



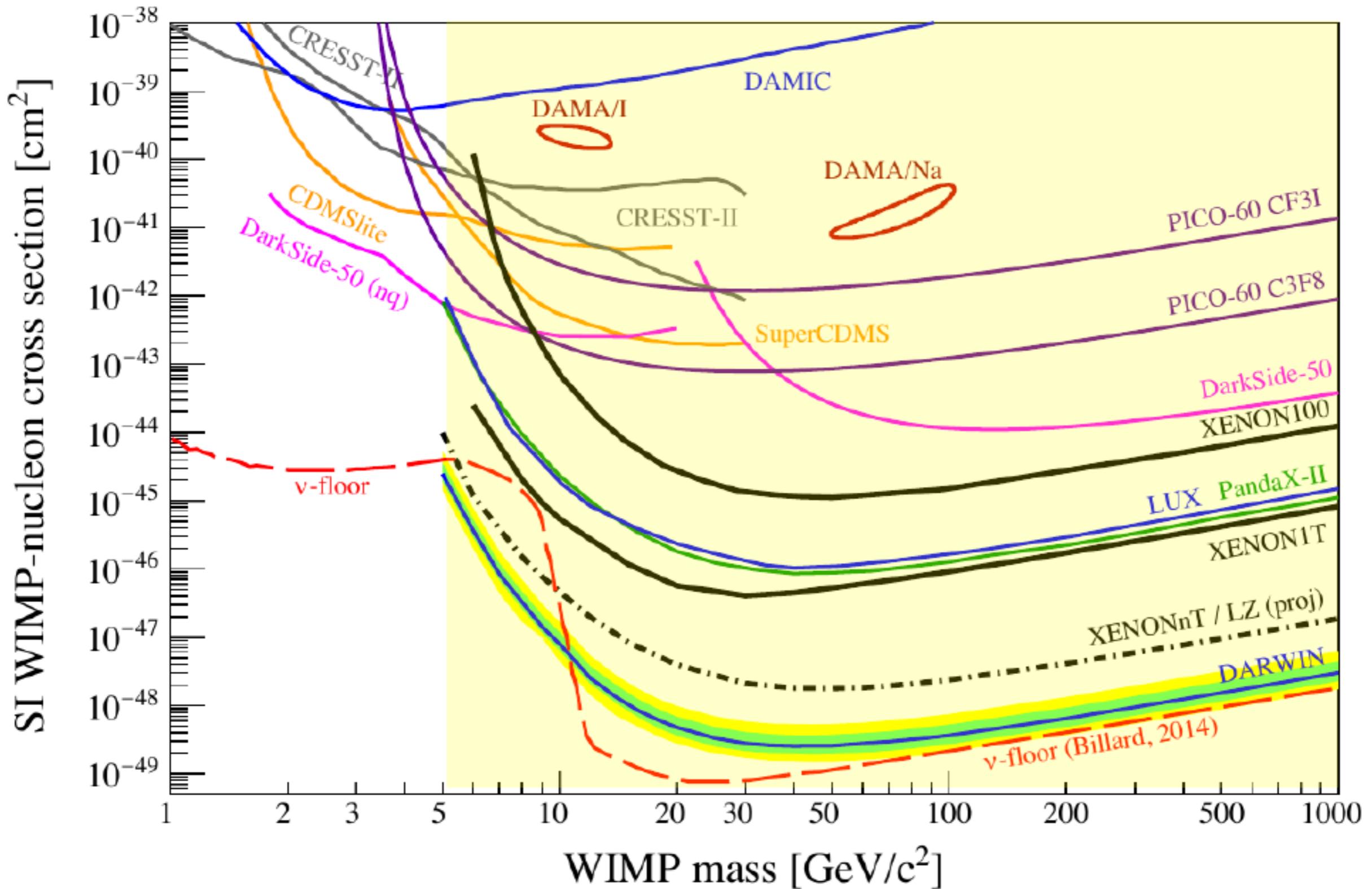
DAMIC

Recherche de matière noire légère et exploration du secteur caché au Laboratoire Souterrain de Modane

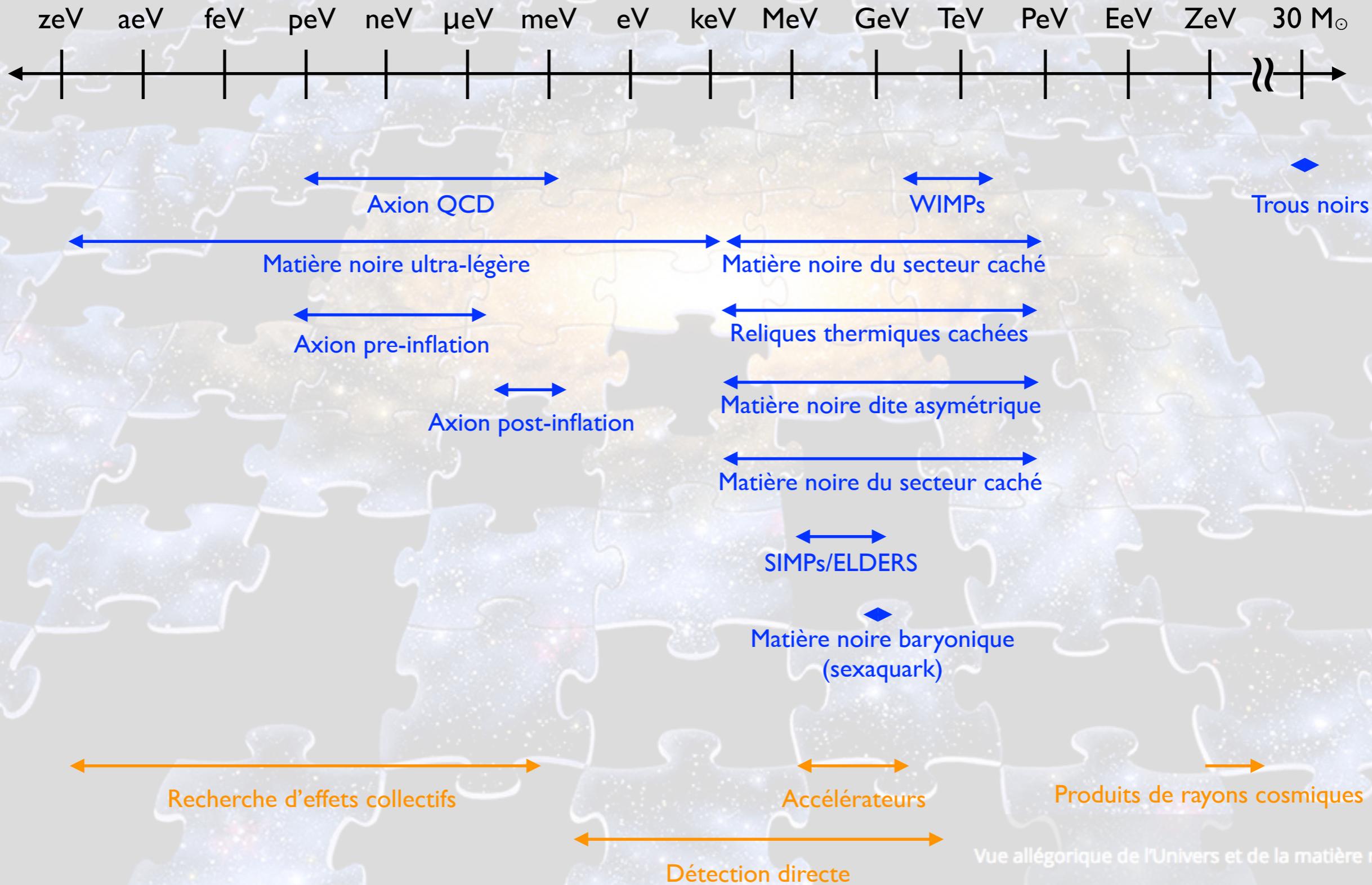
Présentation au Conseil Scientifique de l'IN2P3

WIMPS :

