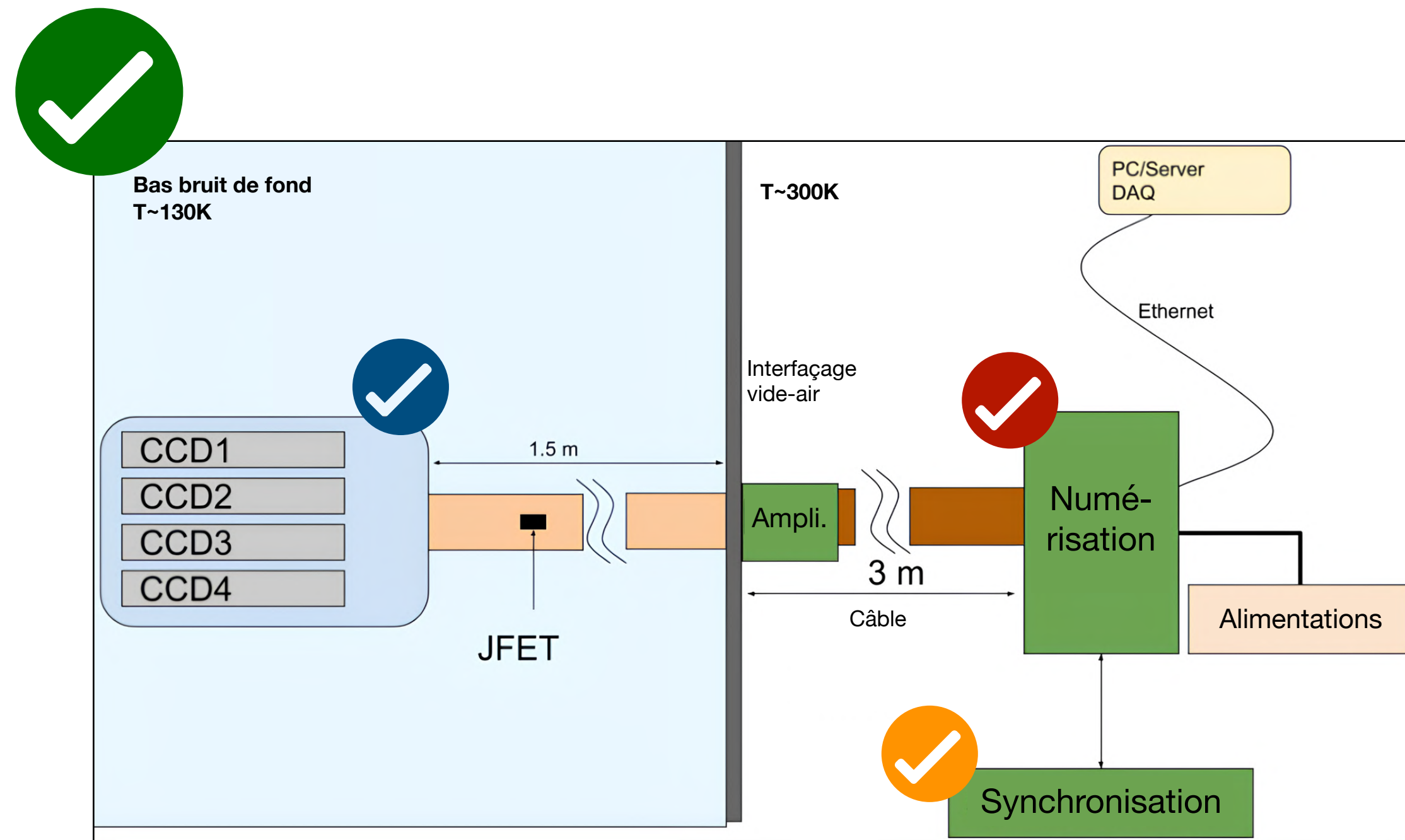


synchrone



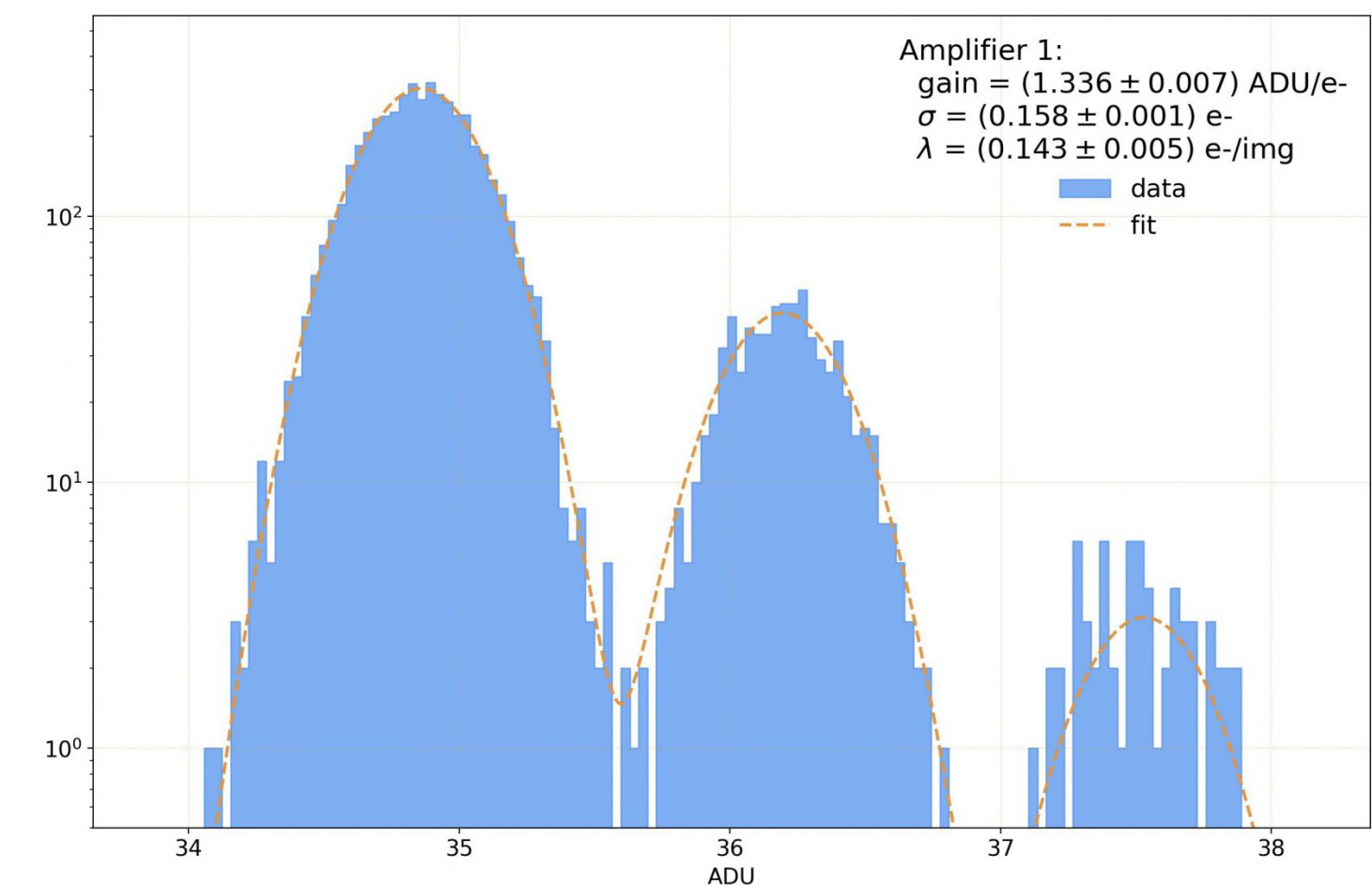
asynchrone

Conclusion et perspectives

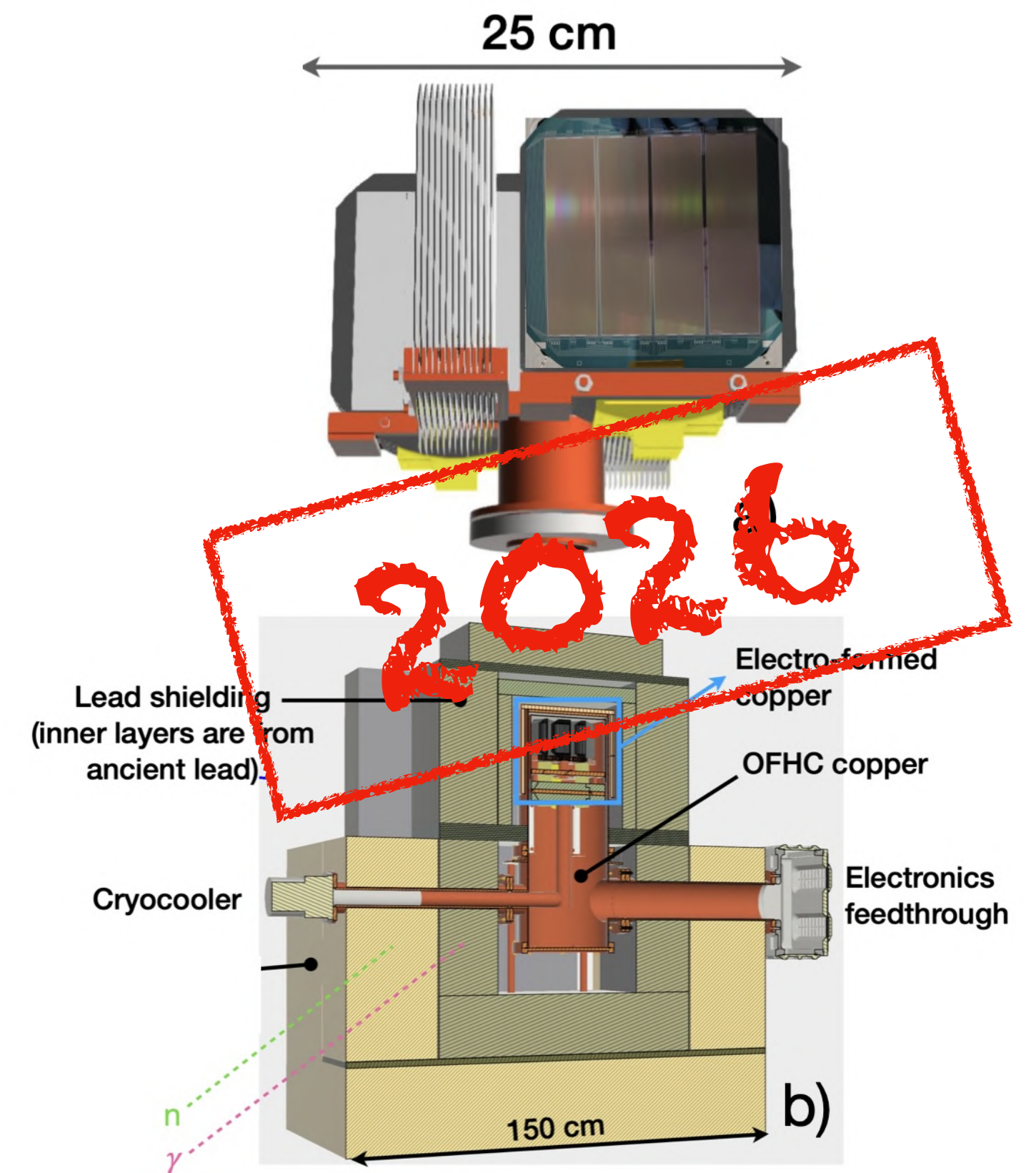
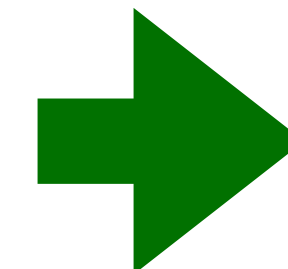
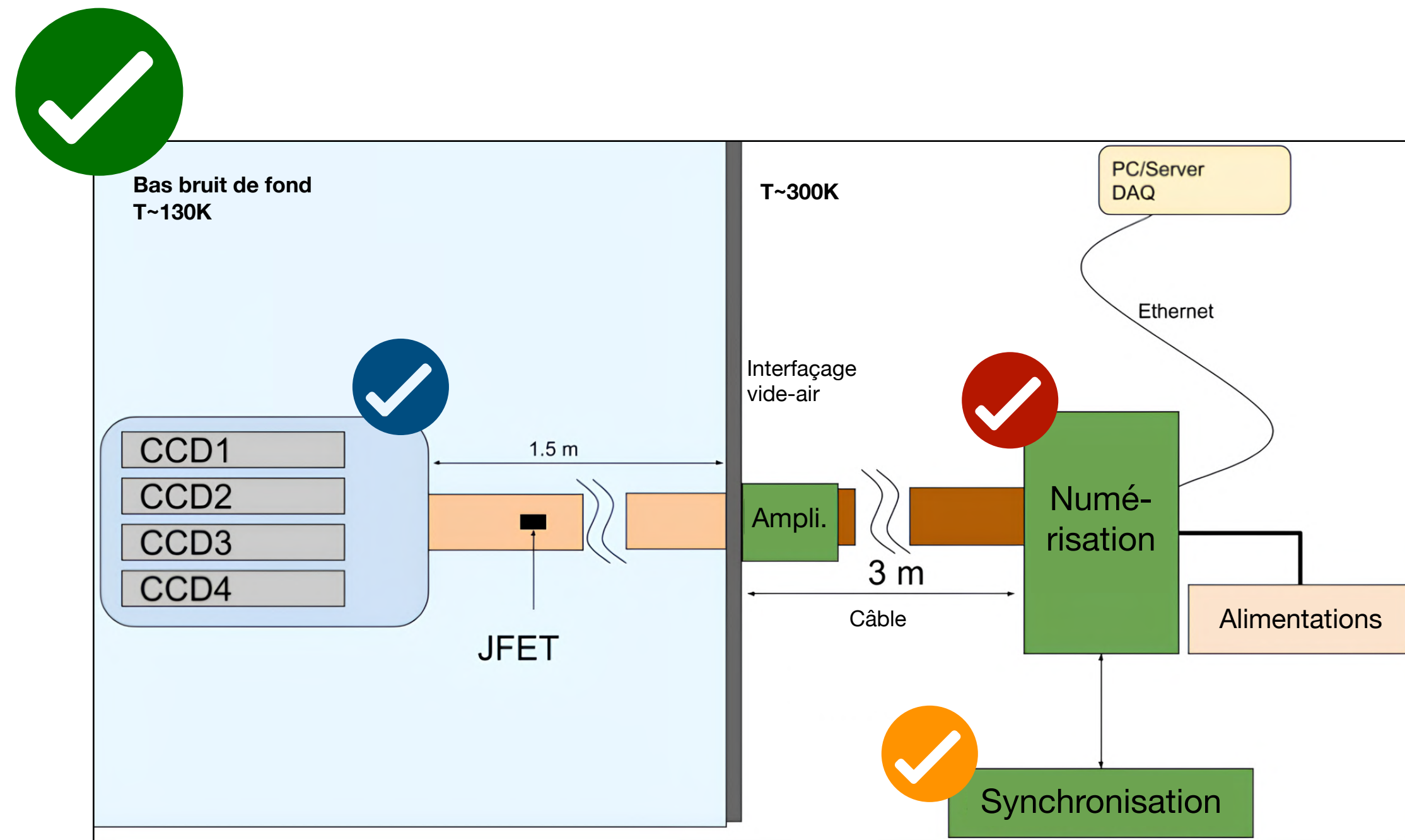


➔ Validation d'une nouvelle chaîne d'acquisition et de contrôle de CCD.

➔ Intégration sur site accomplie **avec succès**.



Conclusion et perspectives



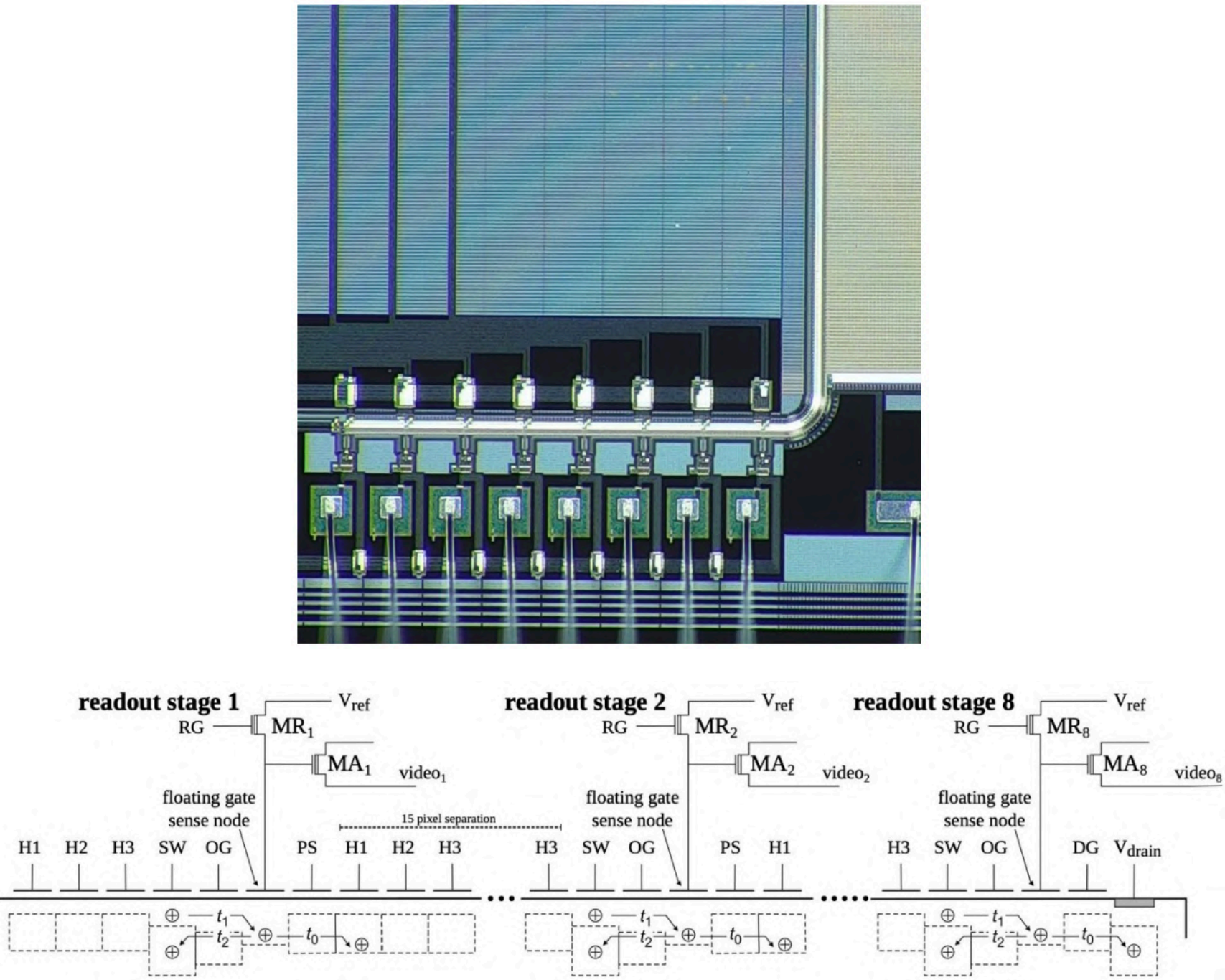


Merci !

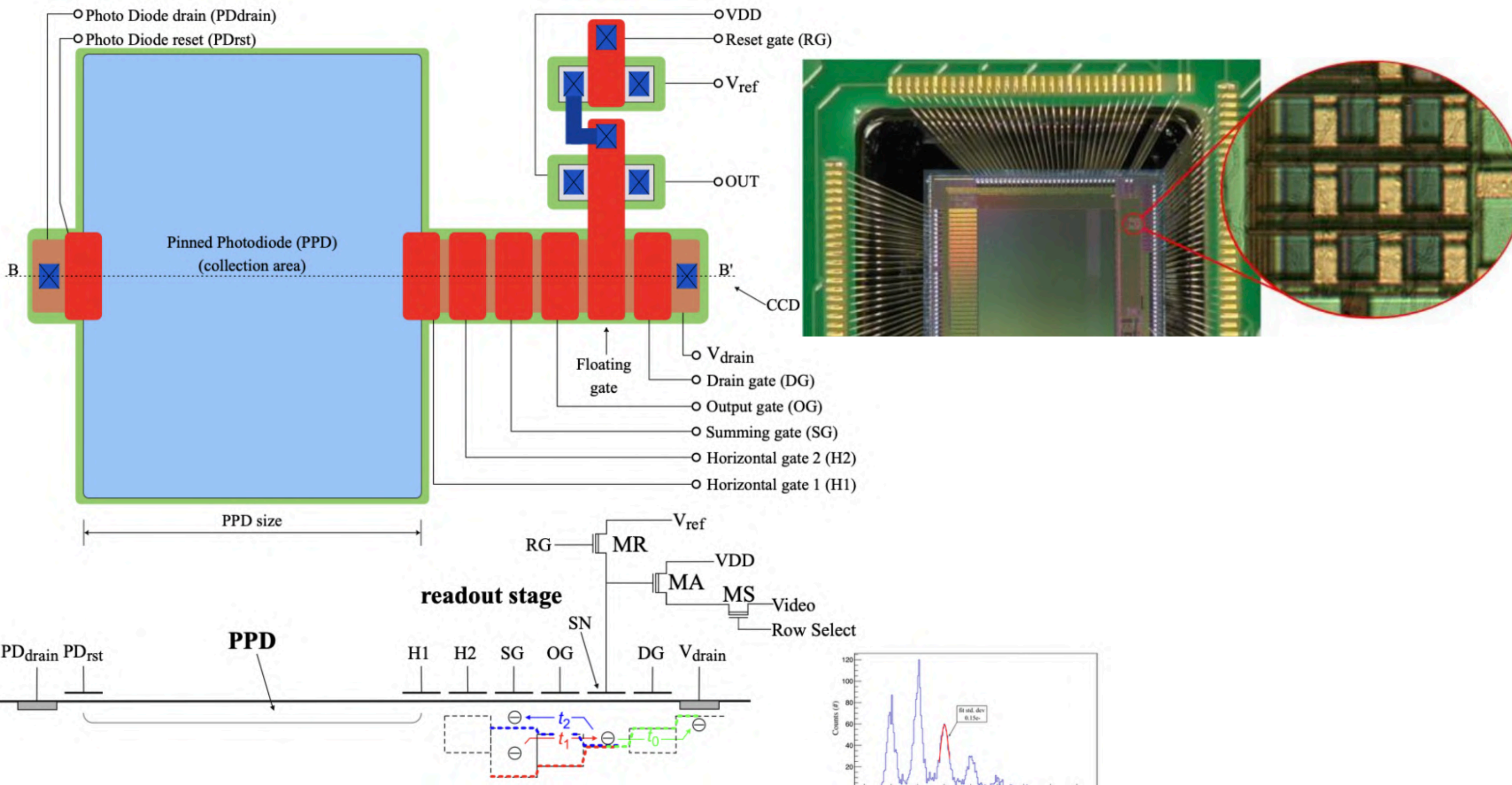
Backup

Prospectives techniques

CCD-MAS (2021)



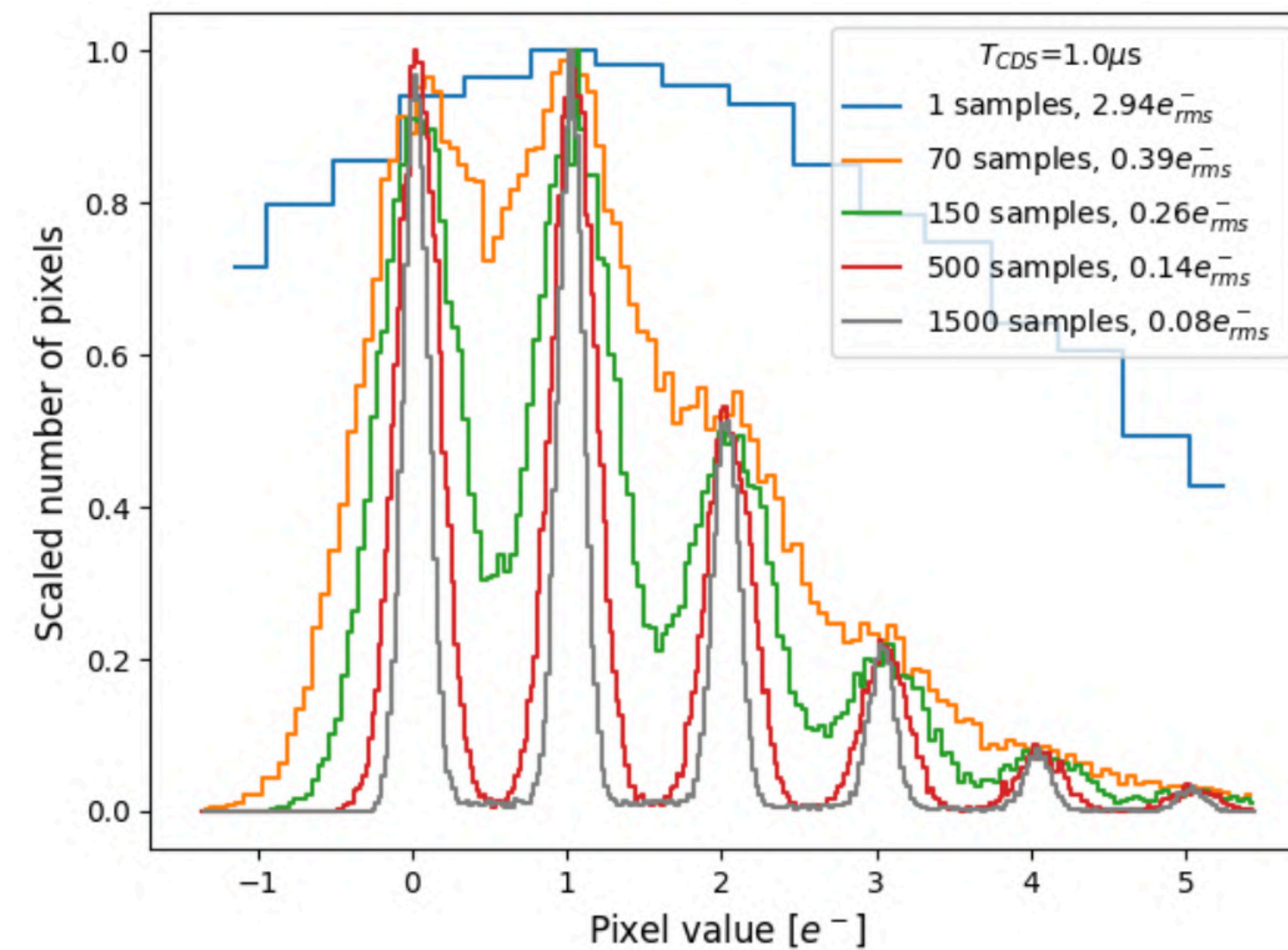
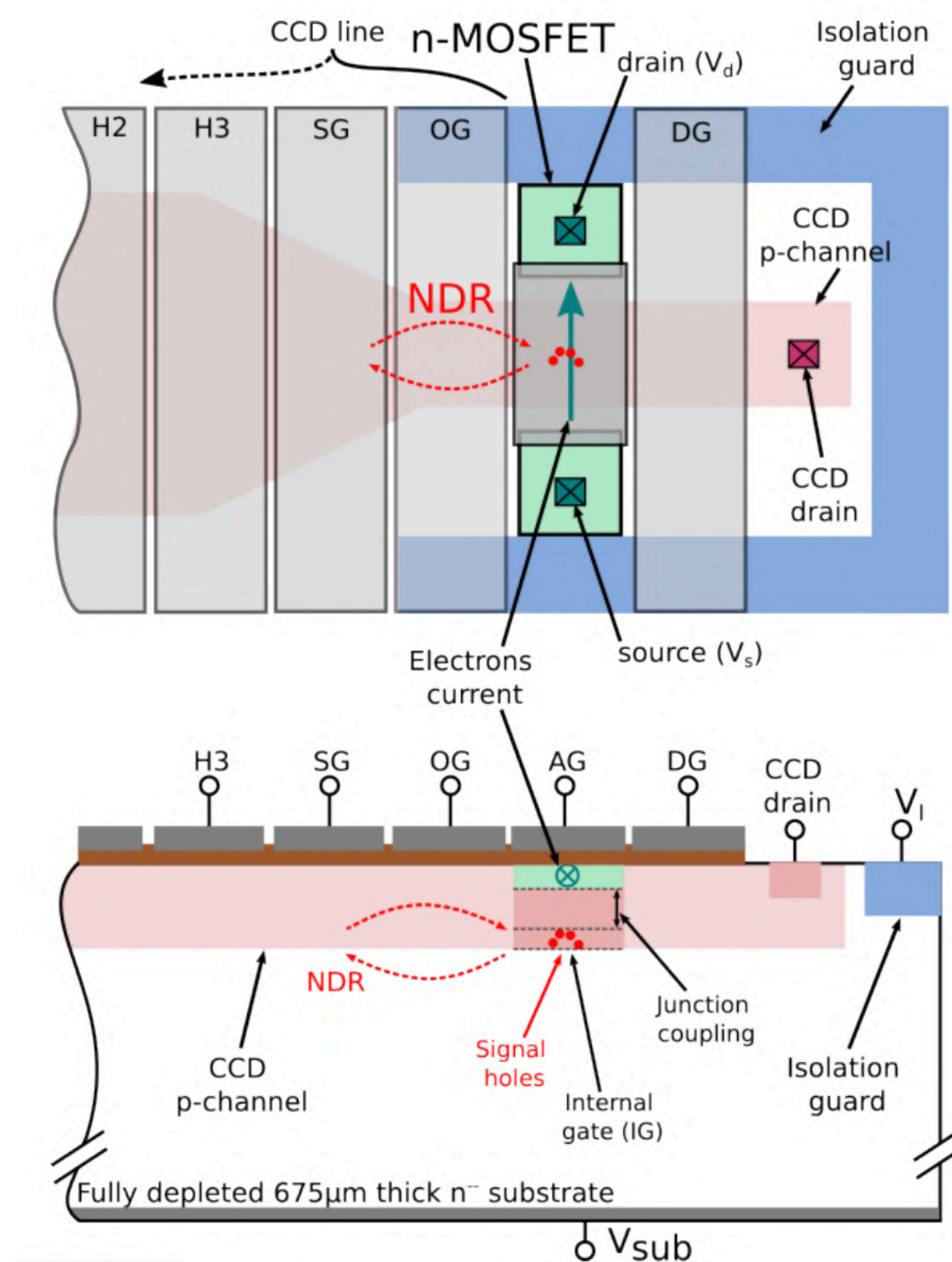
Skipper-In-CMOS



Backup

Prospectives techniques

SiSeRo

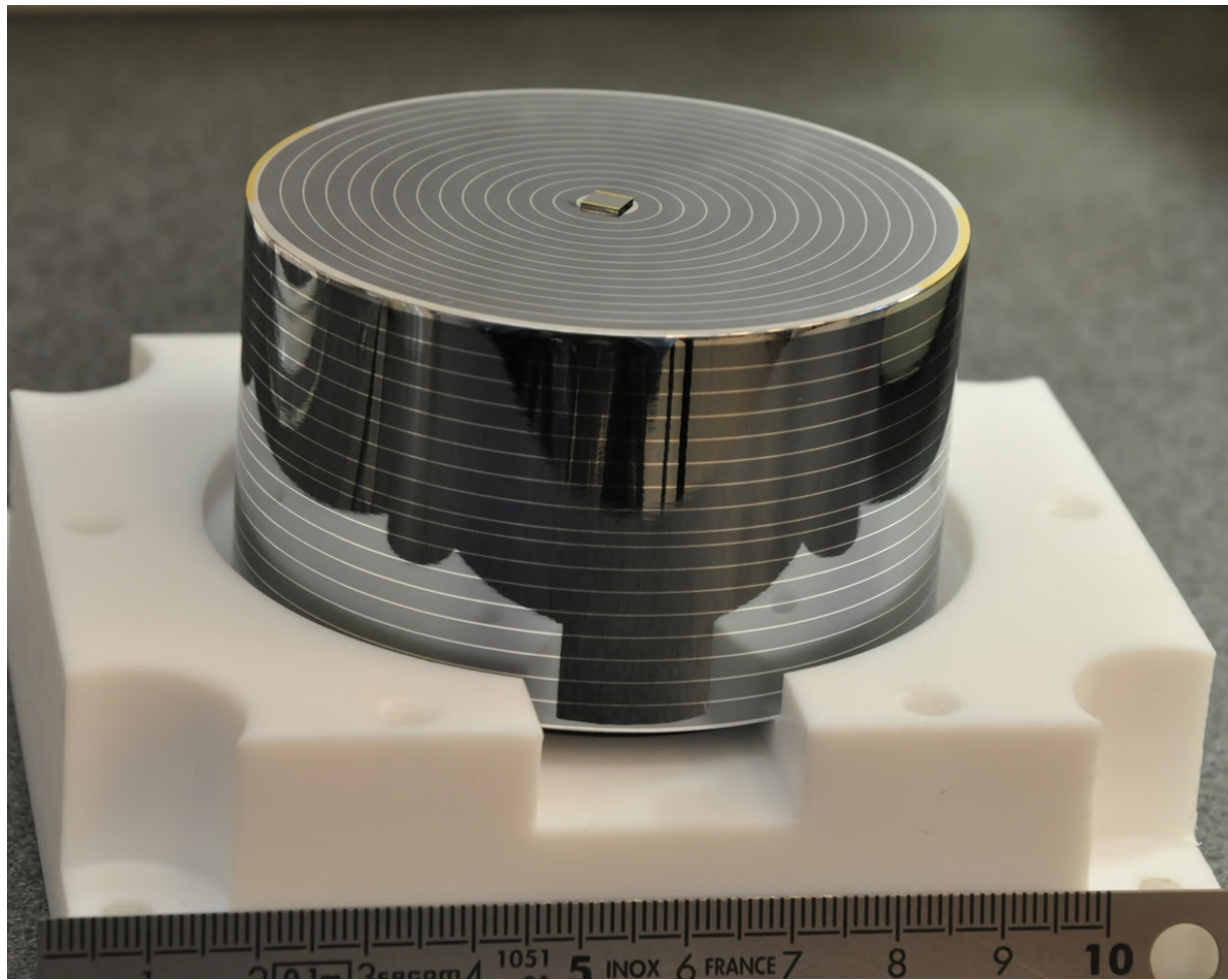




Merci !