Frontière de la prochaine génération

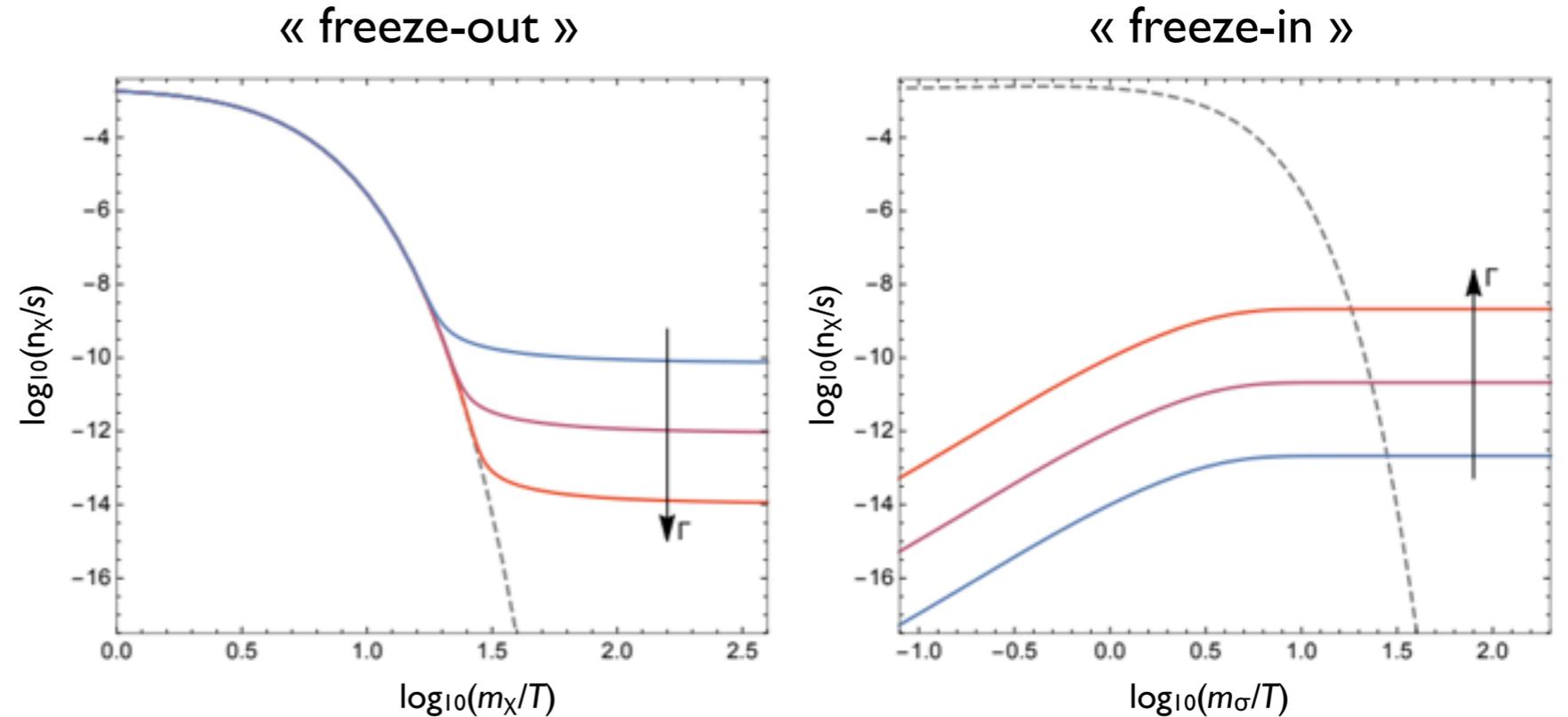


Au-delà du paradigme WIMP



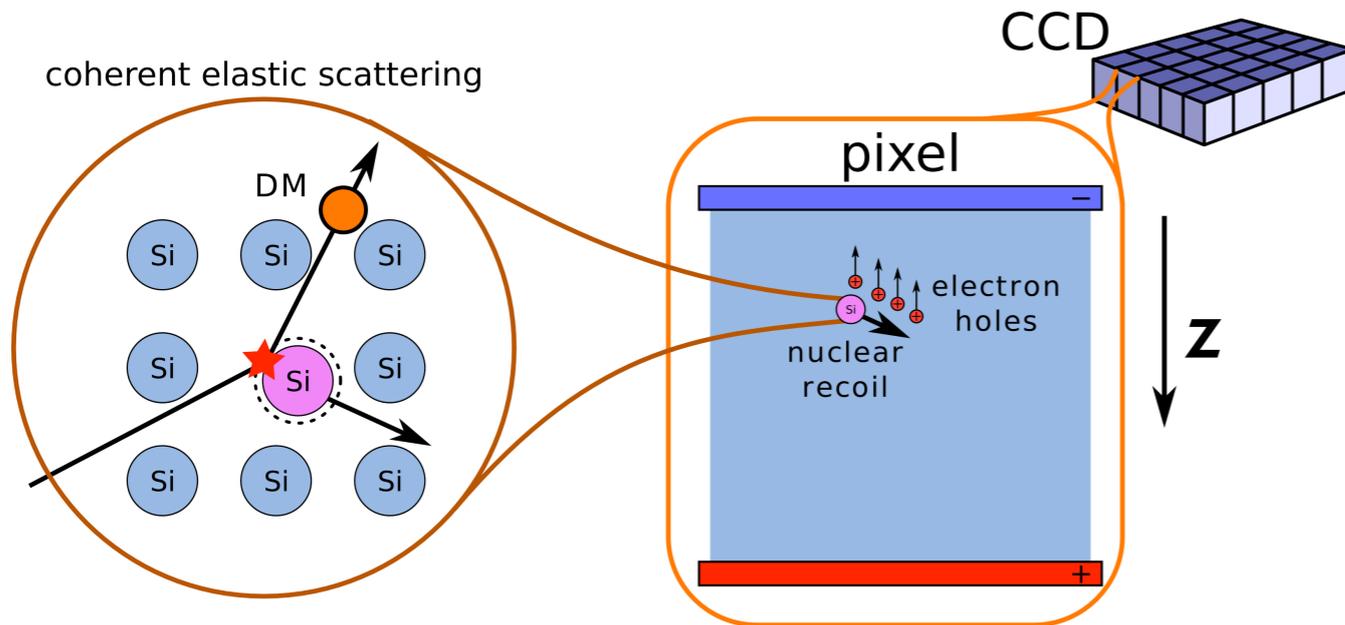
Feebly Interacting Massive Particles

- Interaction avec la matière au travers d'une nouvelle interaction, avec un couplage faible
- Masse faible
- Jamais à l'équilibre thermique

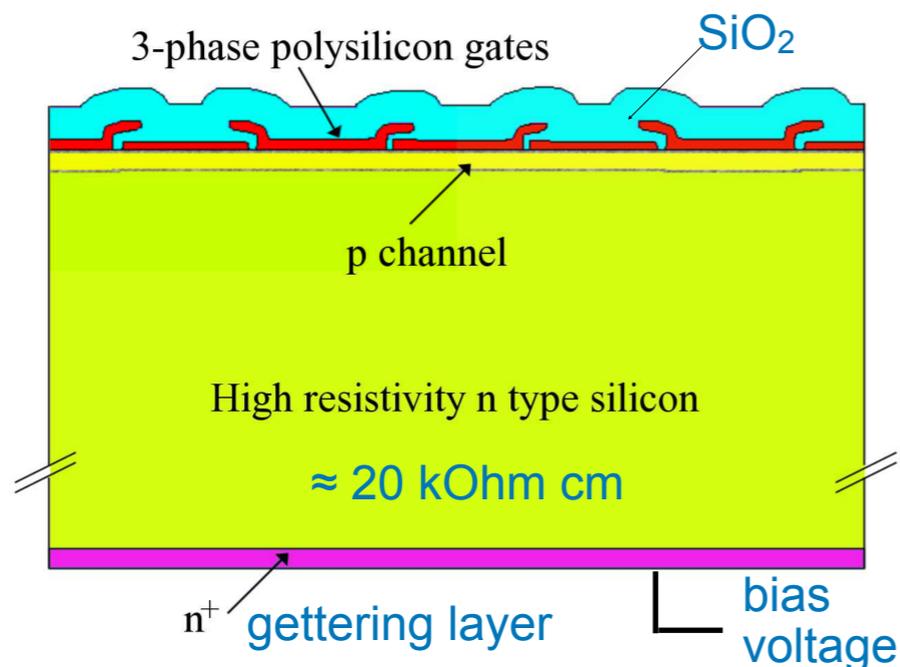


- Production par processus de désintégration ou d'annihilation de particules du secteur visible tant que $T_{\text{photons}} >$ échelle de masse connectant matière noire et matière visible
 - Puis gel \Rightarrow densité relique
- ➡ Existence d'un « secteur caché » connecté au secteur visible par un couplage très faible
- ➡ Cadre offrant la possibilité de sonder quelques signatures possibles expérimentalement

Pourquoi DArk MAtter In CCDs ?

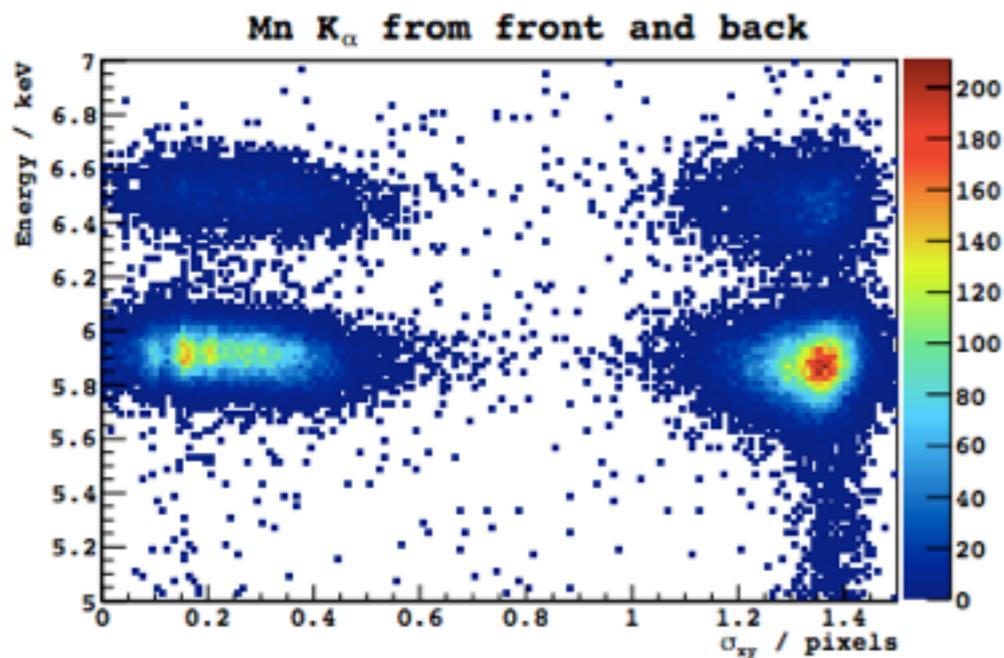
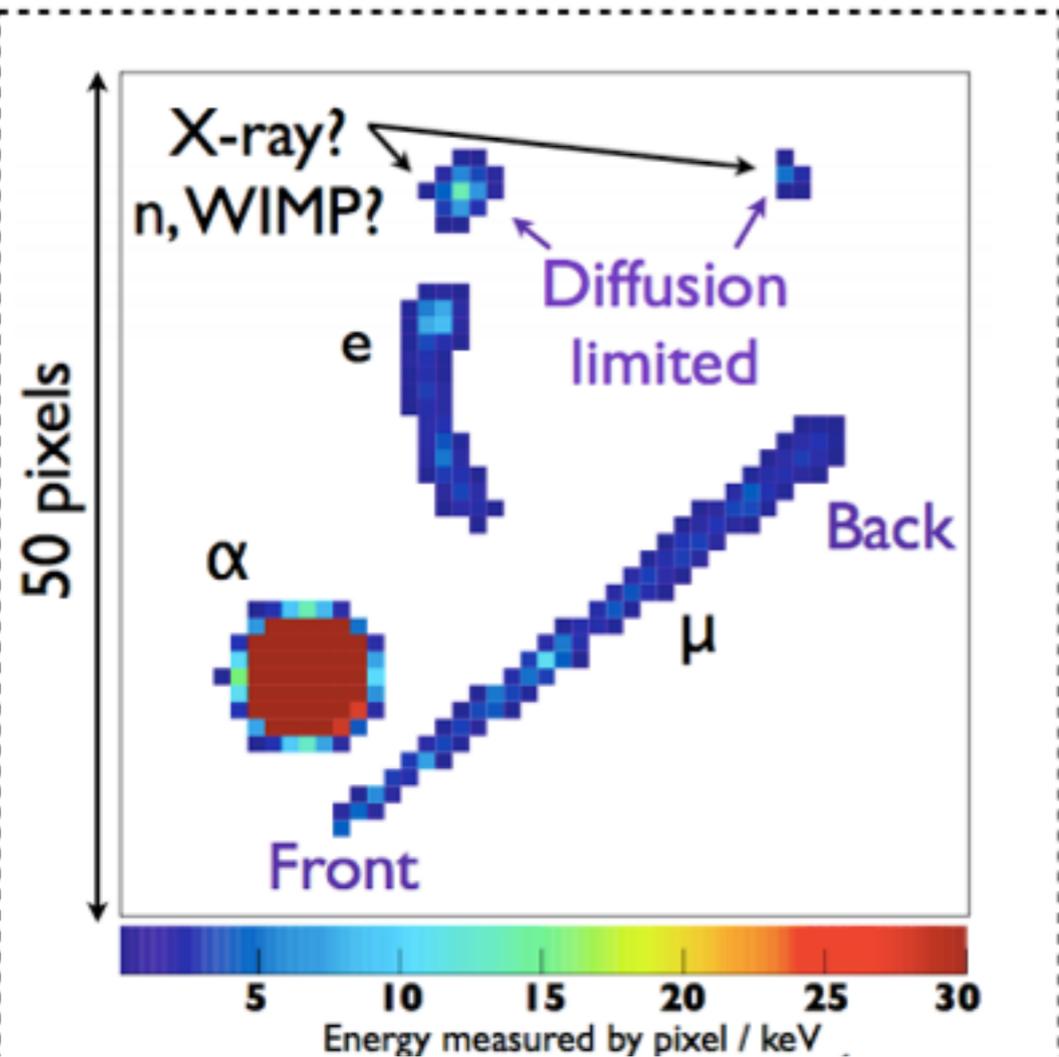