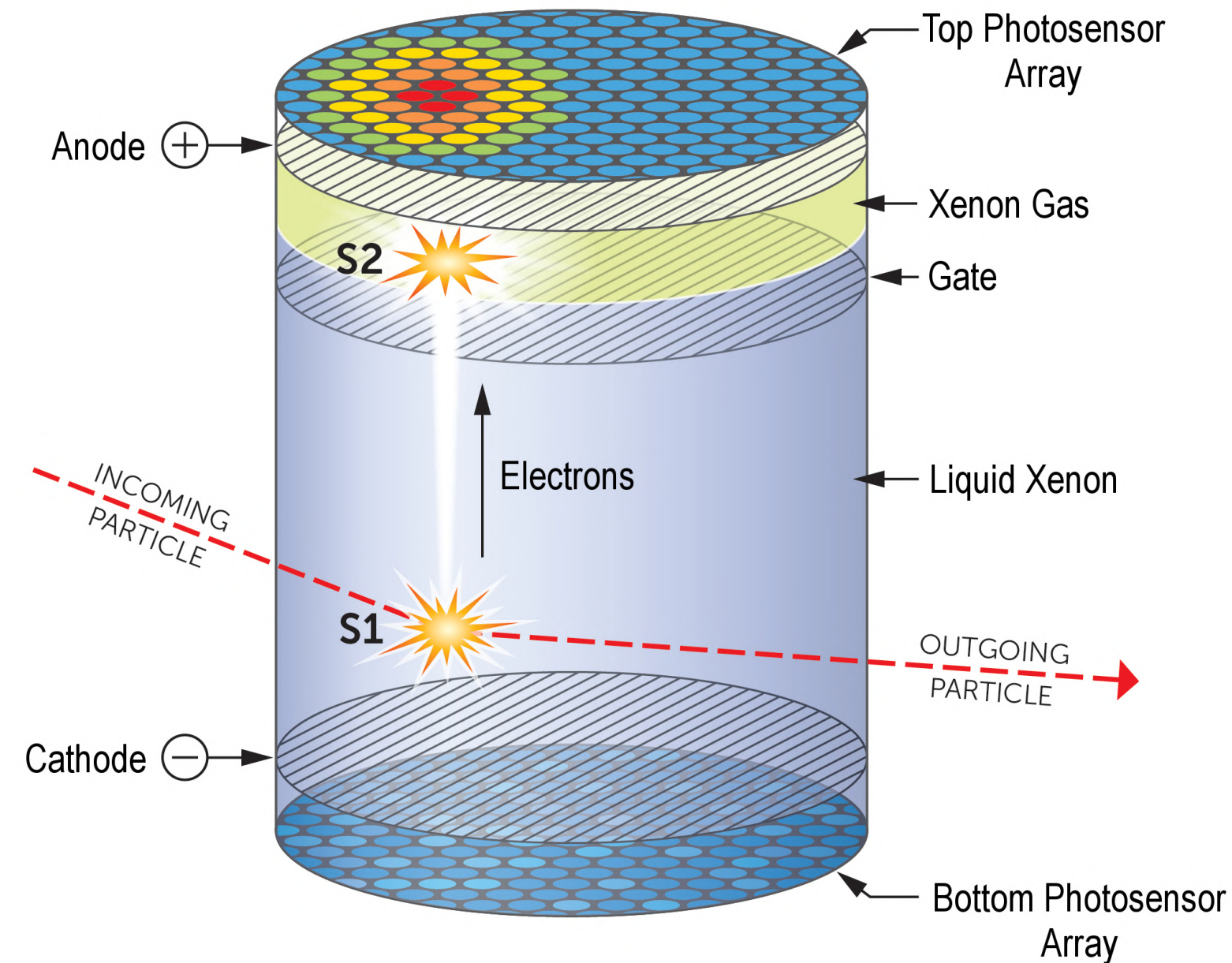
Backup

Détecteurs directs de matière noire



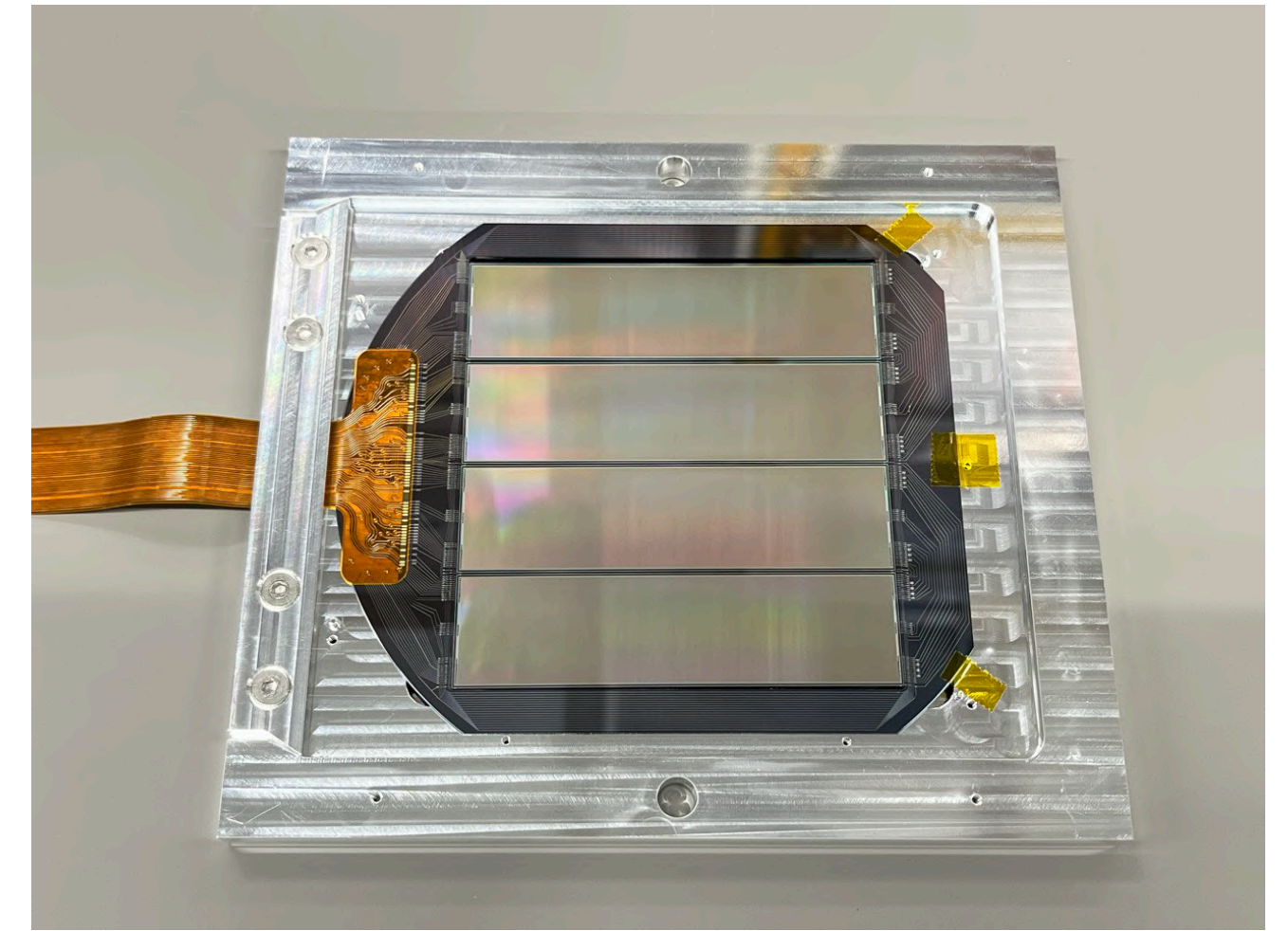
Bolomètres germanium (EDELWEISS, SuperCDMS):

- Cristal de Ge et/ou de Si ($\sim 10\text{mK}$)
- Thermistances (μK)
- Dépôt de chaleur + charges



Chambre à projection temporelle double-phase (XENONnT, Darkside):

- Gaz noble (double phase)
- Photomultiplicateurs
- Émission de lumière (+charges)

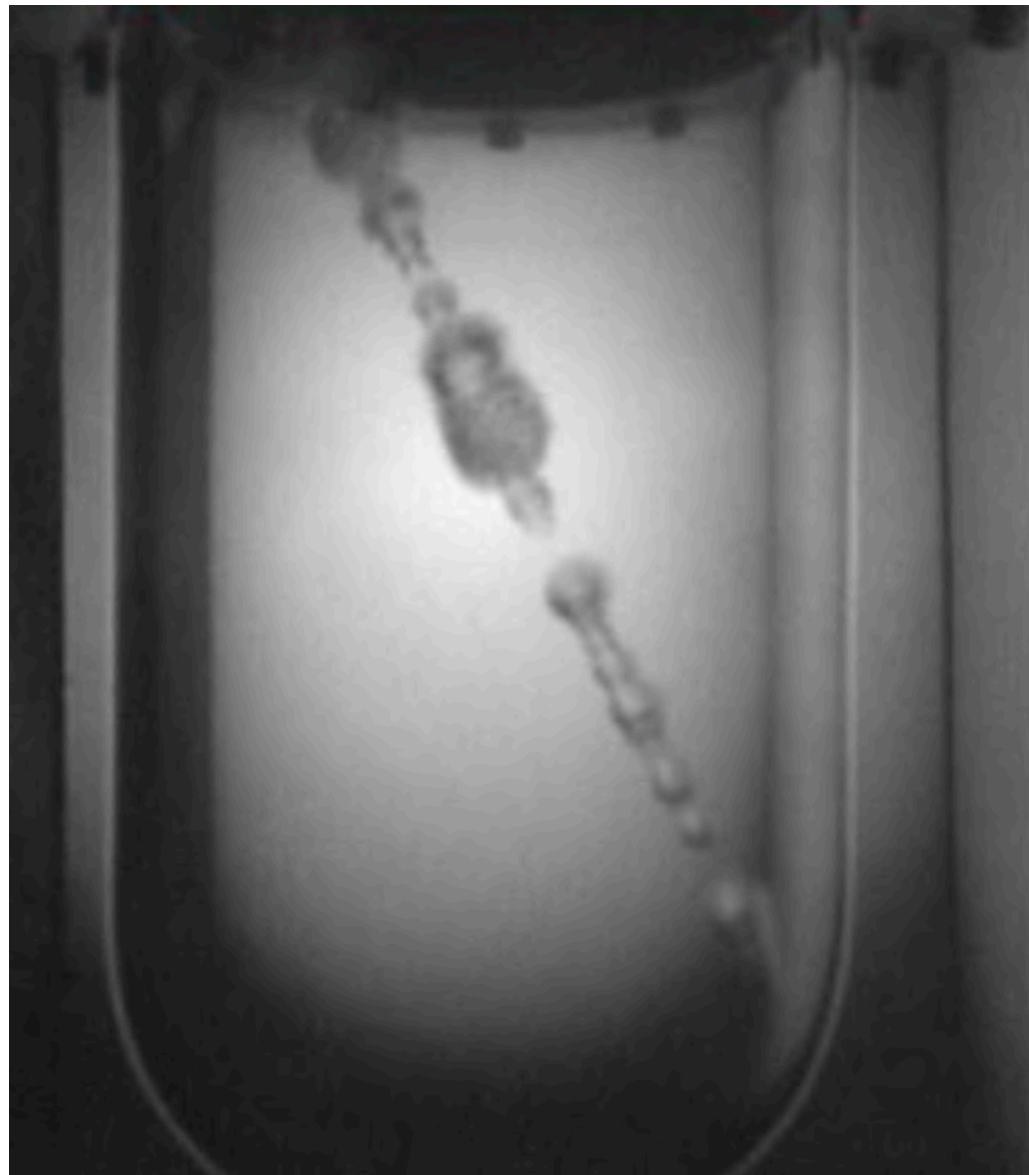


Dispositif à transfert de charges (DAMIC-M, SENSEI):

- Cristal de silicium
- Matrice de pixels
- Dépôt de charges (ionisation)

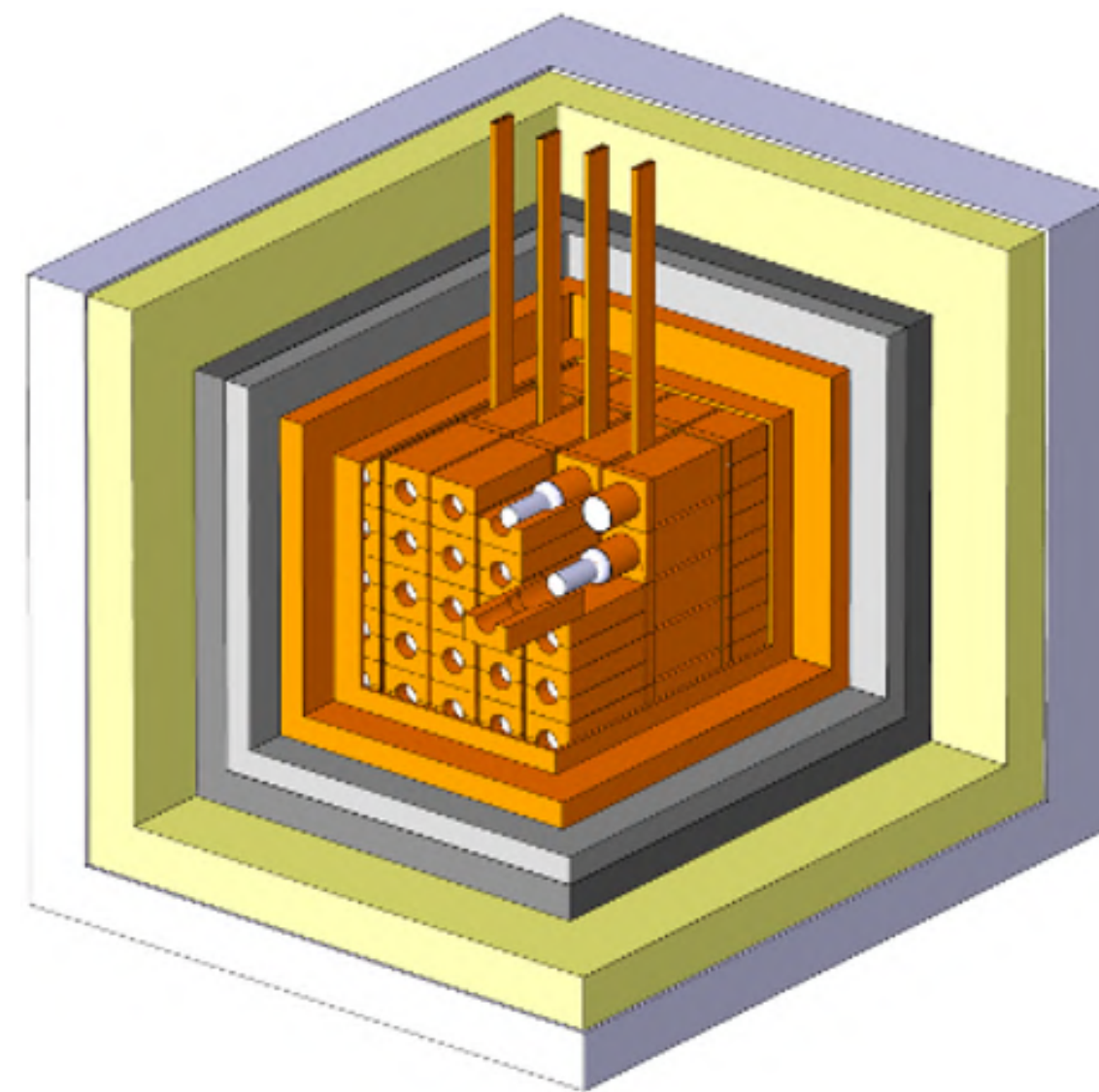
Backup

Détecteurs directs de matière noire



Chambre à bulles (PICO):

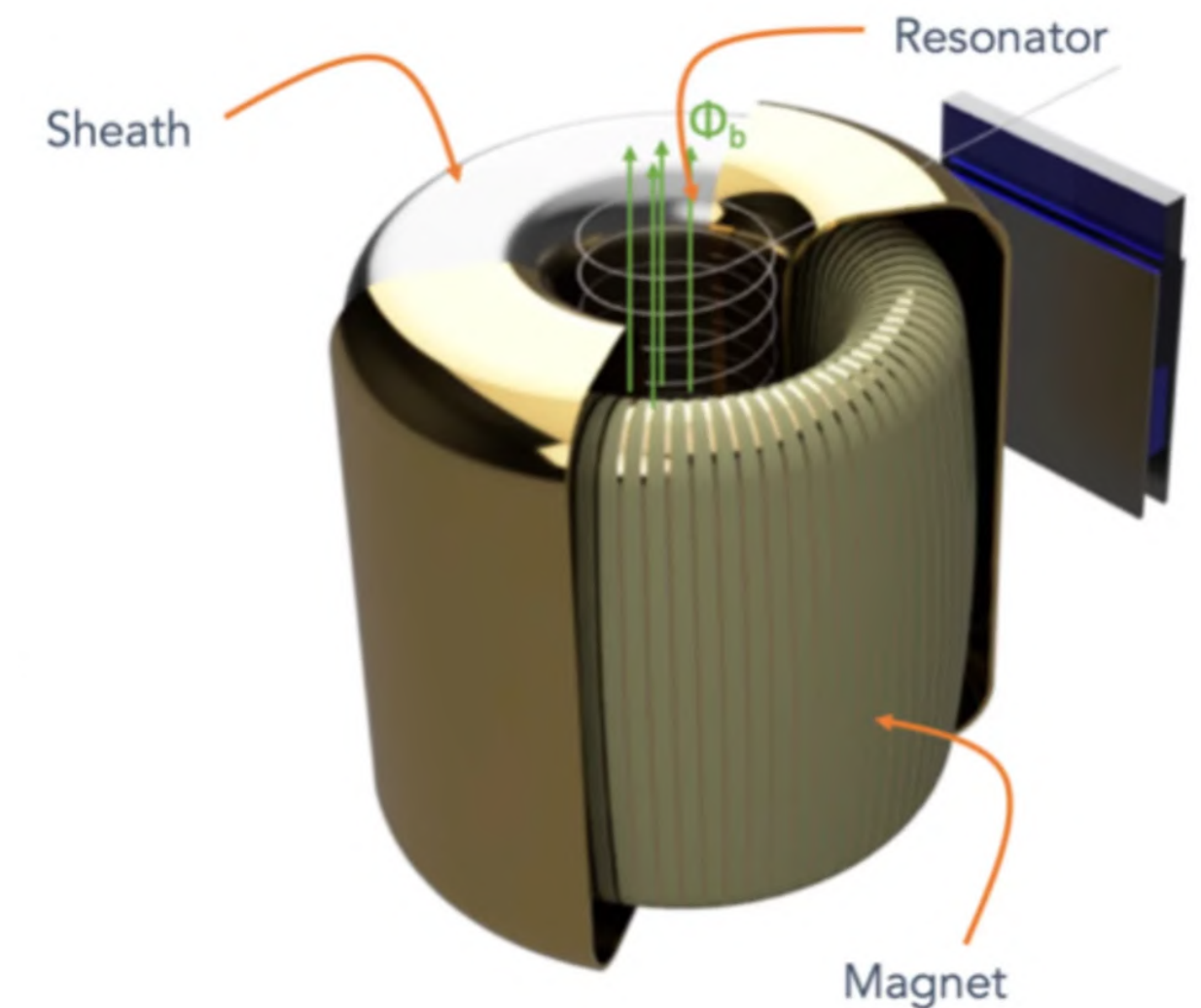
- Fréon liquide en état de surchauffe
- Bulle de gaz (transition de phase)
- Senseur piézoélectrique (onde de choc acoustique)



Scintillateurs solides (DAMA/LIBRA):

- Iodure de sodium dopé au thallium
- Photomultiplicateurs
- Émission de lumière (scintillation)

CRESST (Tingstate Ca)

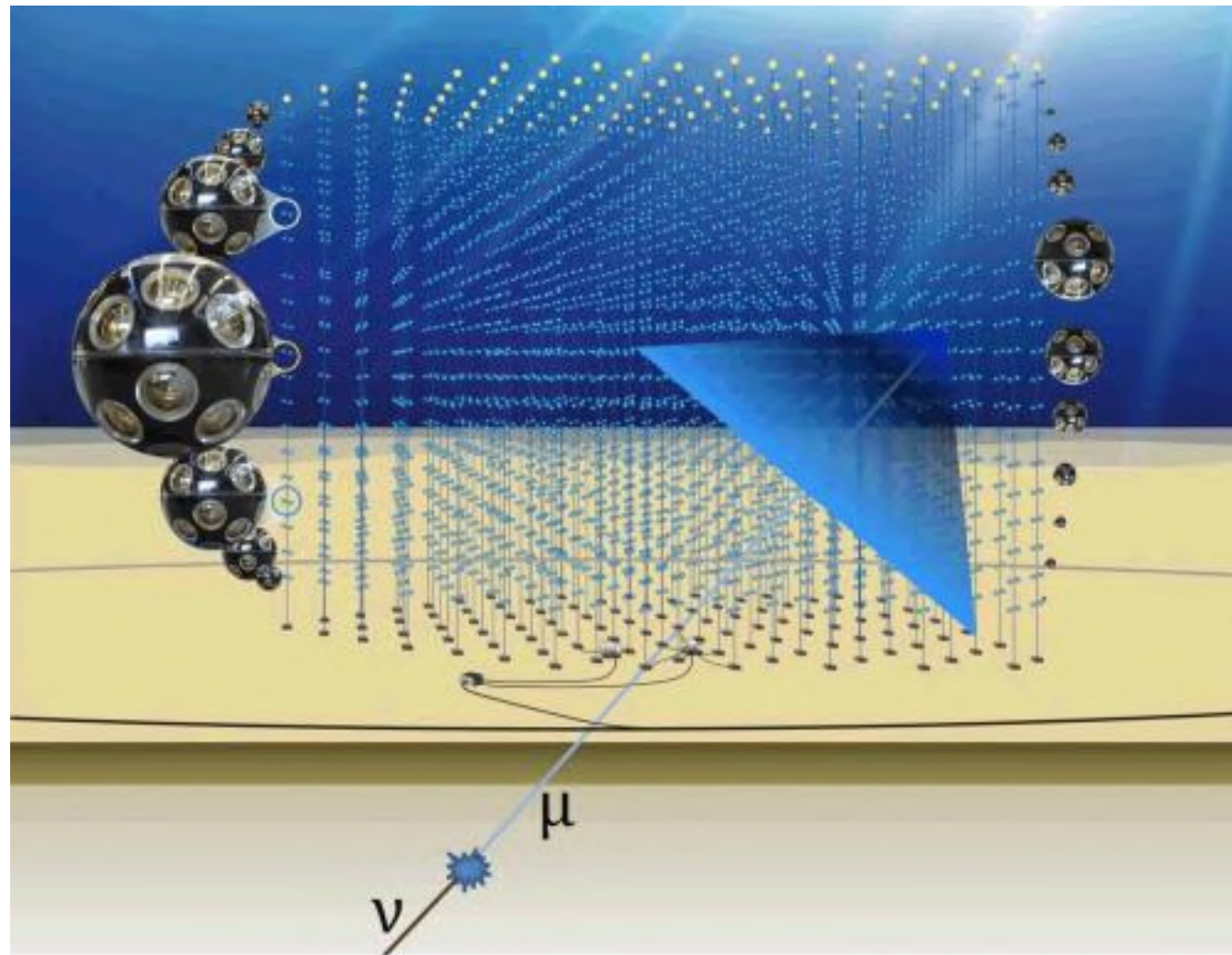


Circuit LC résonant (Dark Matter Radio):

- Bobine + capacité \sim mK
- Conversion en courant électrique oscillant
- Amplification par addition constructive
- Mesure avec SQUID

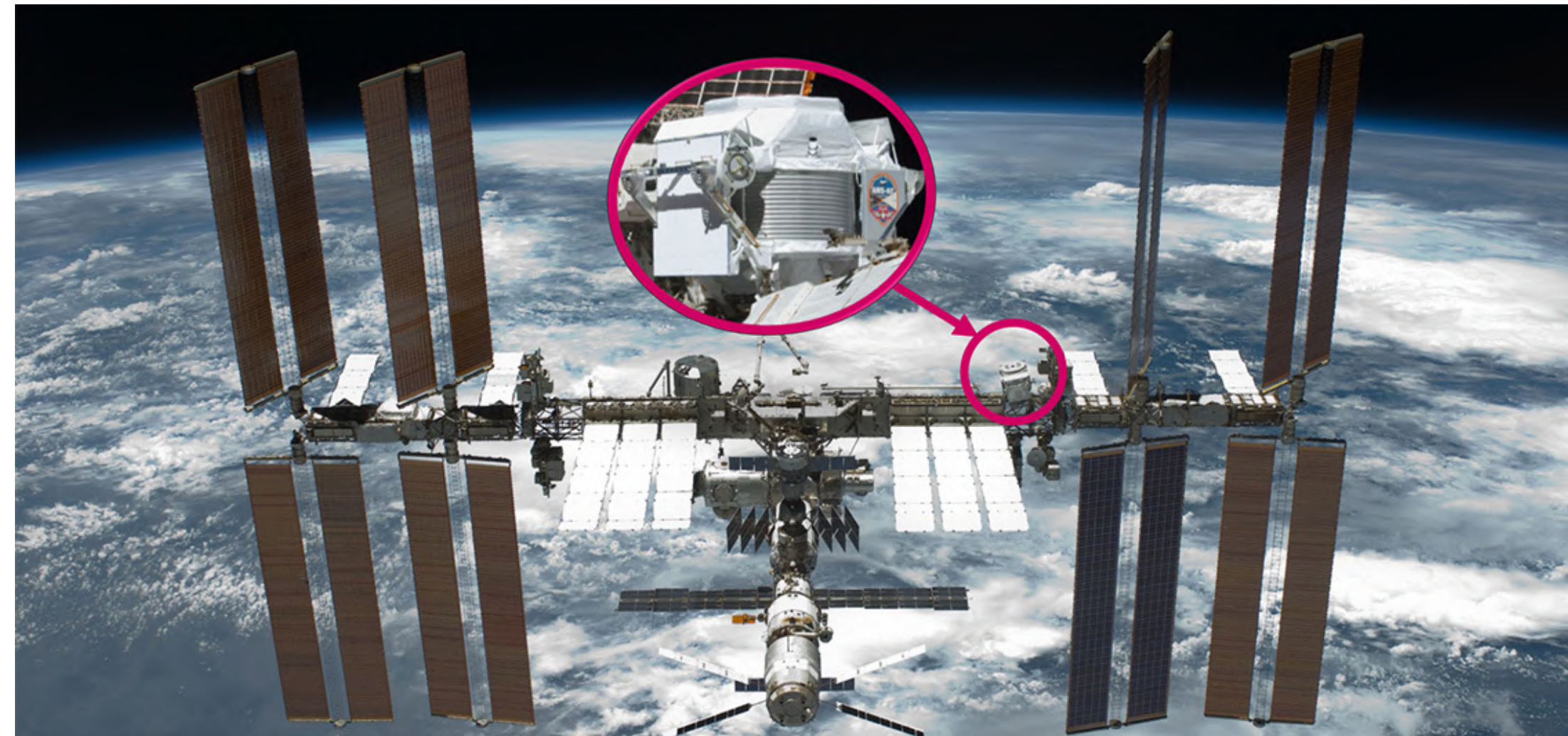
Backup

Détecteurs indirects de matière noire



Observatoire de neutrinos sous-marin/sous-glace (KM3NET, IceCube)

- Eau, glace
- Photomultiplicateurs
- Emission de lumière (Cherenkov)

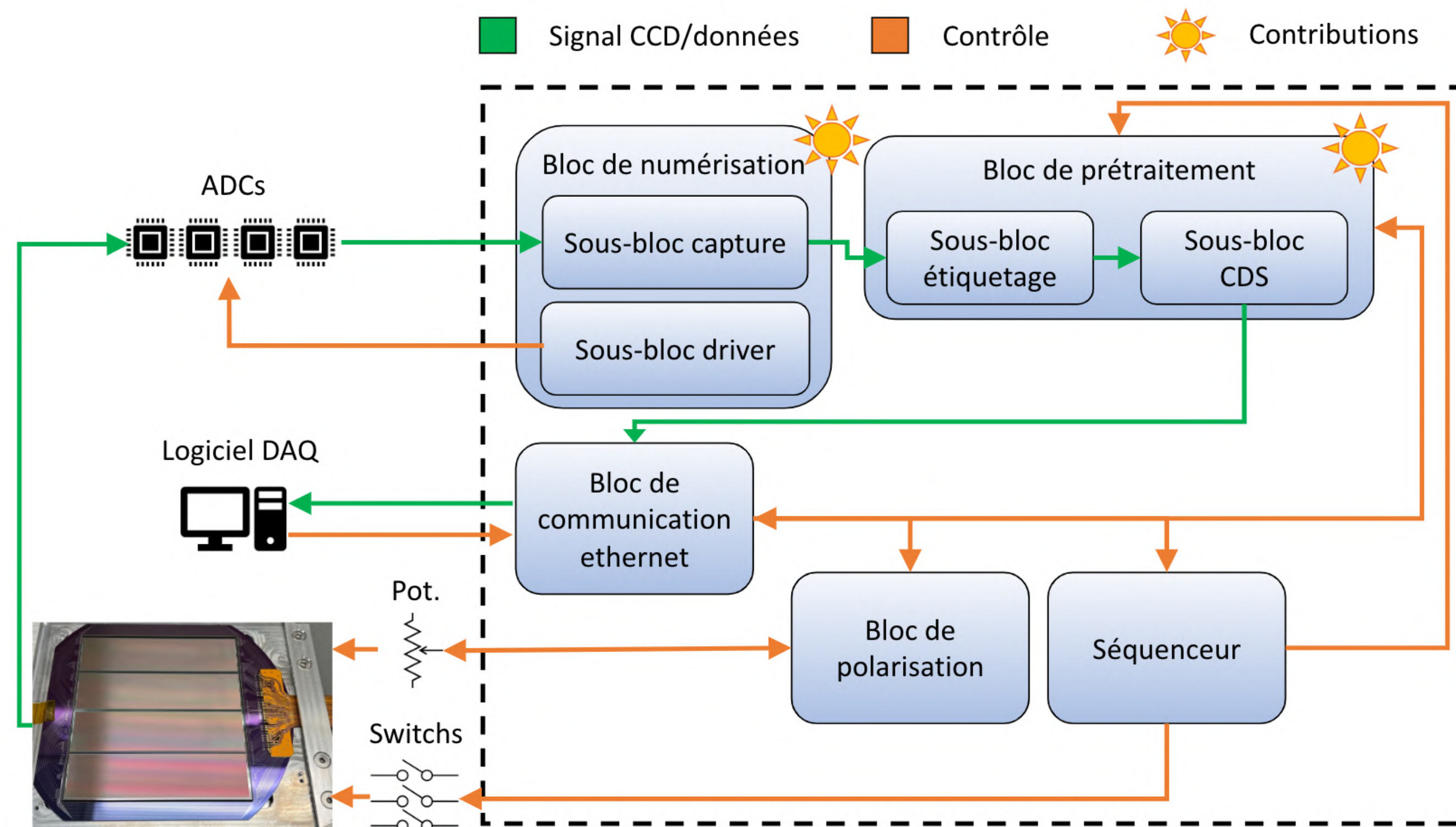


Spectromètre magnétique (AMS-02):