- 1) Haute résistivité (10^{11} donneurs/cm³)
Silicium extrêmement pur
- 2) Totalement appauvri (Fully-depleted)
sur plusieurs centaines de μm (1 mm)
LBNL design (S. Holland)

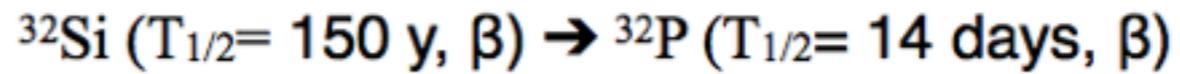


- Dépôt ponctuel d'énergie de recul des noyaux après interaction avec un WIMP (Parcours des ions Si de 10 keV 200 Å)
- Résolution spatiale excellente (pixel 15x15 μm^2 en x,y), en z ~ 50 à ~ 100 μm (back/front, #e⁻)
- Résolution en énergie $< 4\%$ @ 0,5keV
- Très faible courant de fuite $< 0,001$ e⁻/jour/pixel @ 120K
- Seuil très bas, 3,6 eV par paire e⁻/h
- Suit des chaînes radioactives

Recherche de matière noire avec CCDs



Spatial coincidence of beta decays (^{32}Si)



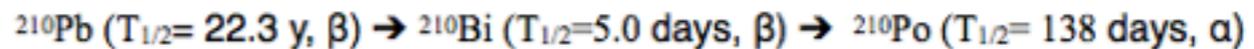
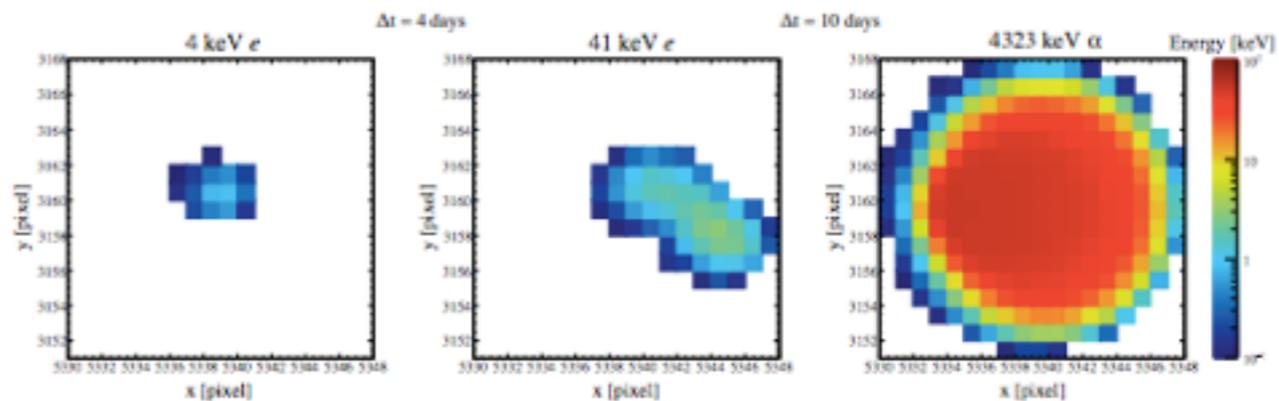
$$E_1 = 51.0 \text{ keV}$$

$$E_2 = 434.8 \text{ keV}$$

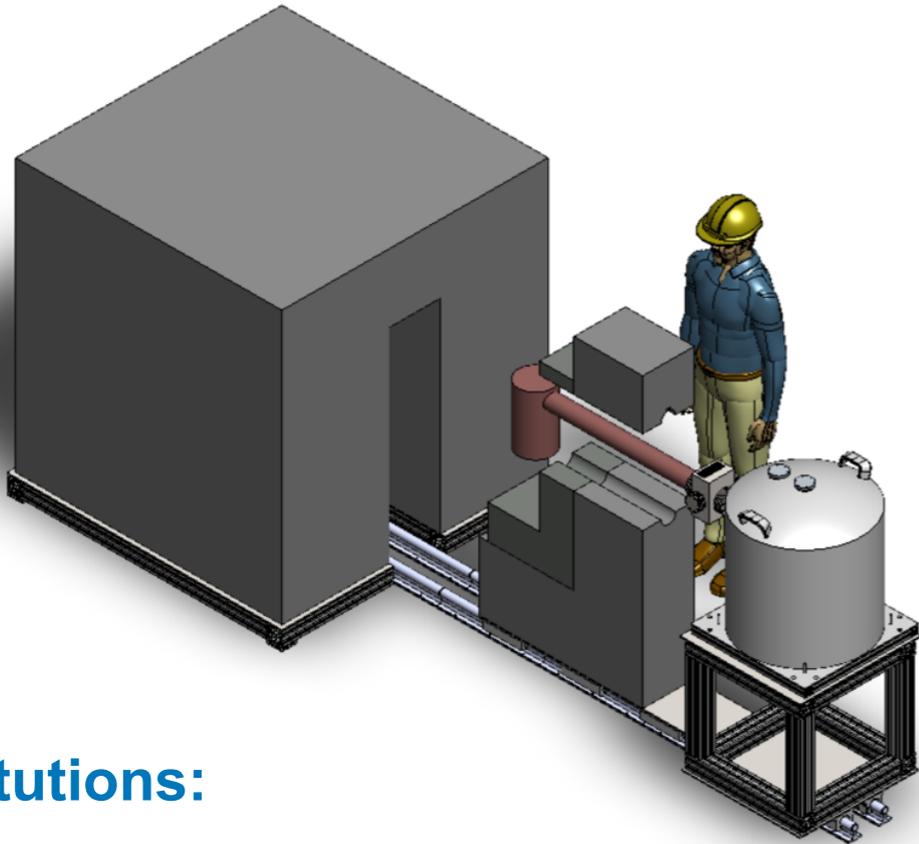
(x_0, y_0)

$$\Delta t = 29.1 \text{ days}$$

Decay chain of a single ^{210}Pb



DAMIC-M



- ▶ **50 CCDs** (cible 1 kg) au LSM.
- ▶ CCD les plus massifs jamais construites (**6k x 6k x 1mm, masse 20 g**).
- ▶ Skipper readout bruit **sub-électron**
- ▶ **Réduction du fond à une fraction de dru**

Institutions:

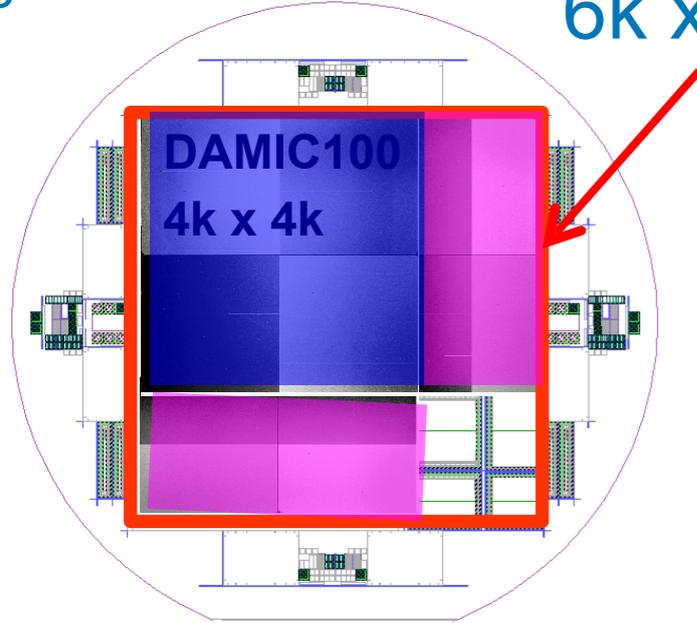
The University of **Chicago**, University of **Washington**, Pacific Northwest National Laboratory (**PNNL**), **SNOLAB**, Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies (**LPNHE**), Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (**LAL**), Laboratoire Souterrain de Modane/Grenoble (**LSM**), Institut de physique nucléaire d'Orsay (**IPNO**), Centre d'études nucléaires Bordeaux Gradignan (**CENBG**), Laboratoire de Physique Subatomique et des Technologies Associées (**SUBATECH**), University of **Zurich**, **Niels Bohr Institute**, University of **Southern Denmark**, University of **Santander**, Universidad Federal do **Rio de Janeiro**, Centro Atómico **Bariloche**