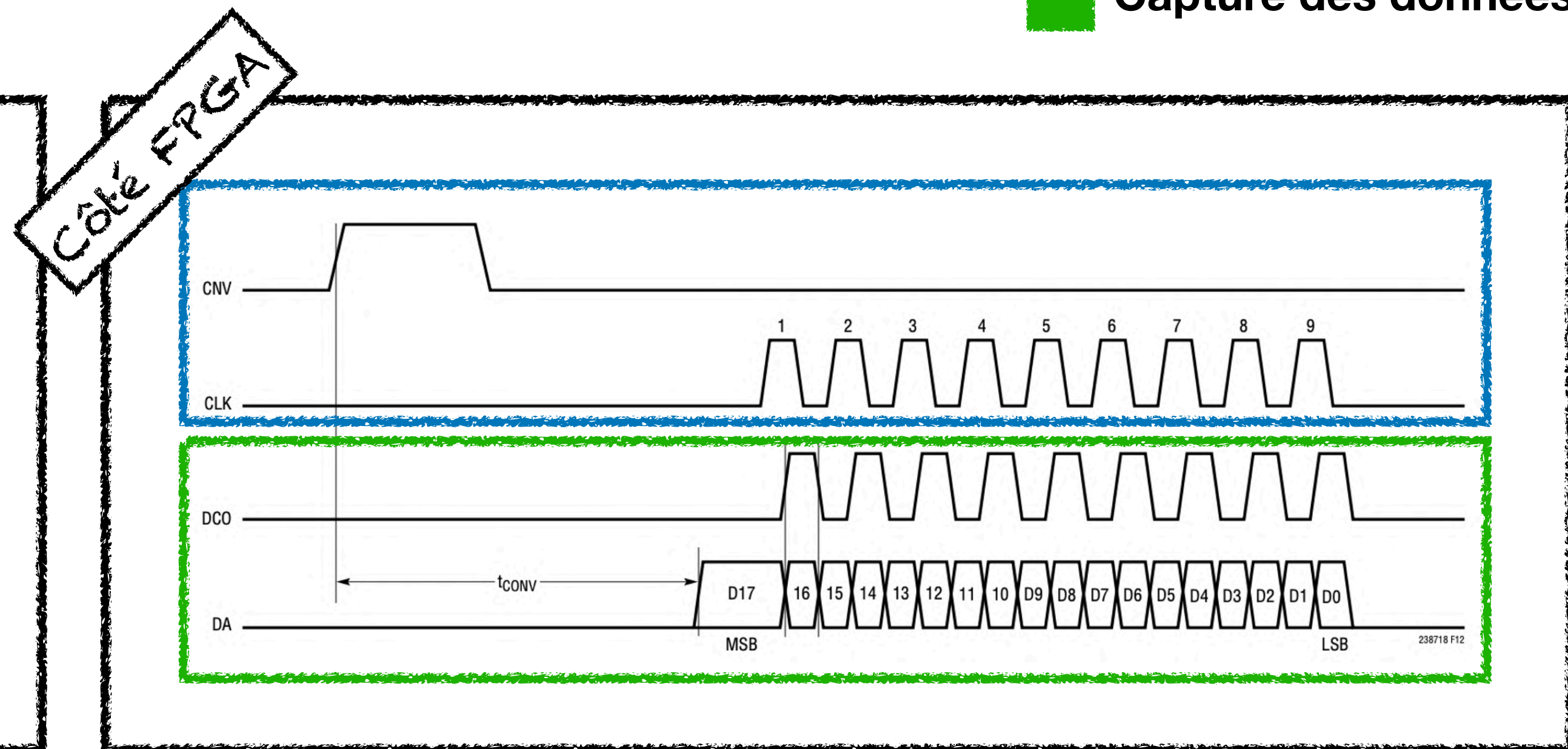
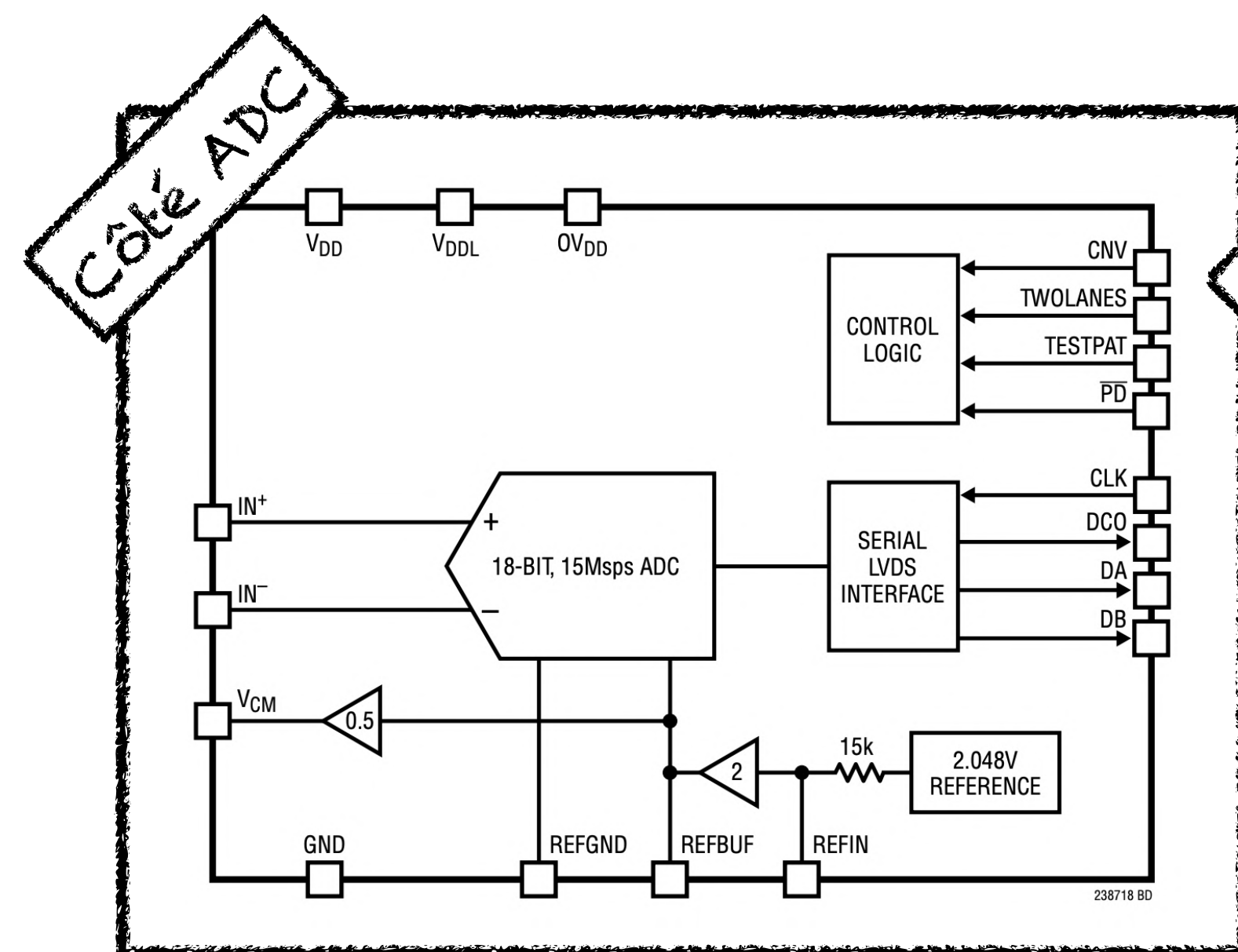
- Mesure des rayons cosmiques dans l'espace
- Excès de positrons, antiprotons

Backup

Structure générale du firmware

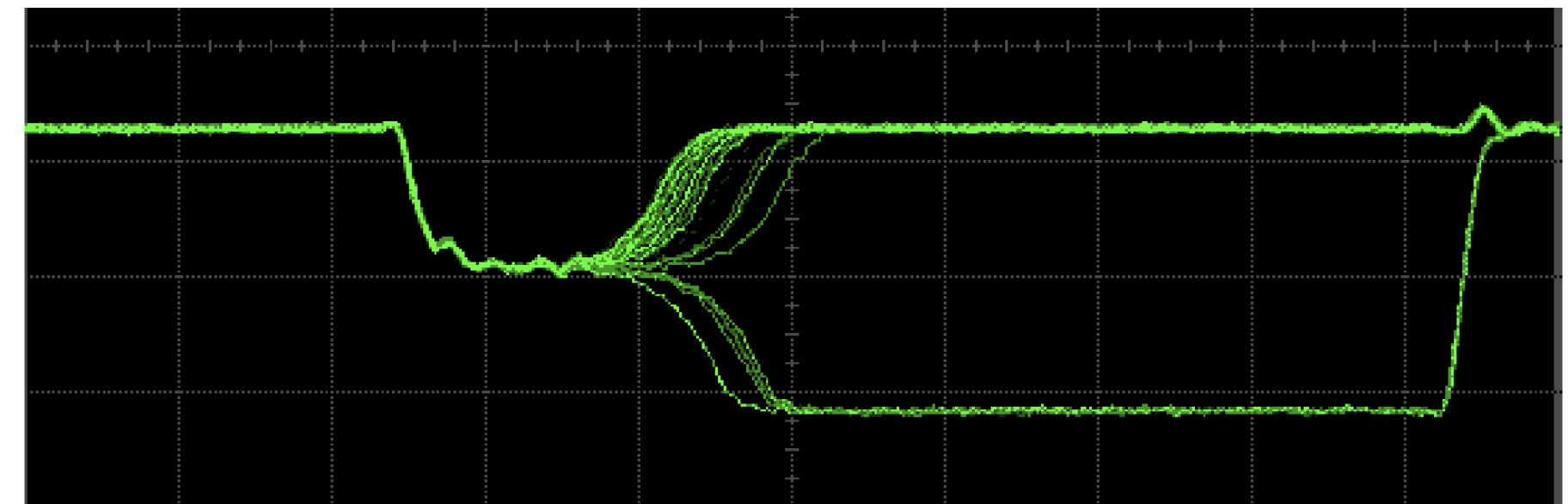
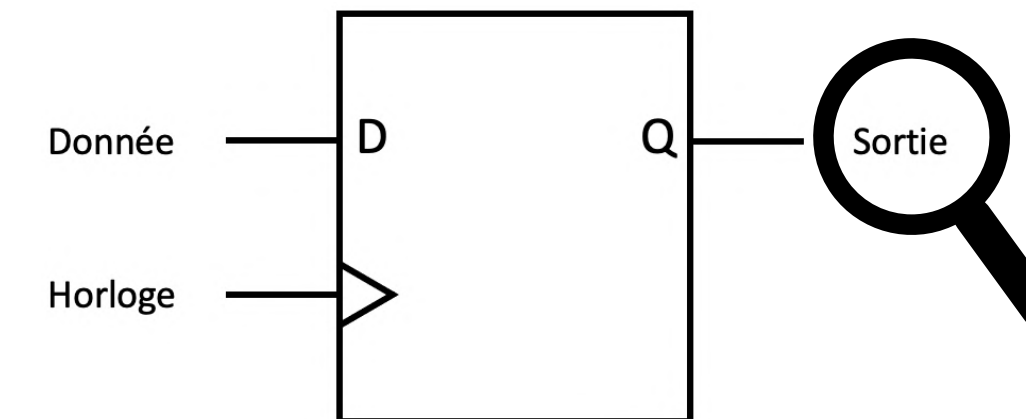
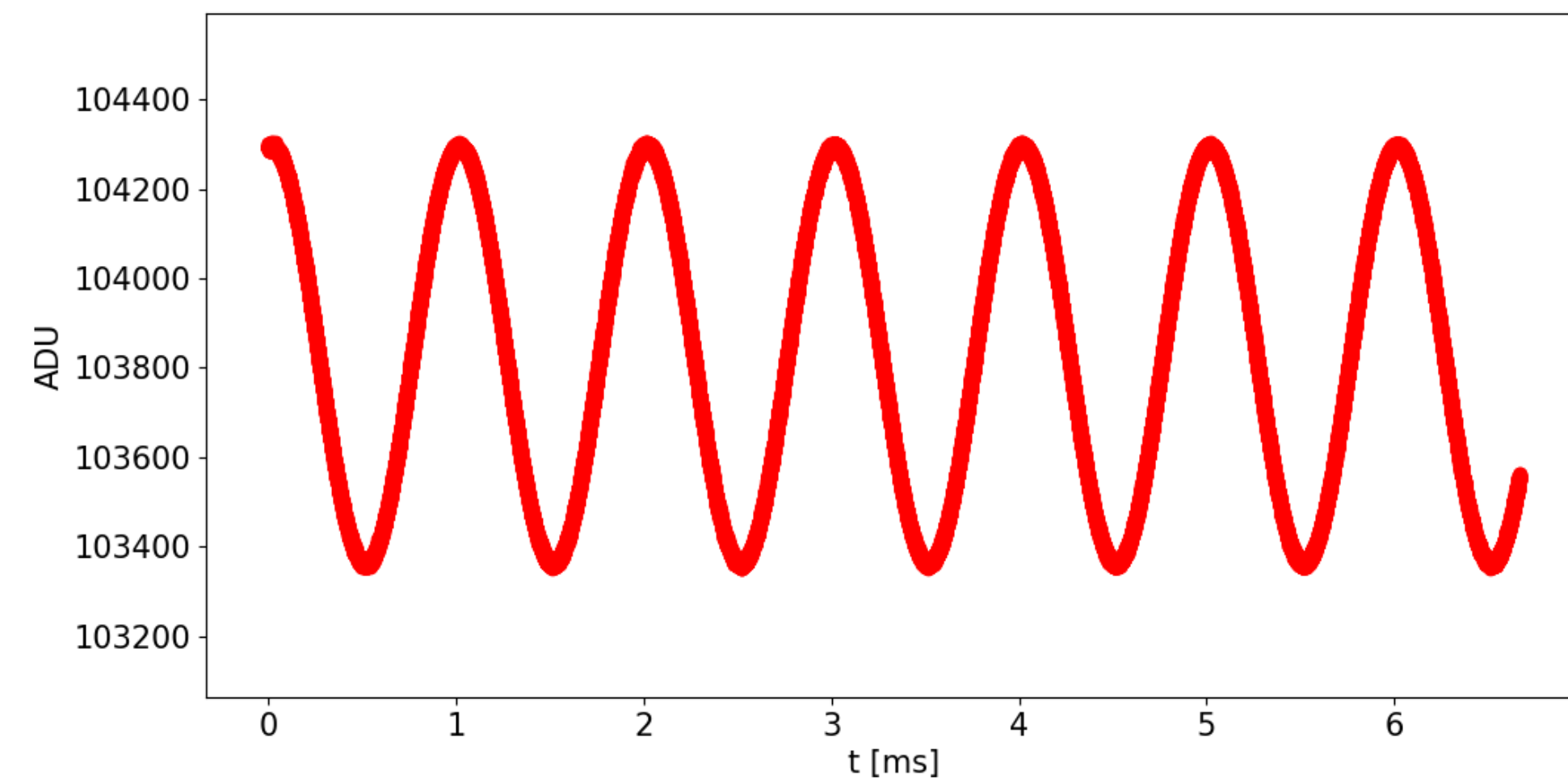
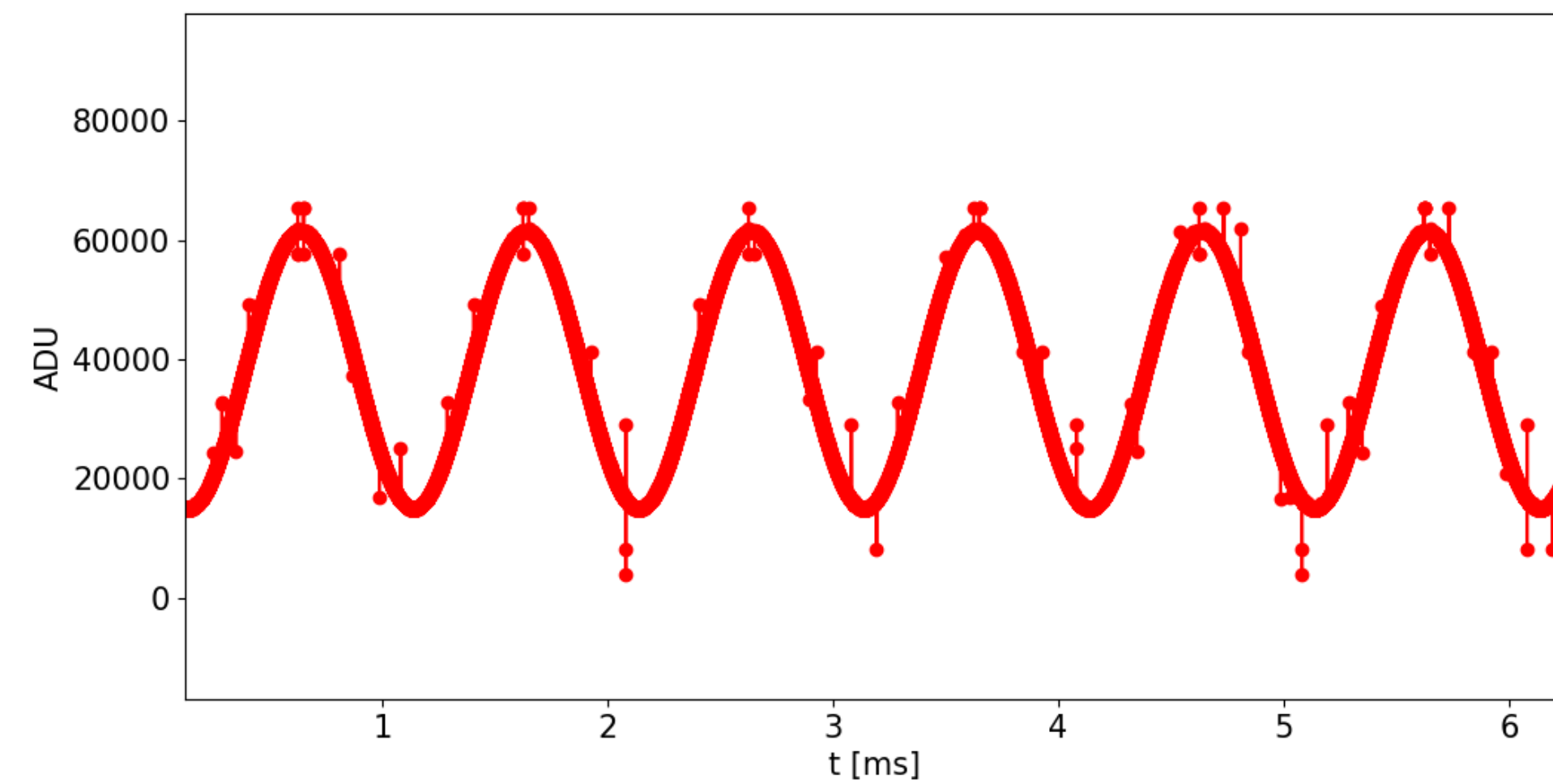