**ERC Advanced Grant
annoncée en mai 2018
NSF grant annoncée en
septembre 2018**

DAMIC-M les défis techniques

- DAMIC 1kg peut être construit avec les technologies existantes

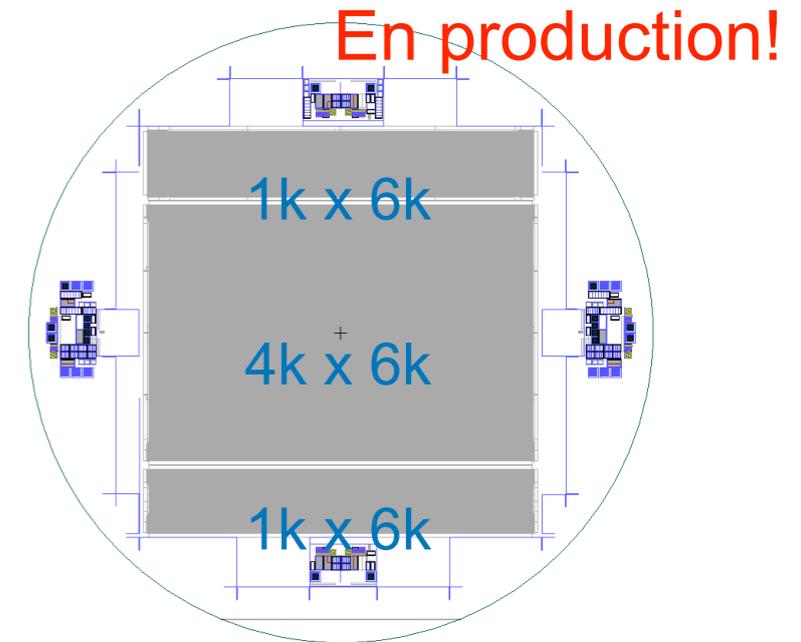
galette de silicium



6k x 6k pixels, 1 mm d'épaisseur

≈ 20 g / CCD

≈ 50 CCDs / 1 Kg



- Background

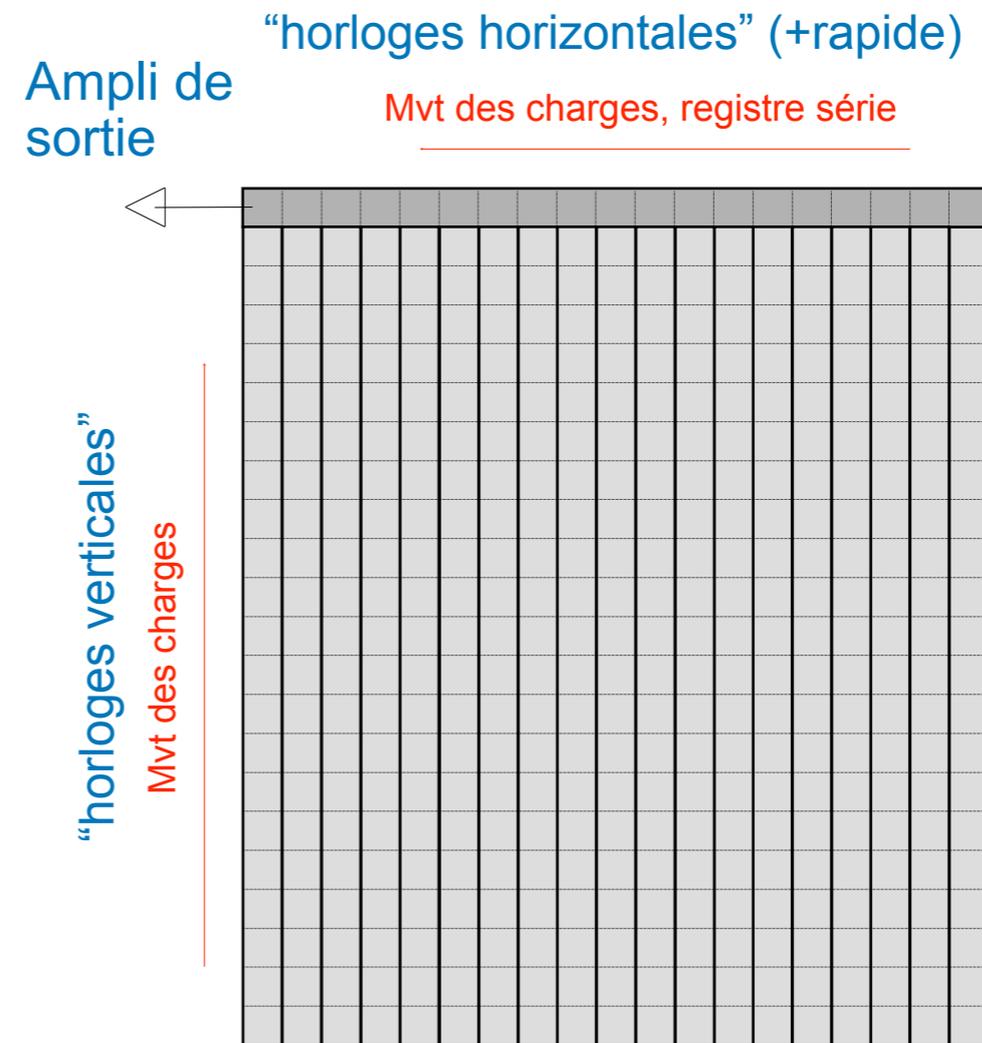
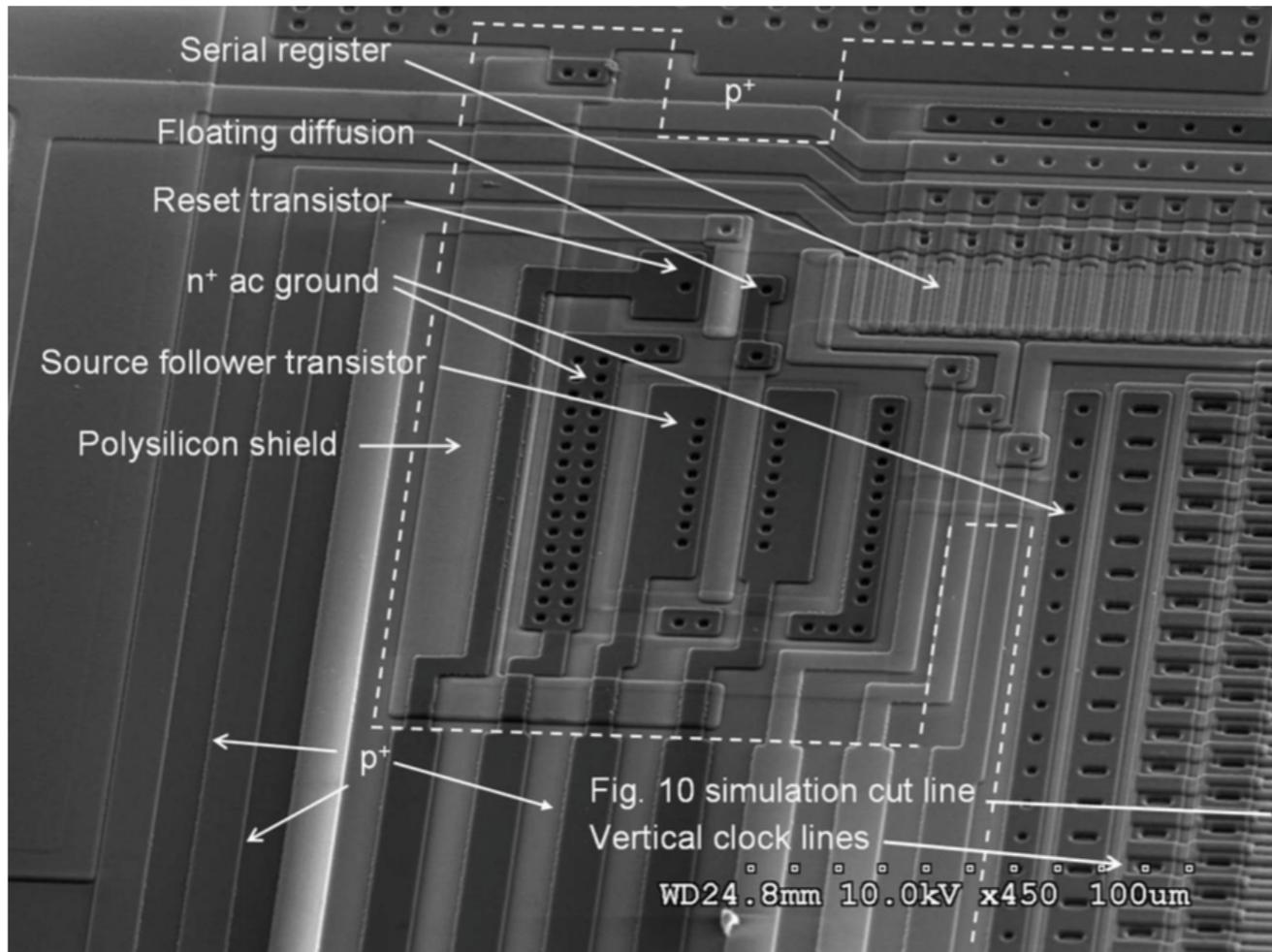
de quelques dru à une fraction de dru

Fond externe: meilleur design, matériaux (e.g. cuivre électro-formé), procédures strictes (radon, contamination de surface)

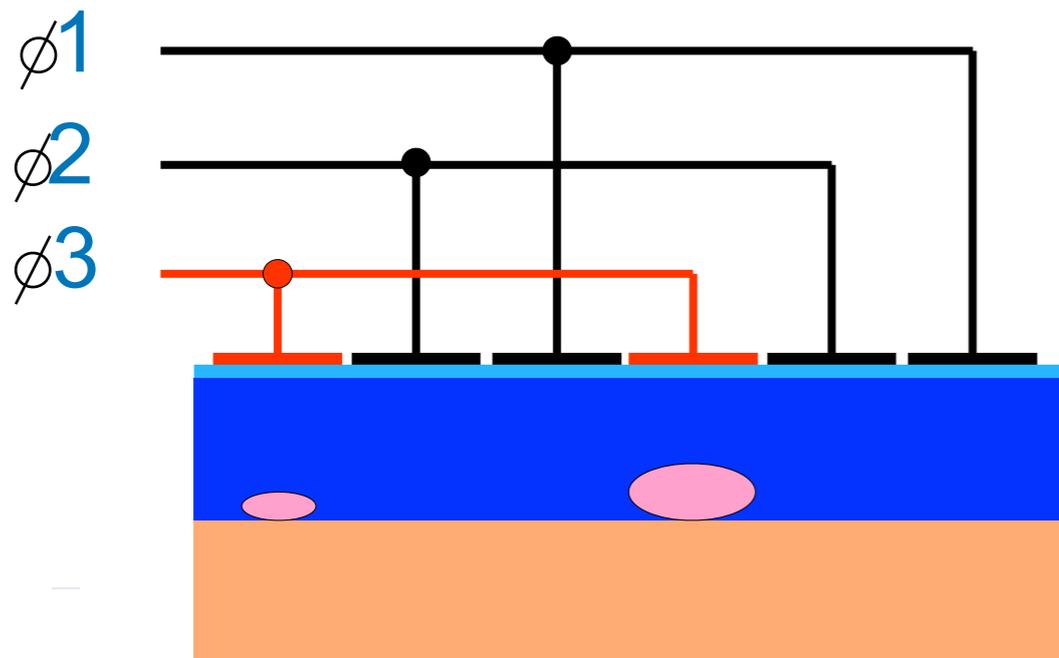
Fond interne:

^{32}Si et tritium cosmogéniques

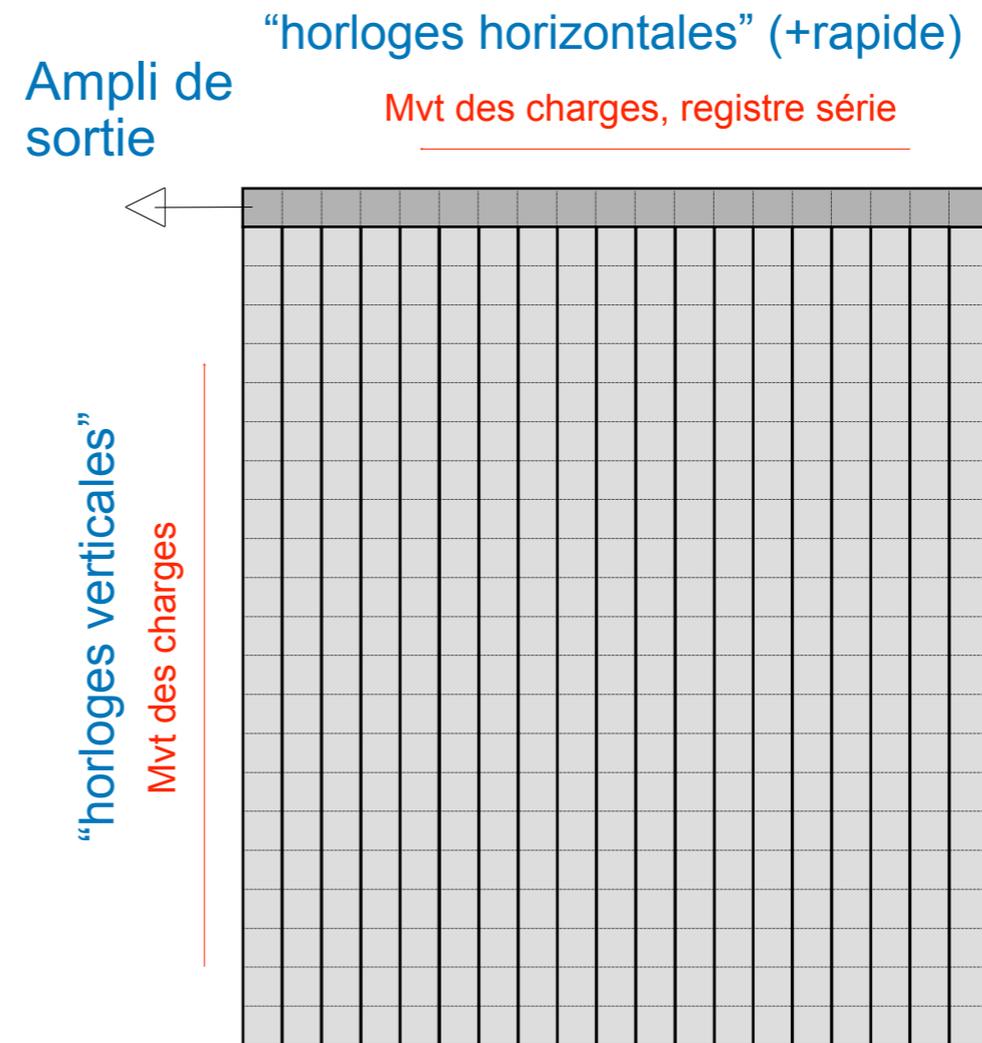
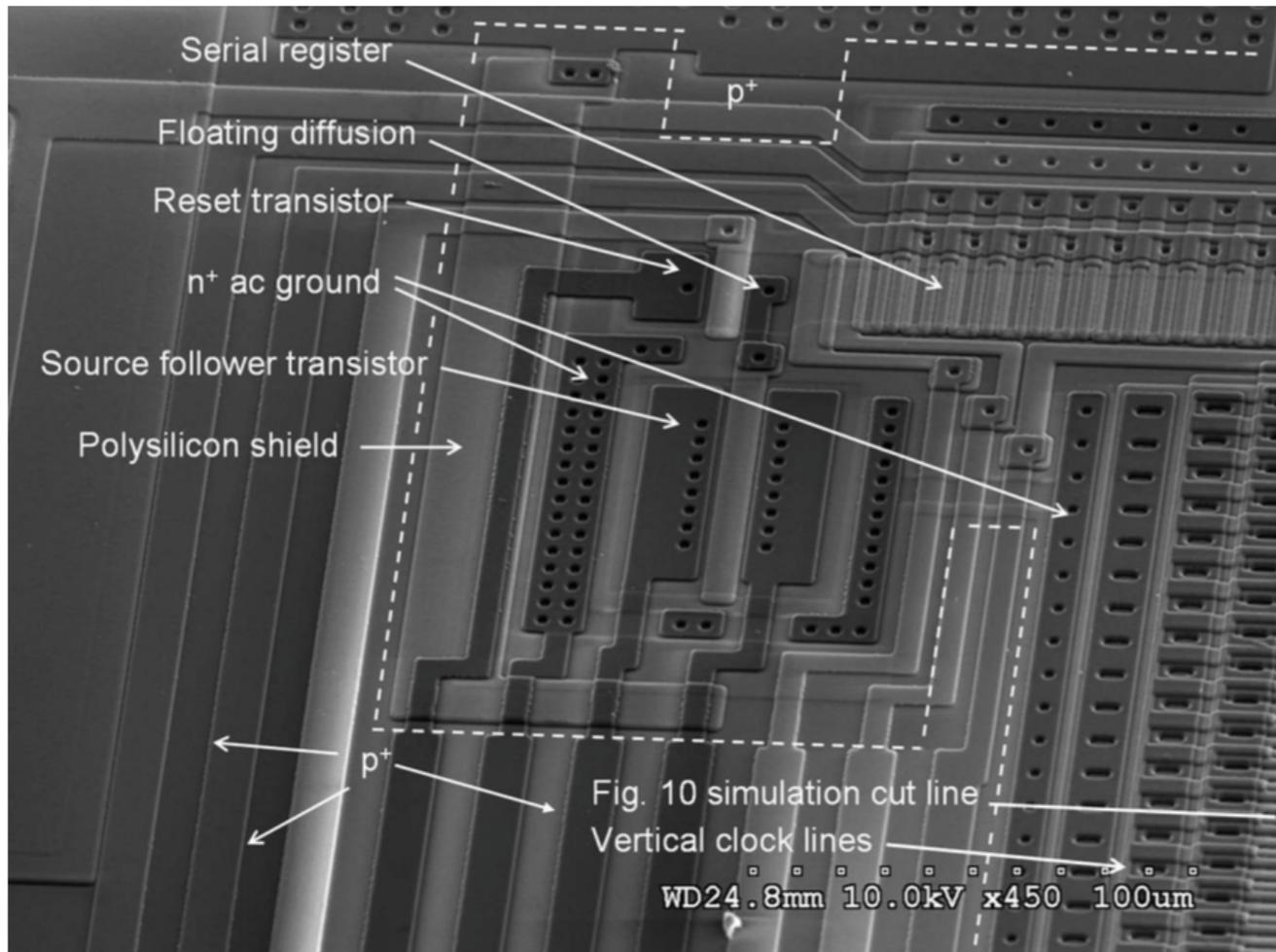




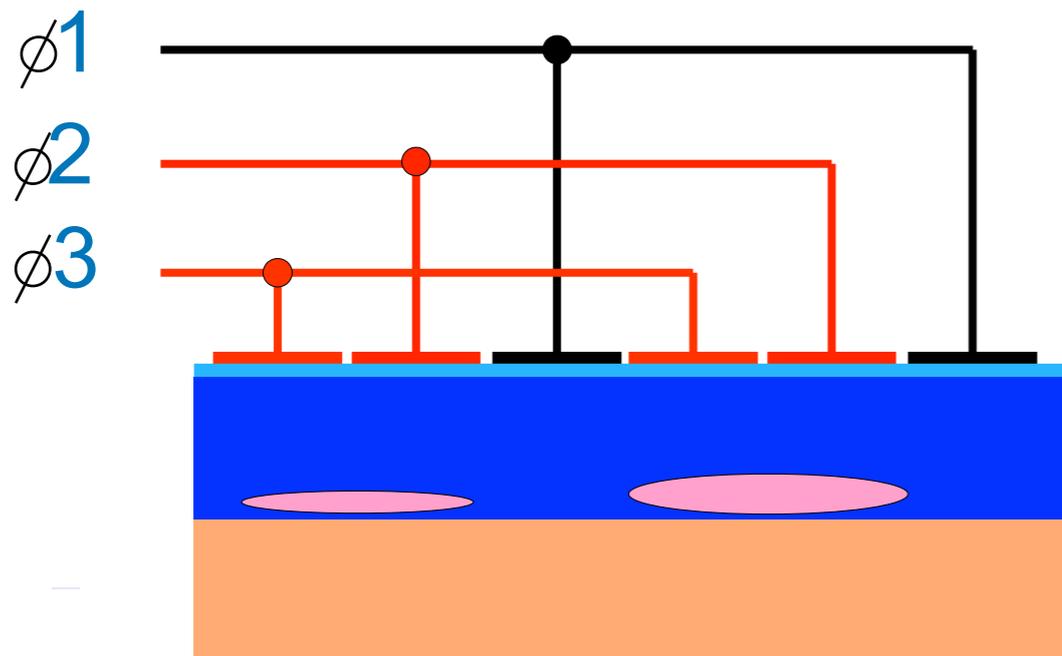
Transfer de charge



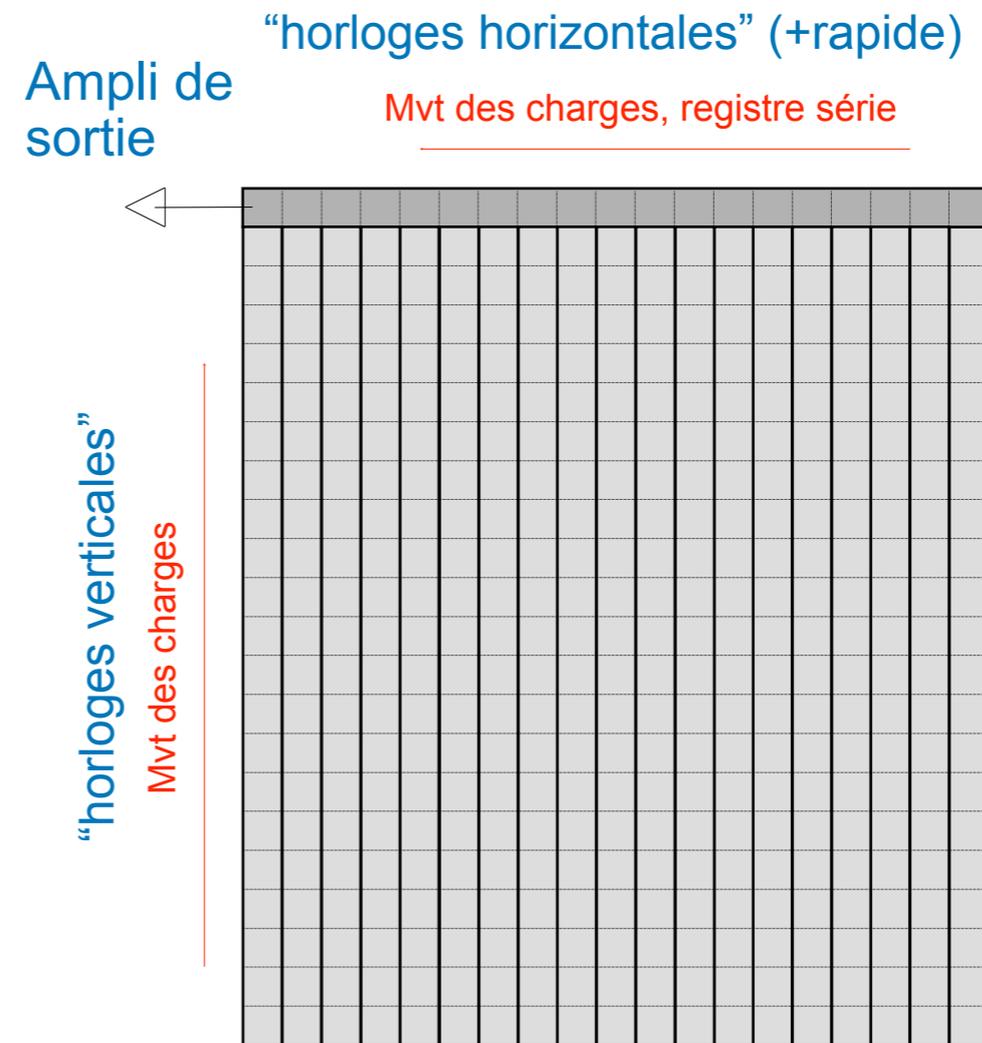
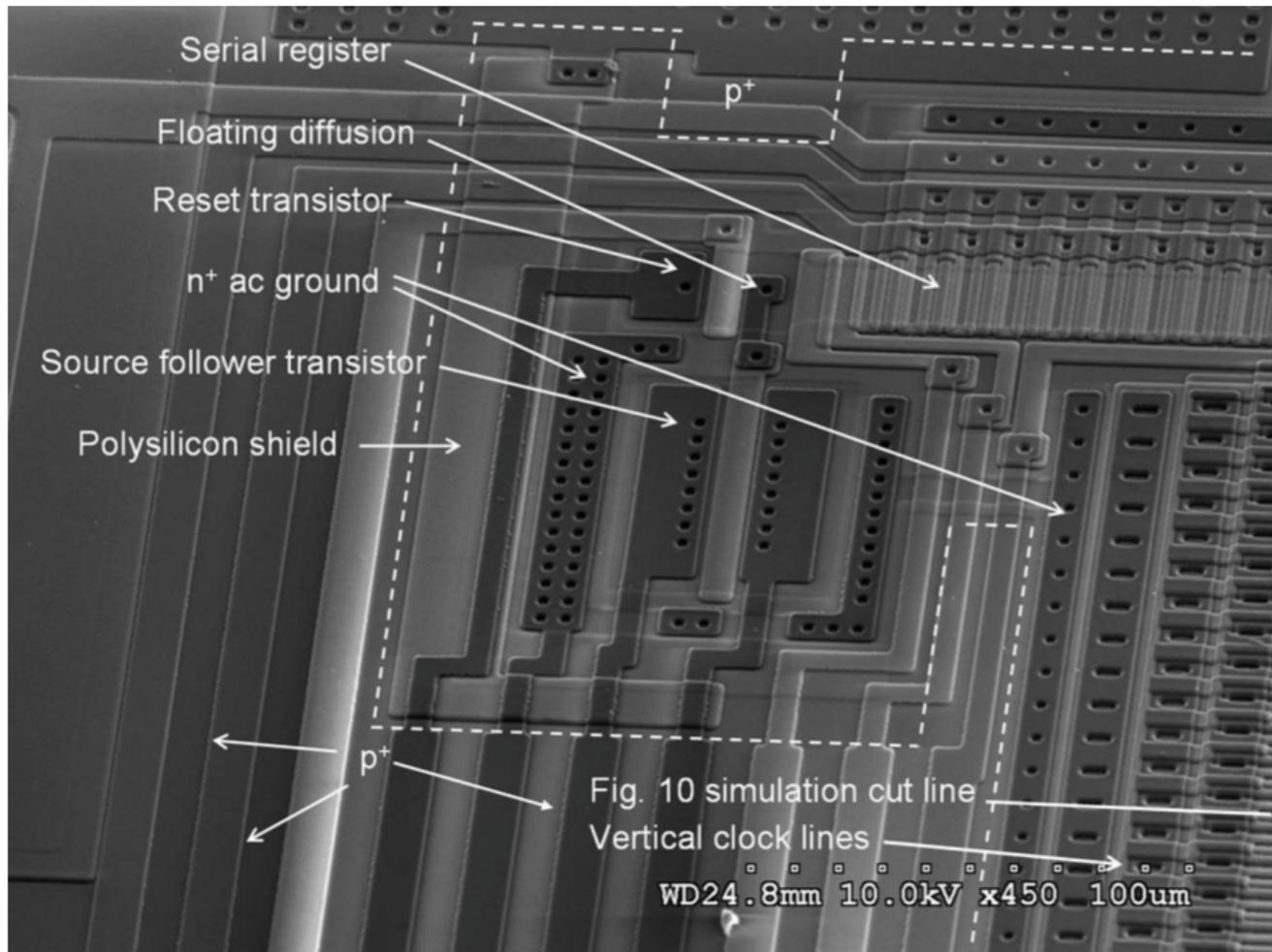
CCD en action