Numérisation du signal



Backup

Métastabilité

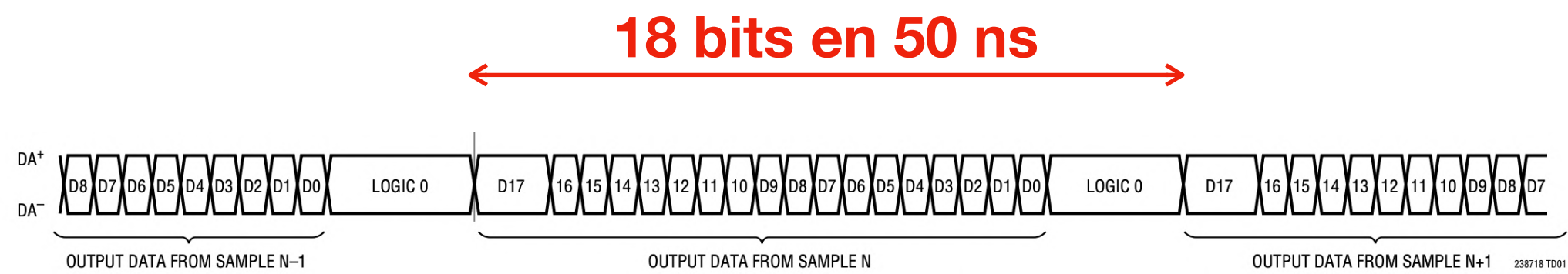


Électronique numérique de DAMIC-M

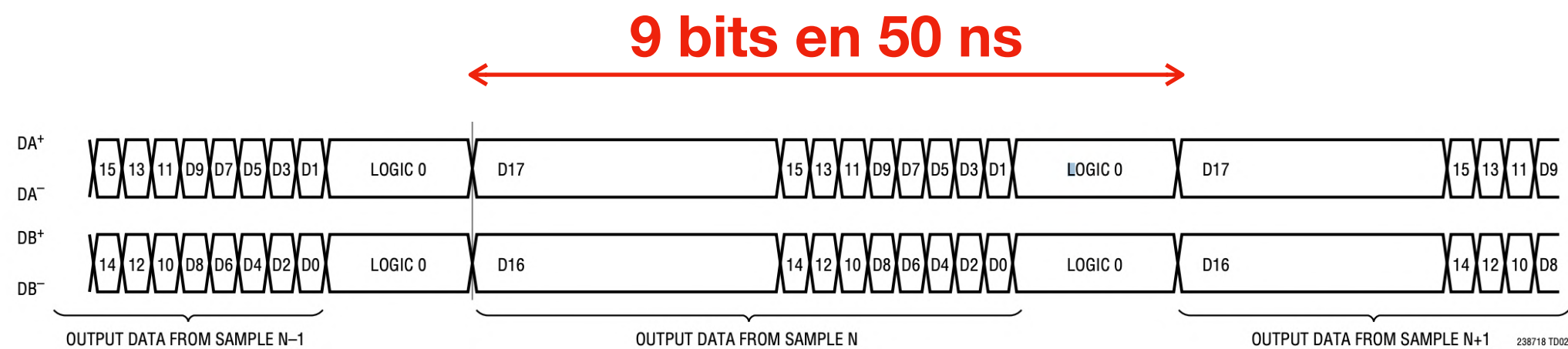
Numérisation du signal

1 Mode de transfert de données

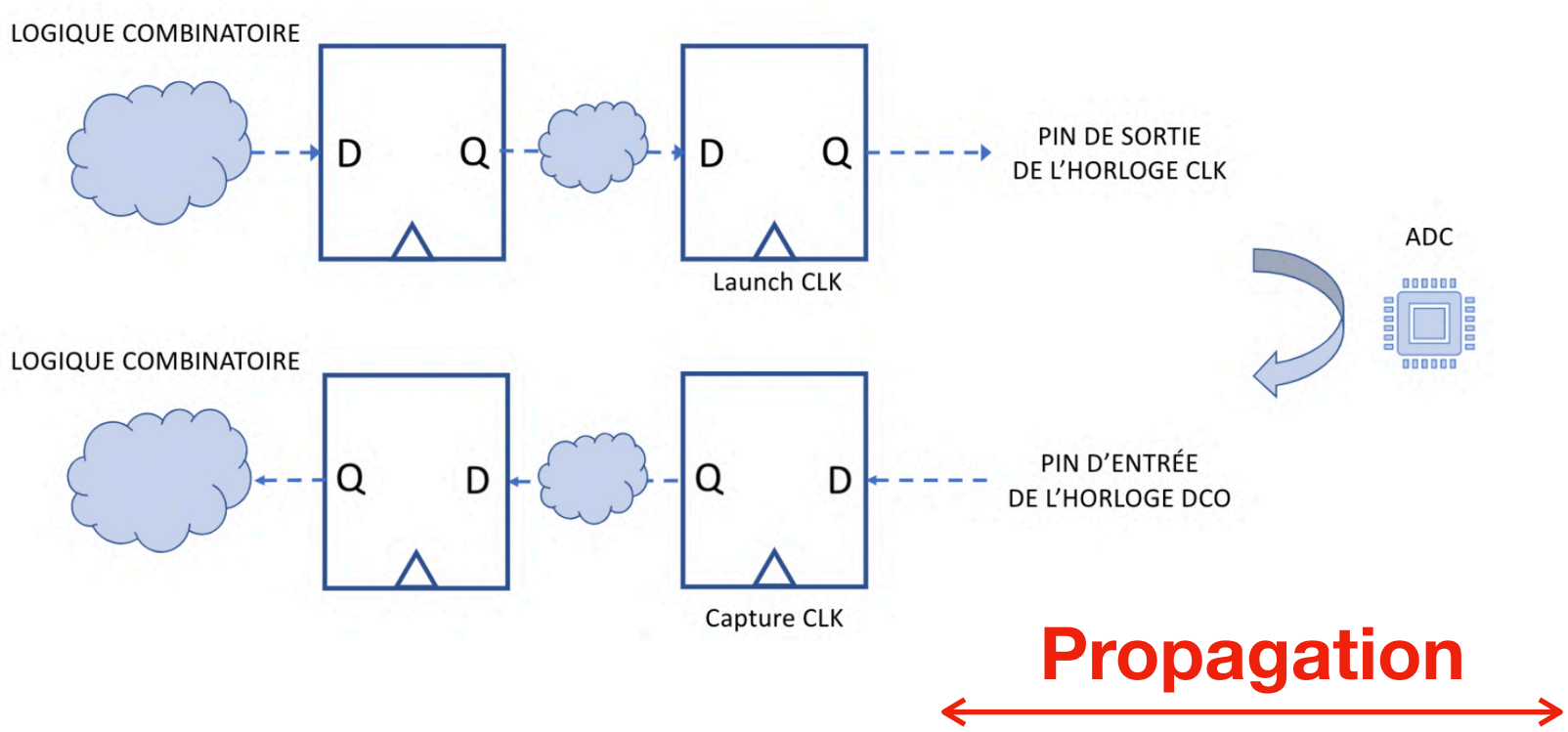
Série



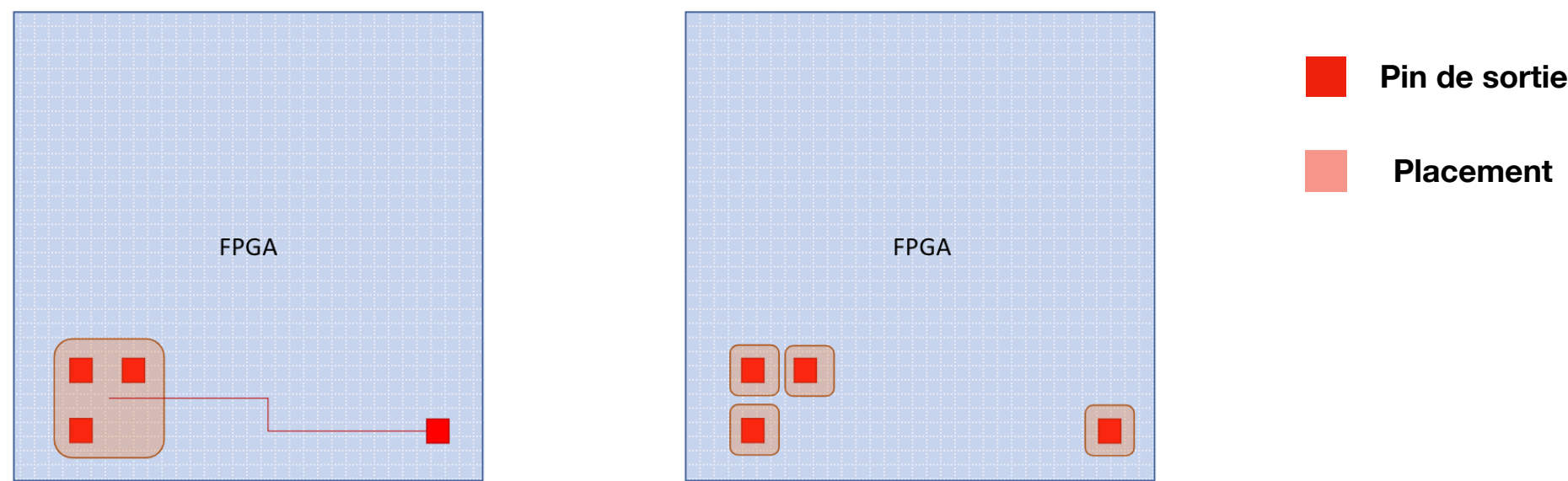
Parallèle



2 Temps propagation des signaux

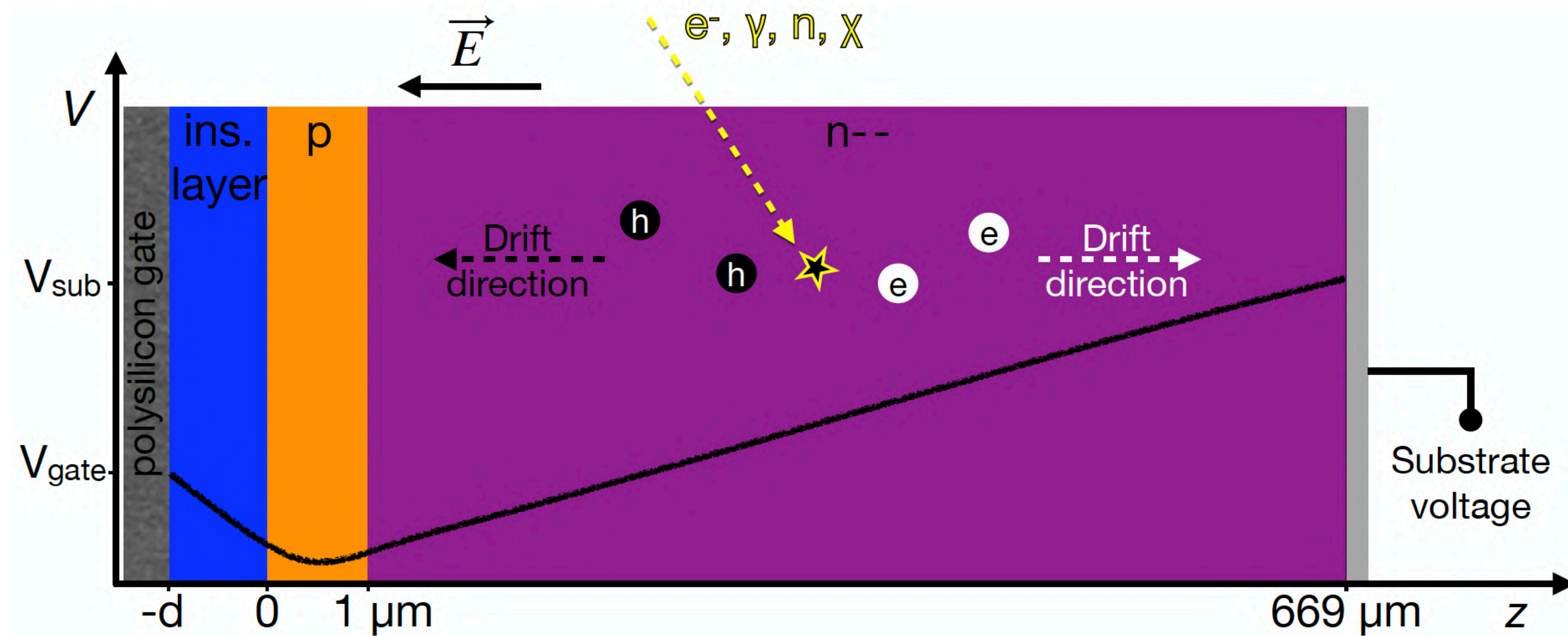


3 Placement et routage des drivers/capture des données

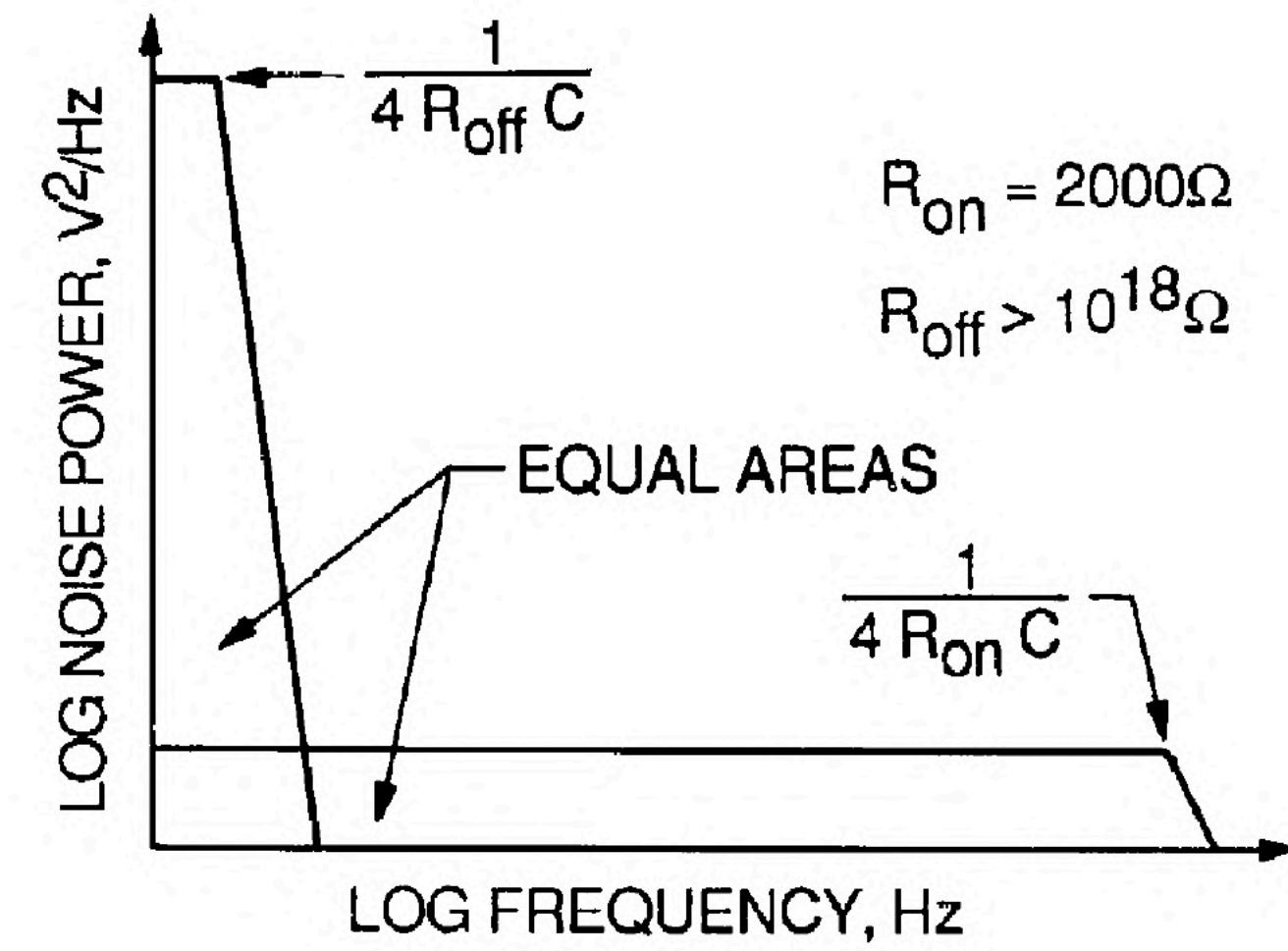
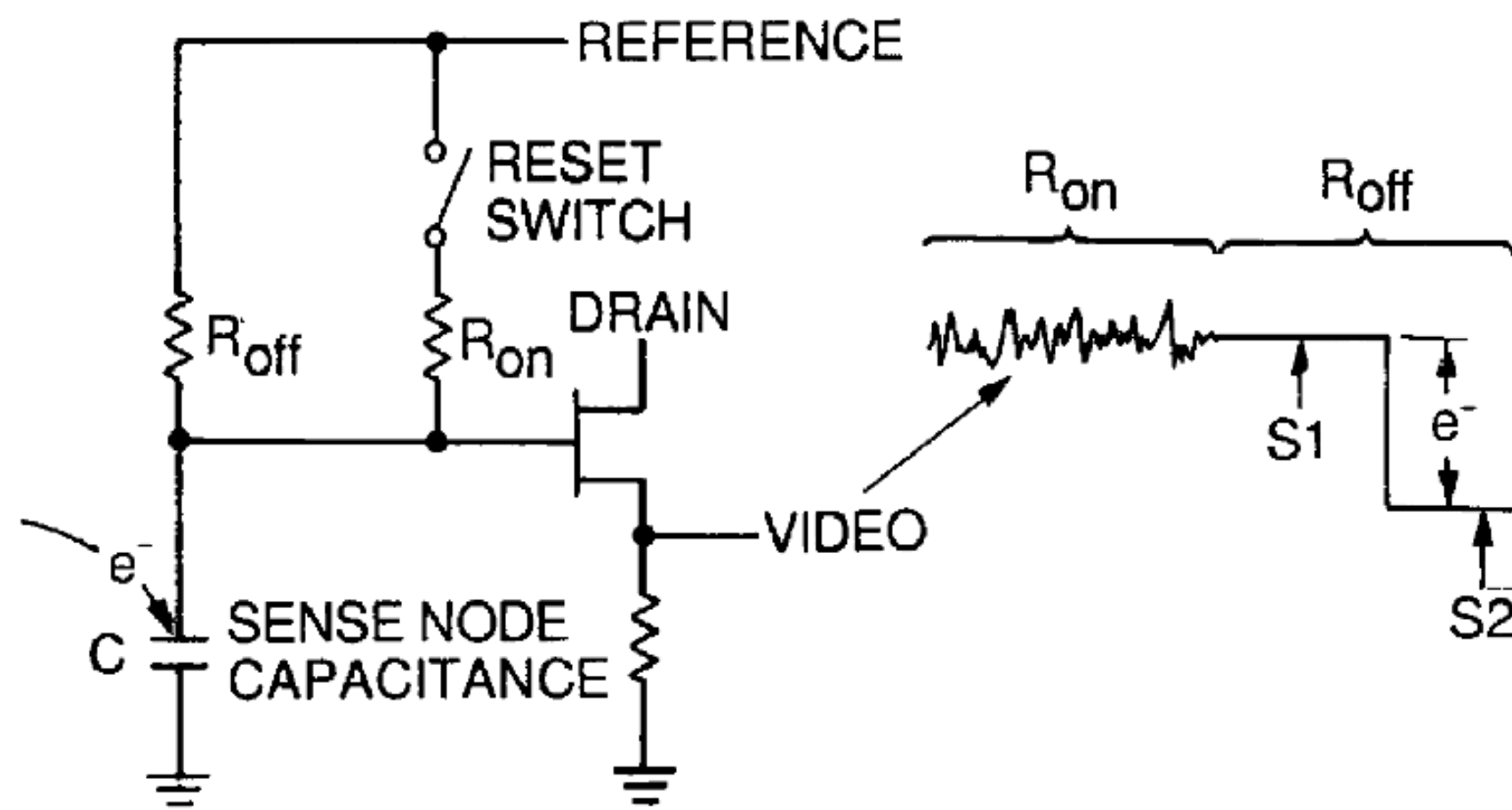