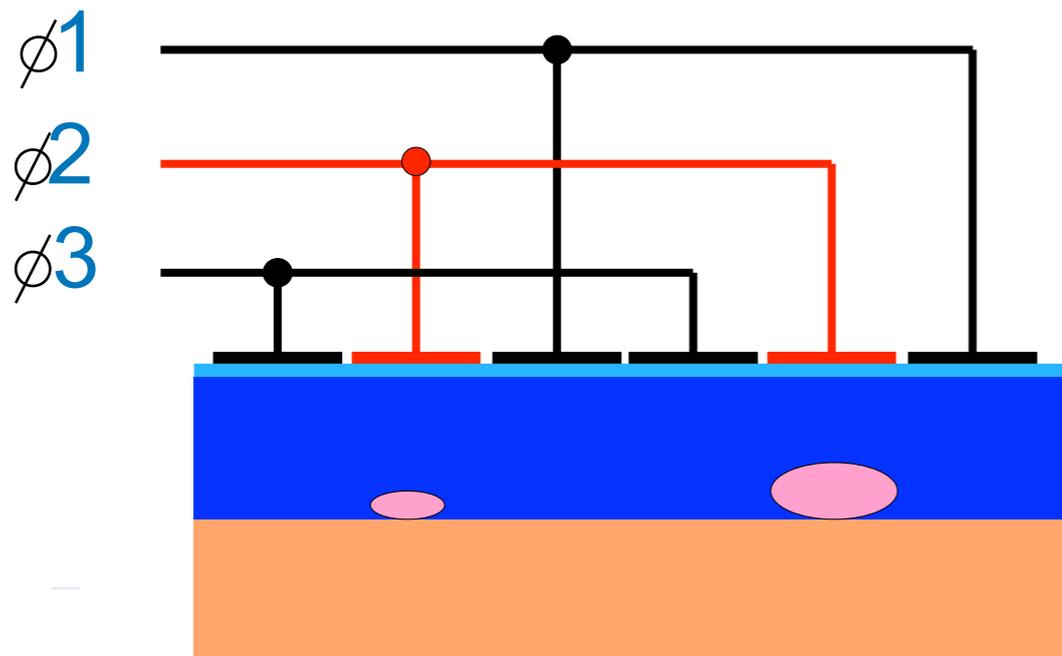
Transfer de charge



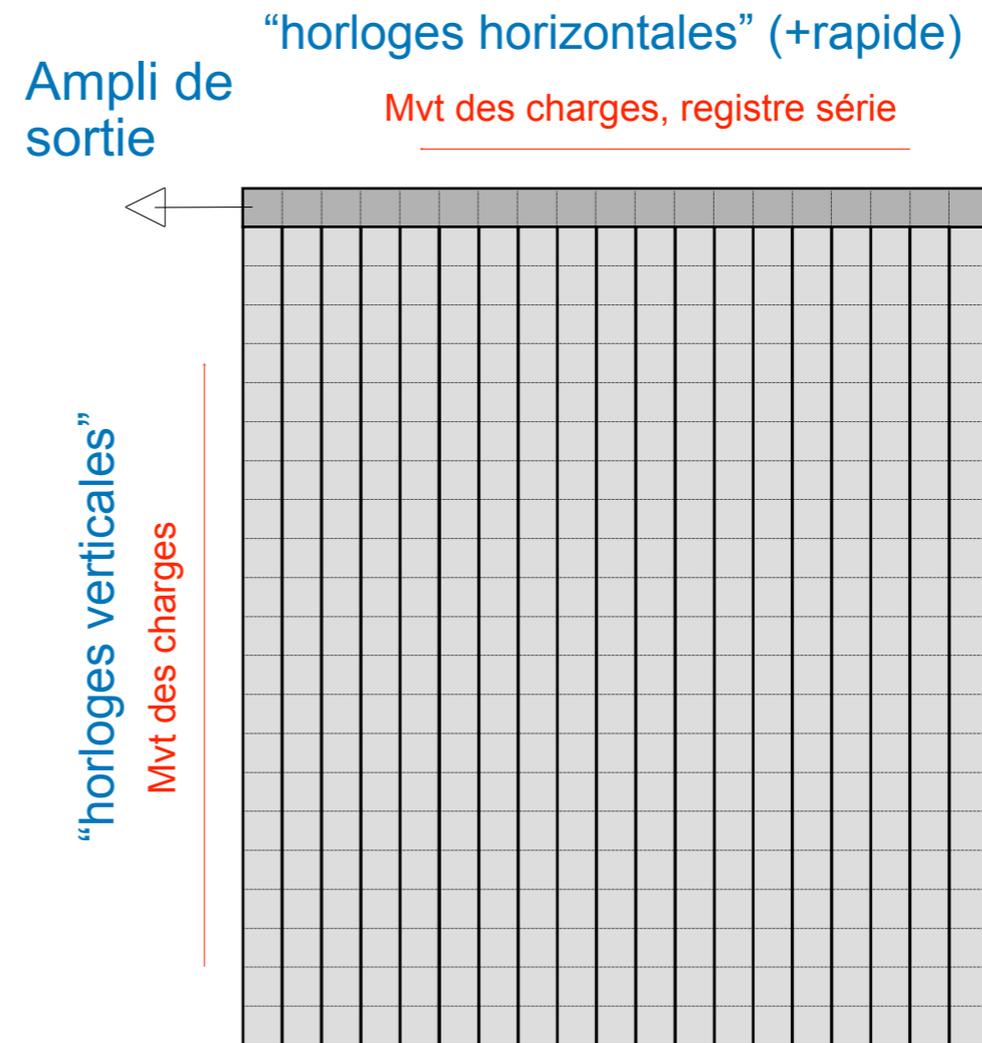
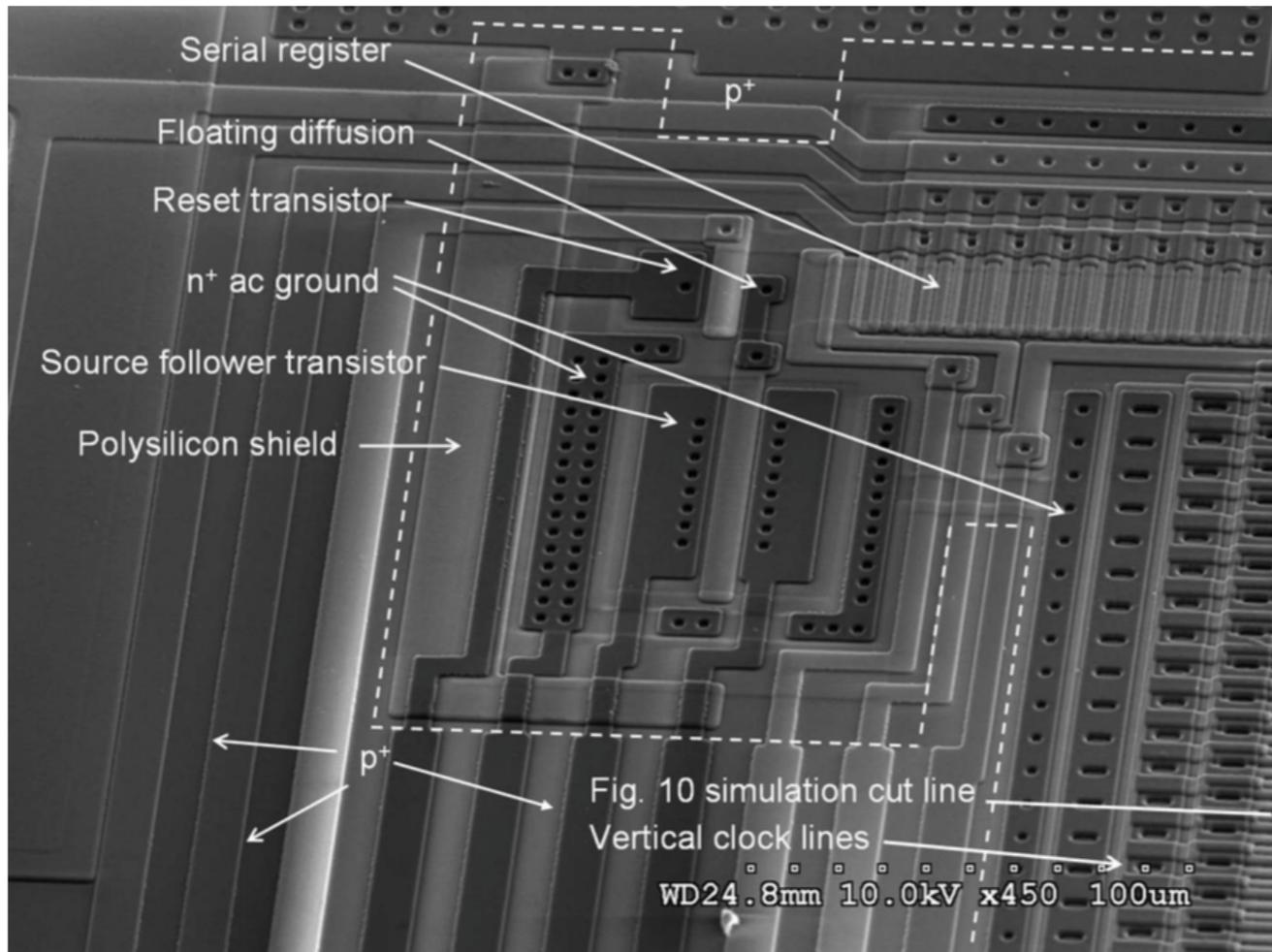
CCD en action



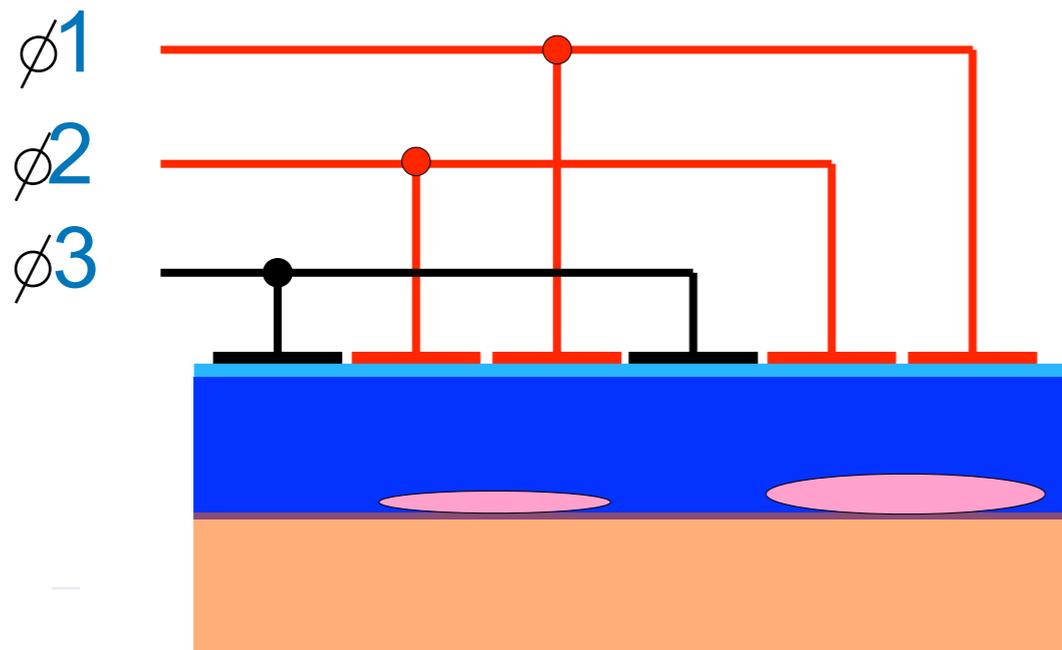
Transfer de charge



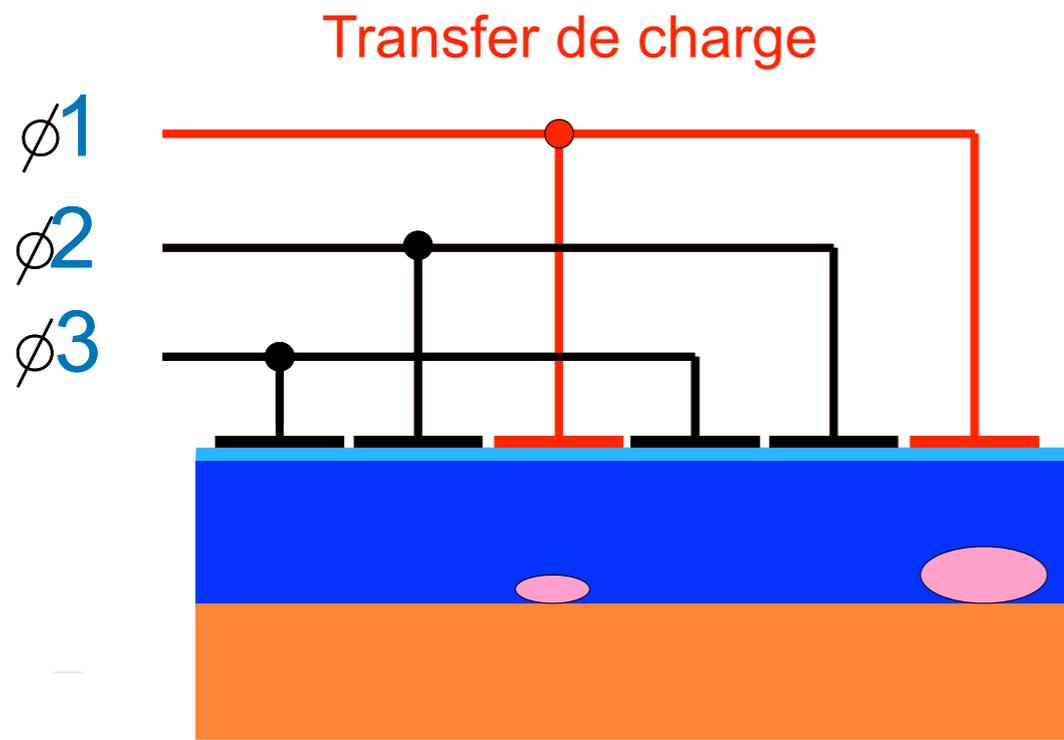
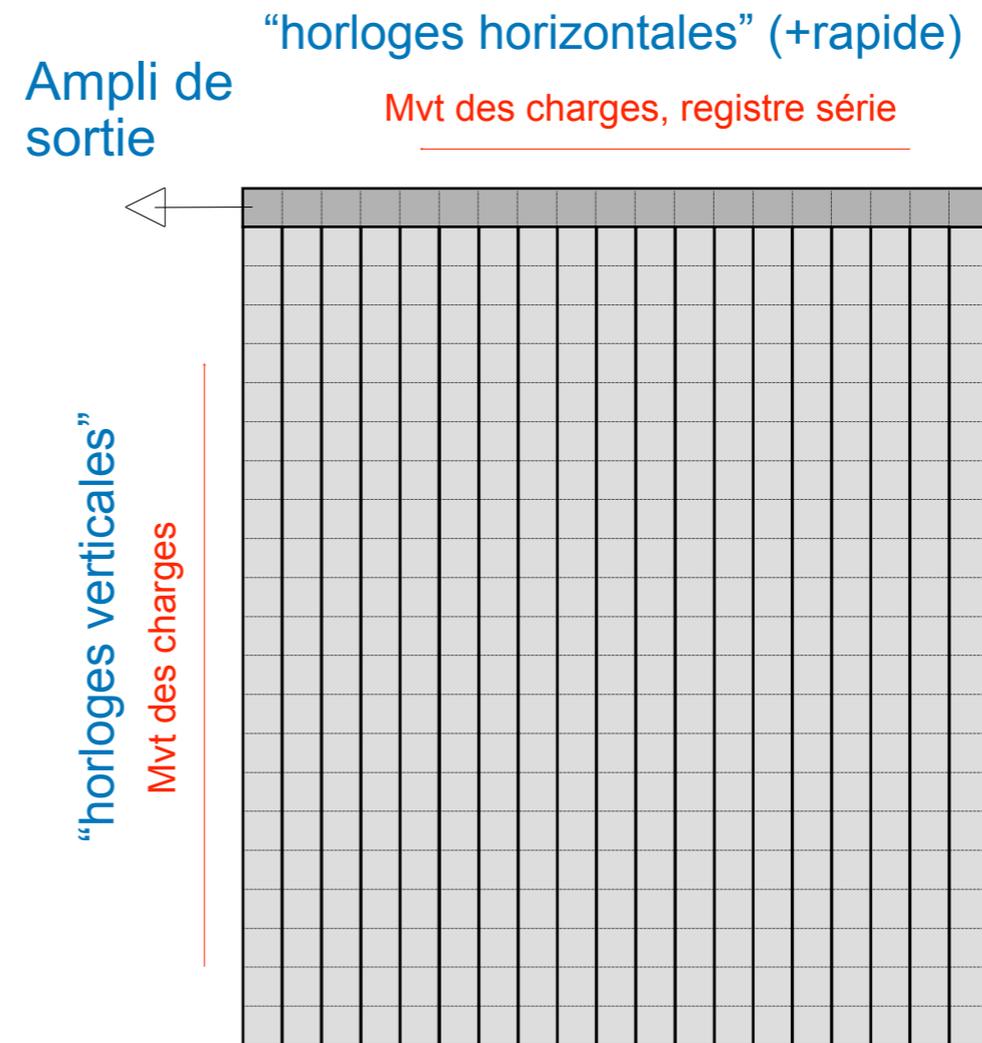
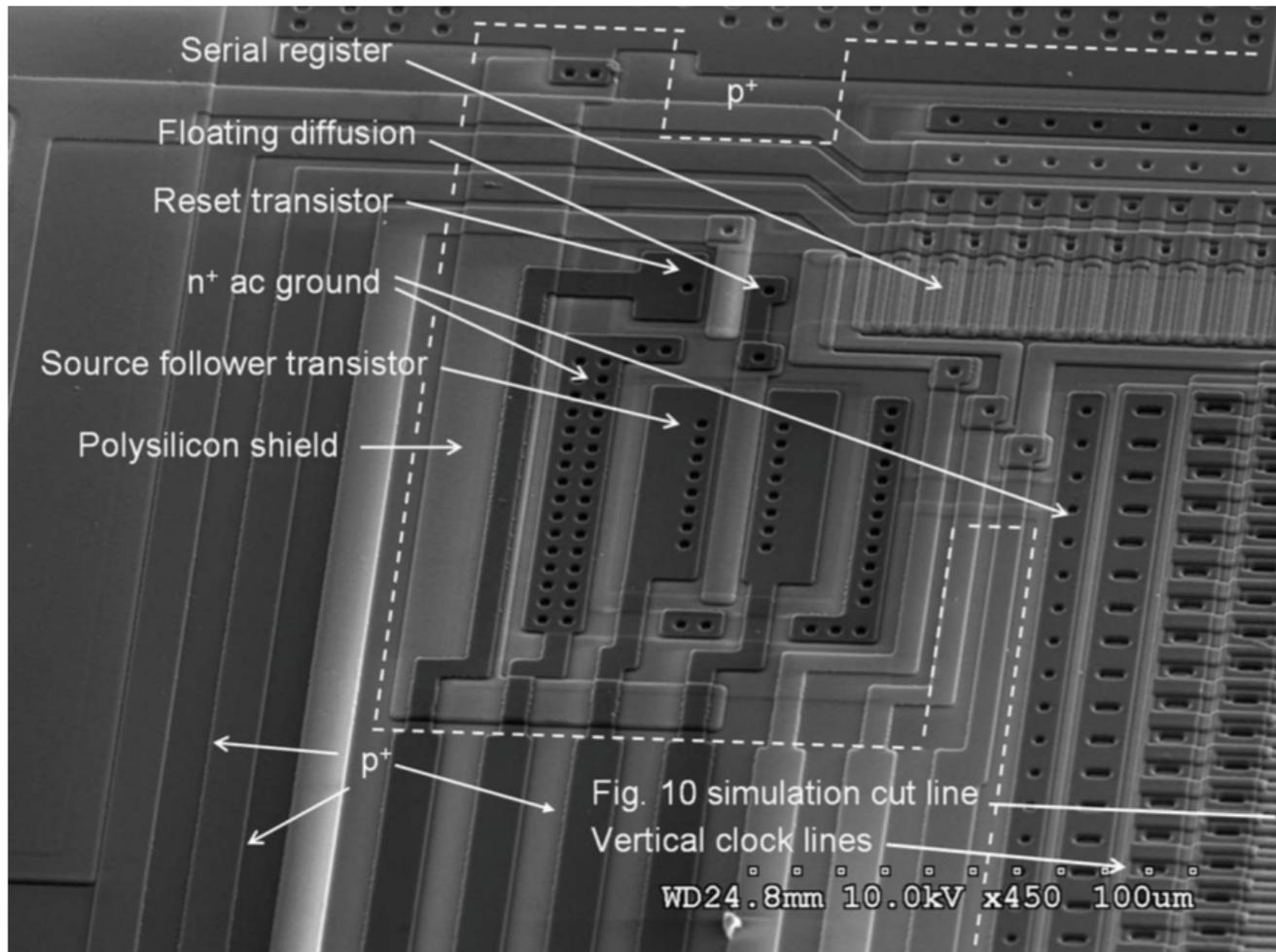
CCD en action