Backup

Canal enterré



Bruit de reset



$$e_{n,reset} = \sqrt{\frac{k_B \cdot T}{C}}$$

Backup

Paramètres de lecture du CCD

```
ReadPixel:
  CALL HtransferU repeat(NSBIN)
  CALL ReadoutCDS repeat(NDCM)
  CALL DrainPixel
  RTS
```

```
DrainPixel:  # 11. drain recipe.
  clocks:      SW1, SW2, OG1, OG2, RG1, RG2, DG1, DG2
  slices:
    delaySWH = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
    delayDGL = 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0
    delayDGH = 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1
  constants: V1A=1, V1B=1, V2C=0, V3A=1, V3B=1, TGA=1, TGB=1, H1A=1, H1B=1, H2C=0, H3A=1, H3B=1, RD=0, RU=0
```

```
;=====
[bias]
; values of biases in V
VDD1    = -19.
VDD2    = -19.
VR1     = -6.
VR2     = -6.
VDRAIN1 = -22.5
VDRAIN2 = -22.5
VSUB    = 45.
```

```
[clock_rails]
V1_A_H = 5.
V1_A_L = 1.
V1_B_H = 5.
V1_B_L = 1.
V2_C_H = 5.
V2_C_L = 1.
V3_A_H = 5.
V3_A_L = 1.
V3_B_H = 5.
V3_B_L = 1.
```

```
TG_A_H = 1.
TG_A_L = 1.
TG_B_H = 1.
TG_B_L = 1.
```

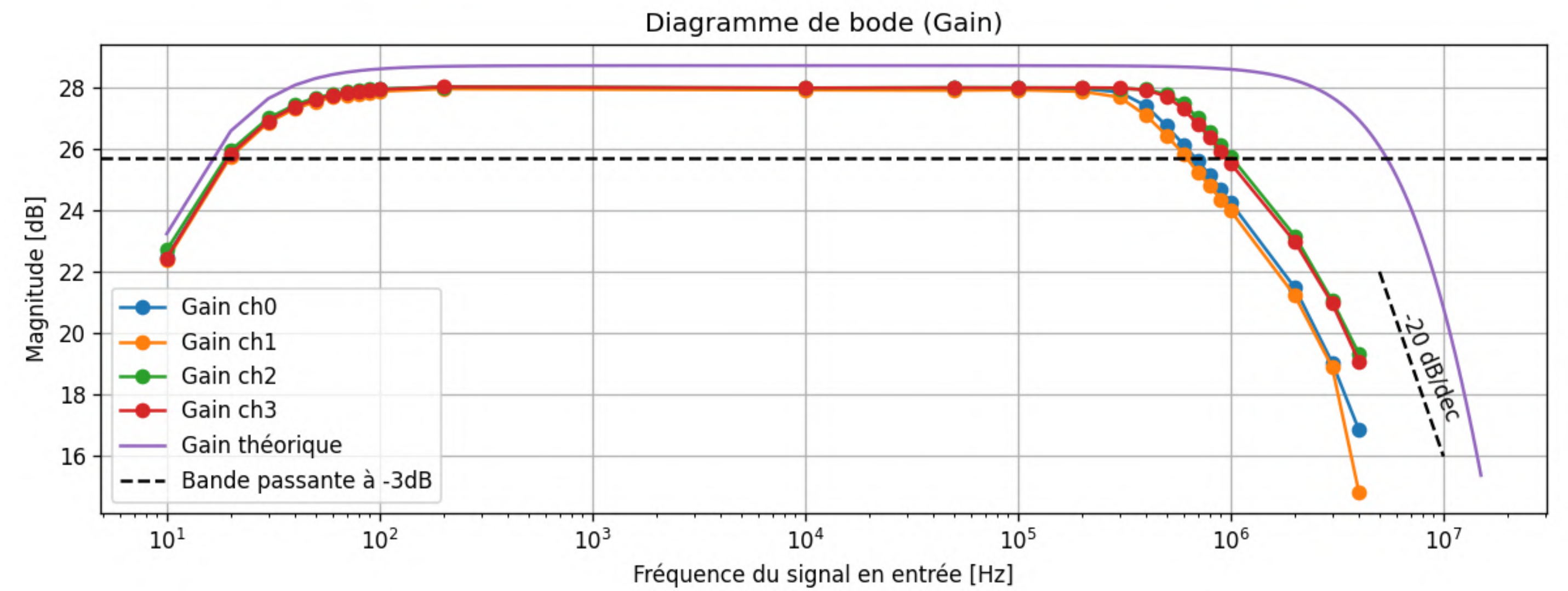
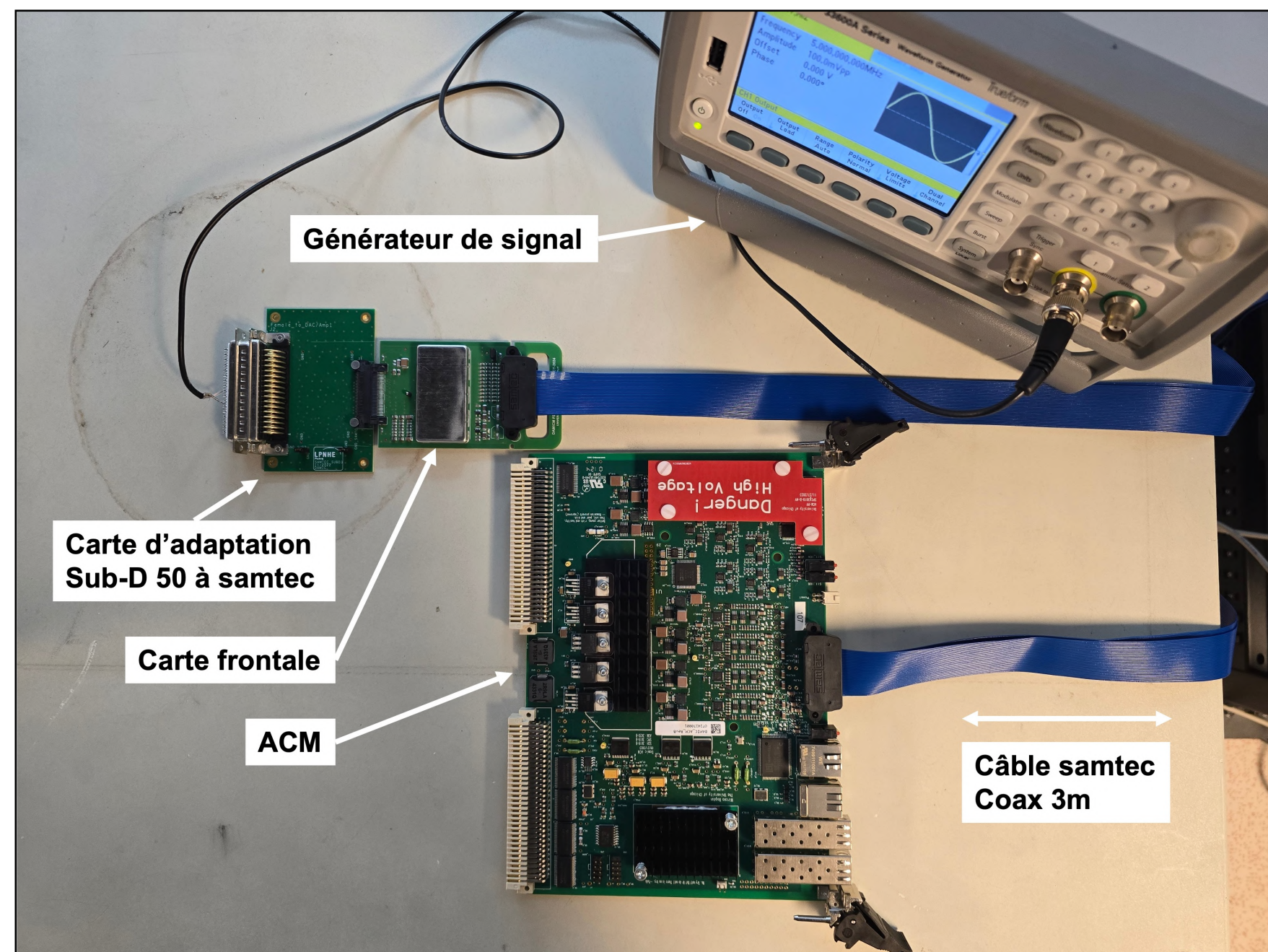
```
H1_A_H = 4.
H1_A_L = 0.5
H1_B_H = 4.
H1_B_L = 0.5
H2_C_H = 4.
H2_C_L = 0.5
H3_A_H = 4.
H3_A_L = 0.5
H3_B_H = 4.
H3_B_L = 0.5
```

```
SW_1_H = -3
SW_1_L = -9
OG_1_H = -4.
OG_1_L = -8.
RG_1_H = 6.
RG_1_L = 3.
DG_1_H = -4.
DG_1_L = -8.
```

```
SW_2_H = -3.
SW_2_L = -9.
OG_2_H = -4.
OG_2_L = -8.
RG_2_H = 6.
RG_2_L = 3.
DG_2_H = -4
DG_2_L = -8
```


Backup

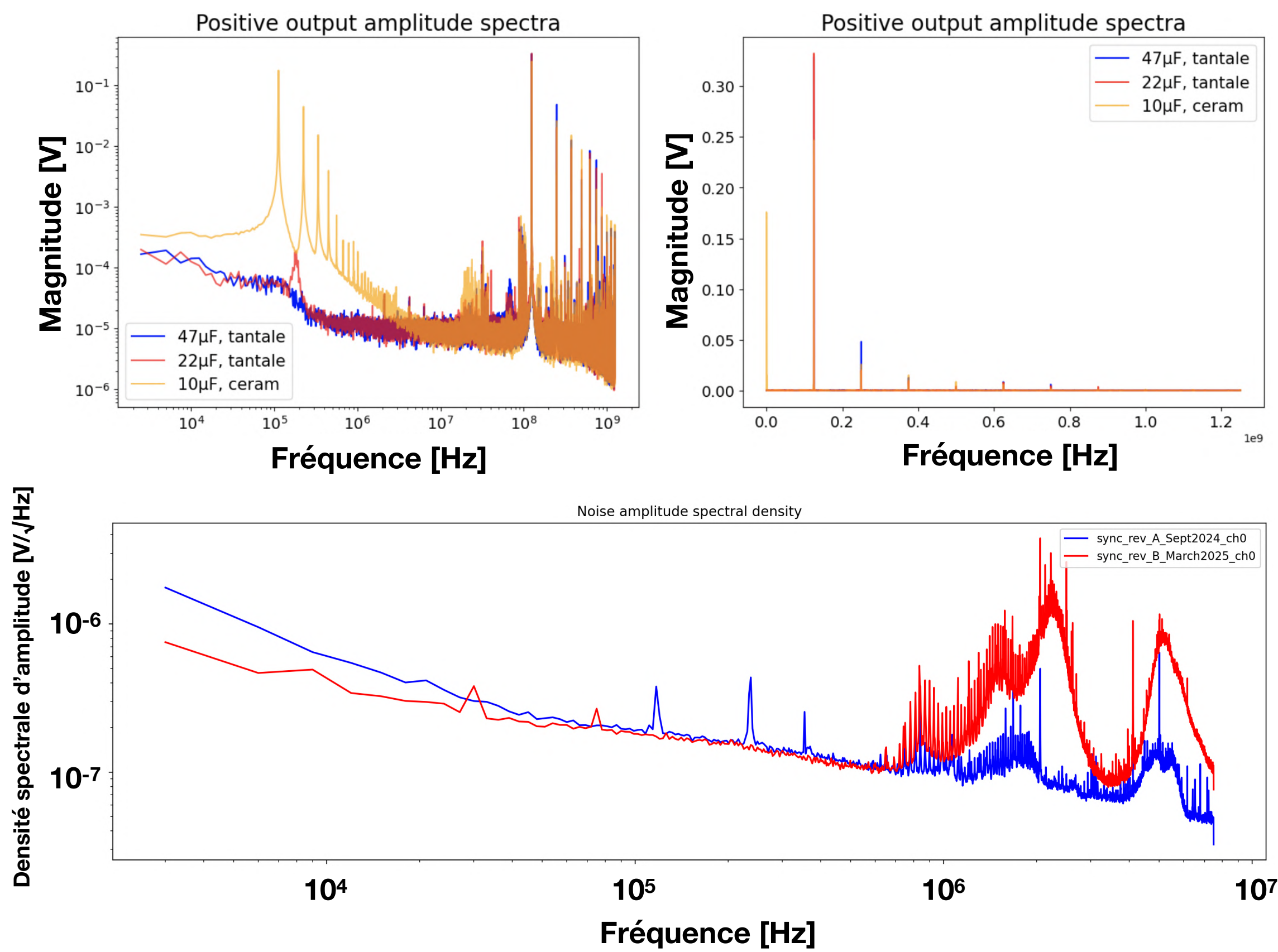
Bande passante



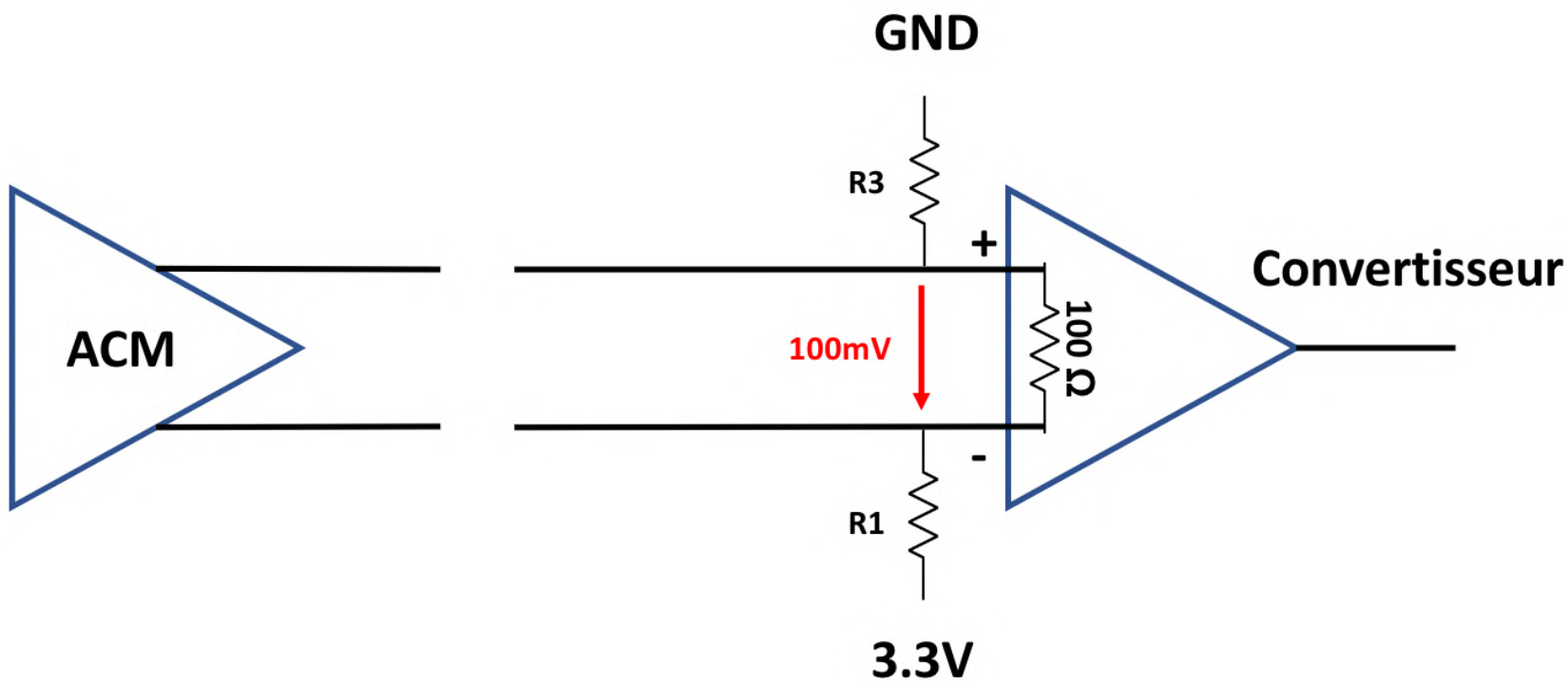
Backup

Problèmes synchronisation

Capacités de découplage des régulateurs linéaires:



Polarisation des entrées du déclencheur:



Backup

Fonctions de transfert CDS et skipper

Réponse impulsionnelle CDS

$$h_{DSI}(t) = \begin{cases} A/(T_T/2), & t_0 \leq t \leq t_0 + T_T/2, \\ -A/(T_T/2), & t_0 + T_T/2 \leq t \leq t_0 + T_T, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

Fonction de transfert dans le domaine freq:

$$|H_{DSI}(f)| = \frac{4A}{\pi T_T f} \sin^2 \left(\frac{\pi T_T}{2} f \right).$$

Réponse impulsionnelle skipper:

Combinaison linéaire de CDS décalés dans le temps

$$h_{skp}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h_s(t - n(\tau + T_T/N)), \quad (5)$$

where

$$h_s(t) = \begin{cases} A(2N/T_T), & t_0 + \tau \leq t \leq t_0 + \tau + T_T/(2N), \\ -A(2N/T_T), & t_0 + \tau + T_T/(2N) \leq t \leq t_0 + \tau + T_T/N, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

Fonction de transfert dans le domaine freq:

$$|H_{skp}(f)| = \frac{4A}{\pi T_T f} \sin^2 \left(\frac{\pi T_T}{2N} f \right) \left| \frac{\sin(\pi T_T f)}{\sin(\pi T_T f/N)} \right|.$$

Backup

Division de la resolution de charge par $1/\text{sqrt}(N)$

$$x_i = S + n_i,$$

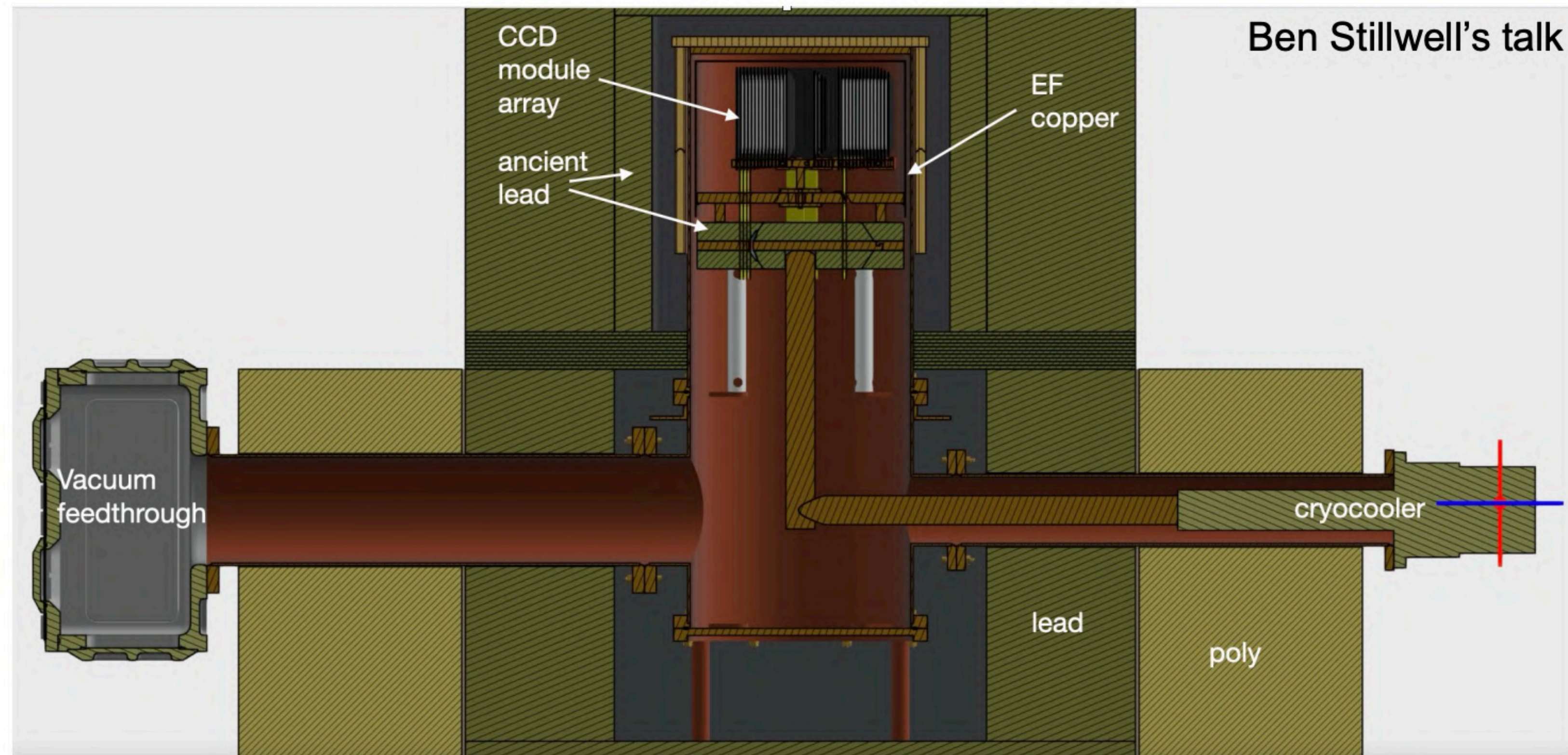
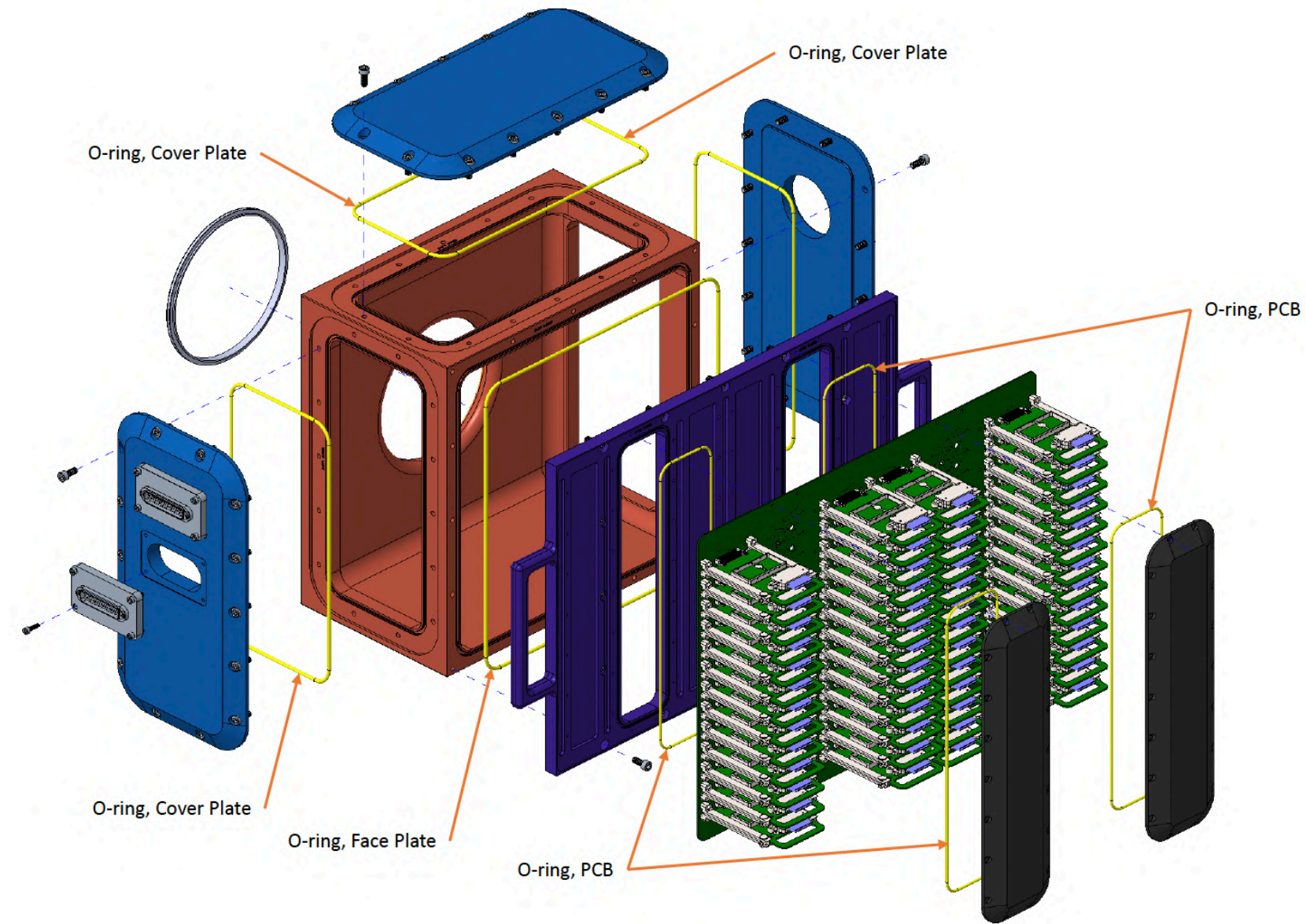
$$\rightarrow \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = S + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i,$$

$$\rightarrow \text{Var}(\bar{n}) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \text{Var}(n_i) = \frac{1}{N^2} N \sigma_1^2 = \frac{\sigma_1^2}{N},$$

$$\rightarrow V_{RMS_pixel}(skips) = \sigma_{pixel}(skips) = \frac{\sigma_{1_pixel}}{\sqrt{skips}}.$$

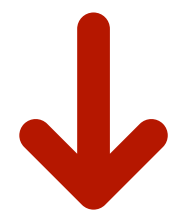
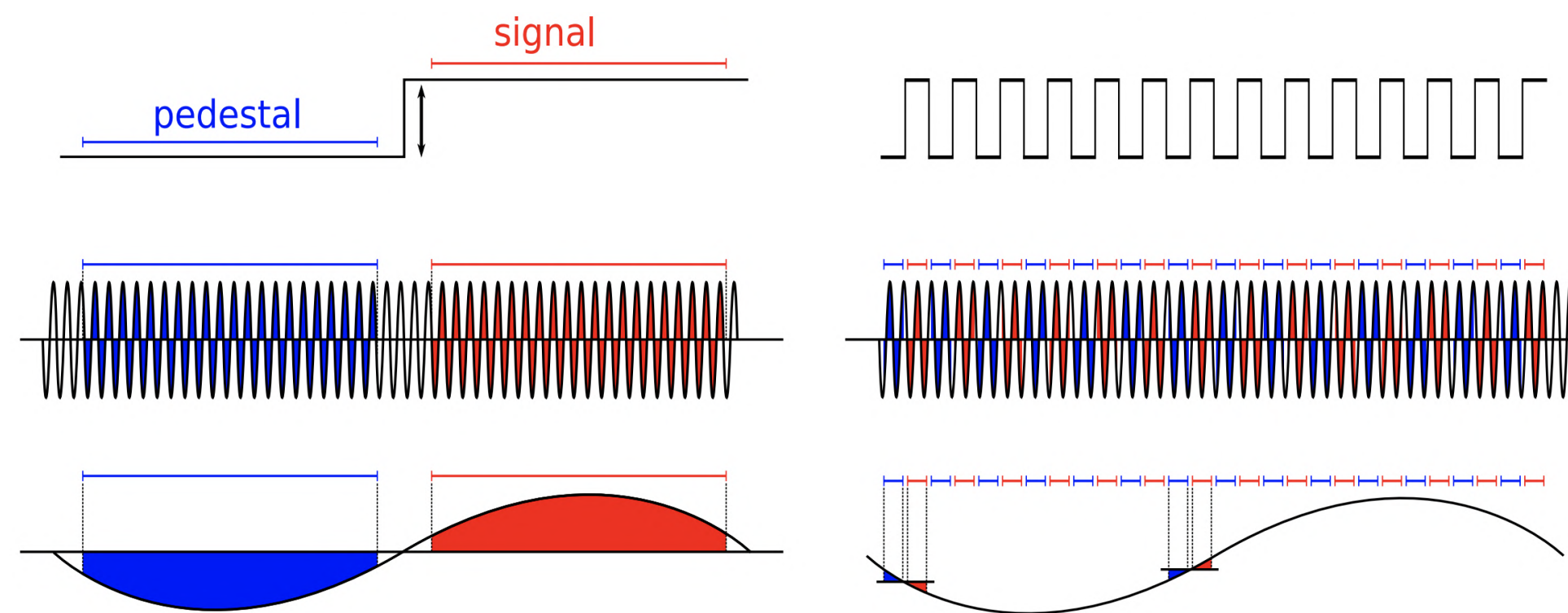
Backup

Détecteur final

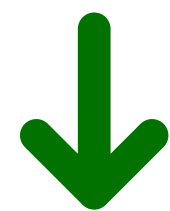


Bruit intrinsèque et l'enjeu d'une lecture skipper

1 Domaine temporel :



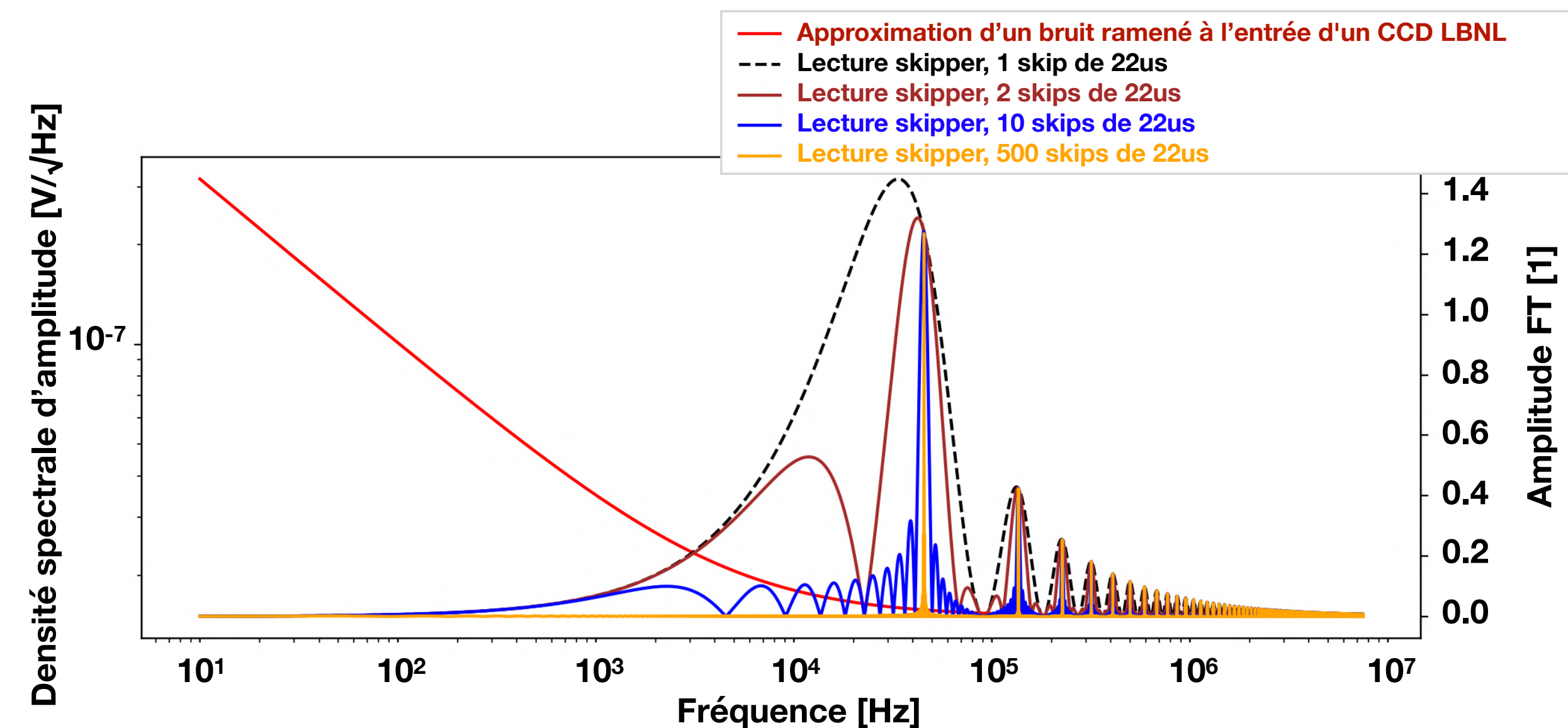
Lecture double corrélée
 $\geq 2e^-$



Lecture skipper
 $< 1e^-$

2 Domaine fréquentiel :

Comparaison fréquentielle des lectures skipper



Backup

Comparaison courant d'obscurité

Électronique de lecture	Commerciale	DAMIC-M
Nombre de modules CCD	2	2
Dimensions des modules CCD	6144×4128	$4 \times 6144 \times 1536$
Lecture synchrone	Non	Oui
Résolution de charge à 1 skip	$\sim 7e^-$	$\leq 3e^-$
Résolution de charge à N skips	$0.2e^-$ à 650 skips	$0.16e^-$ à 500 skips
Courant d'obscurité	$4.5 \cdot 10^{-3}e^- / pixel / jour$	$1.2 \cdot 10^{-4}e^- / pixel / jour$