Transfer de charge

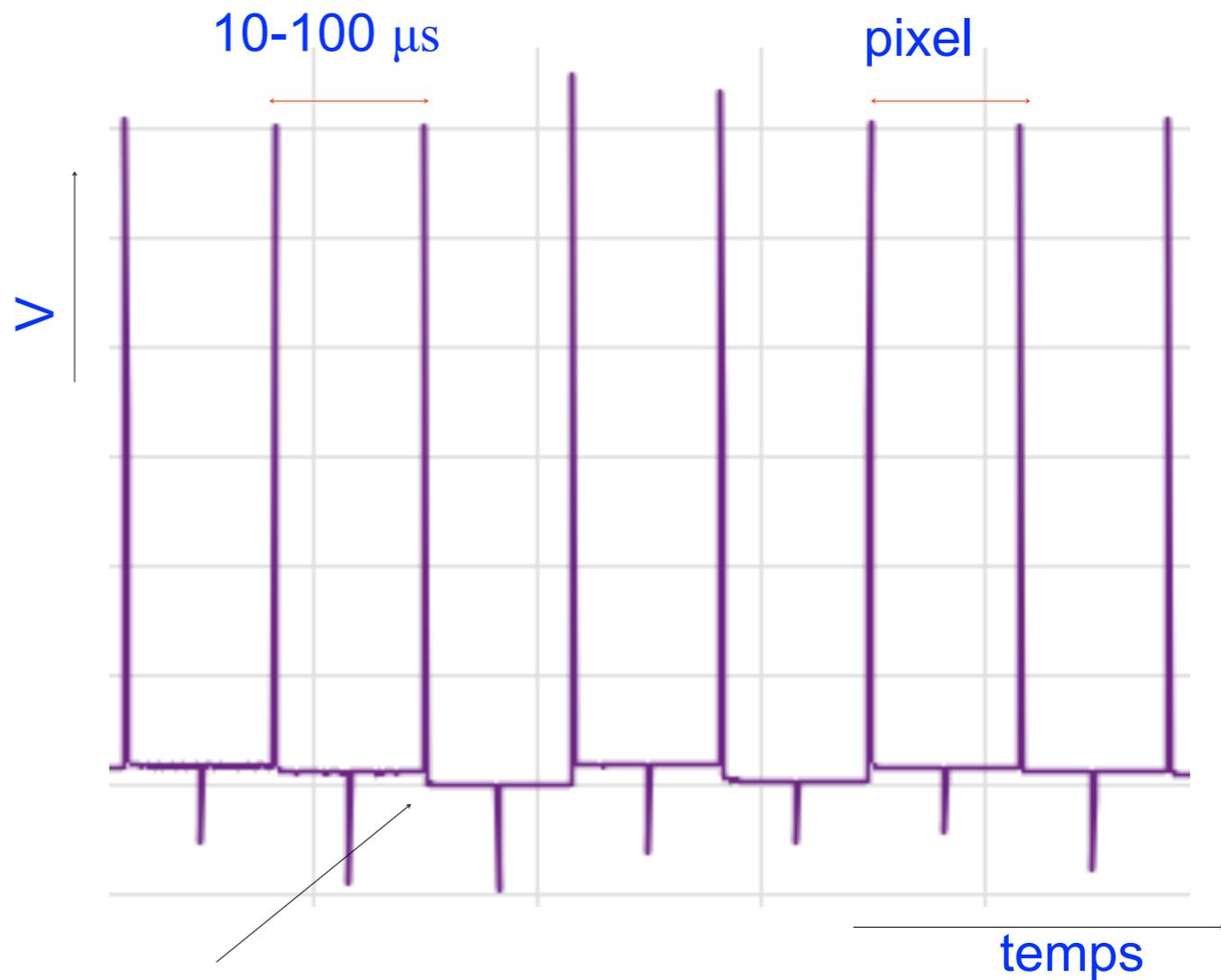
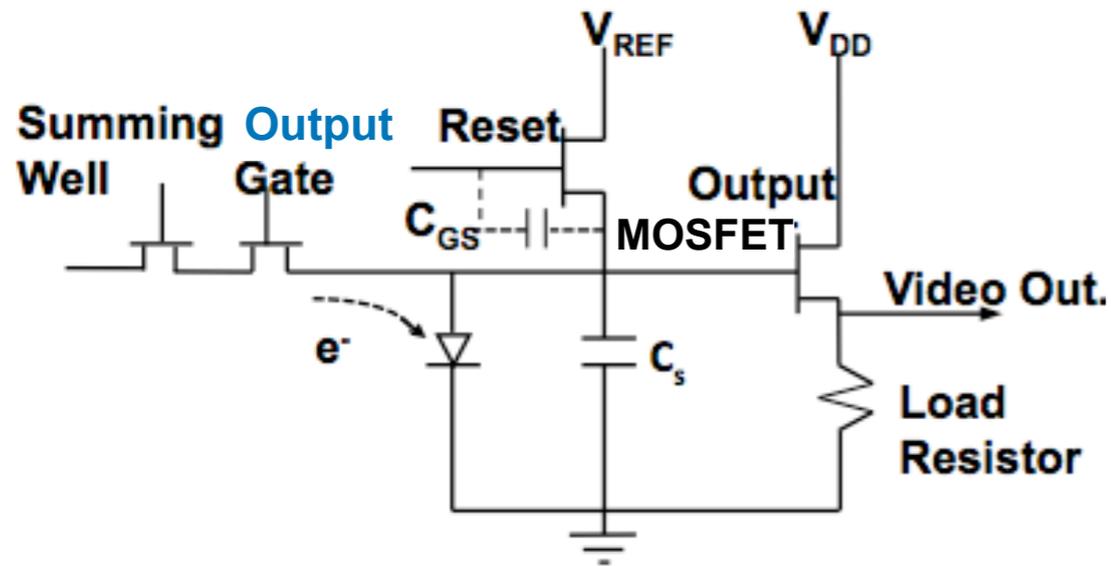


CCD en action

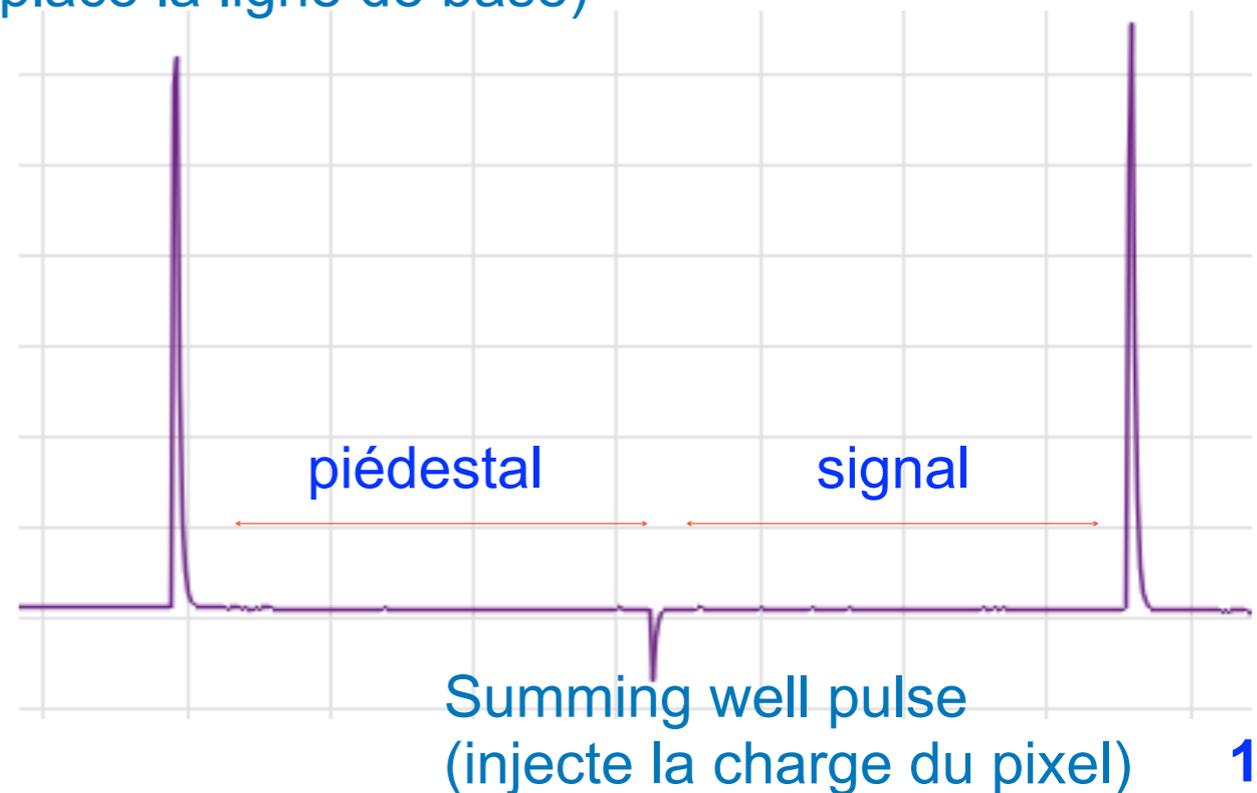


CCD en action

Lecture d'un pixel



Impulsion de reset
(déplace la ligne de base)



Correlated Double Sampling (CDS)

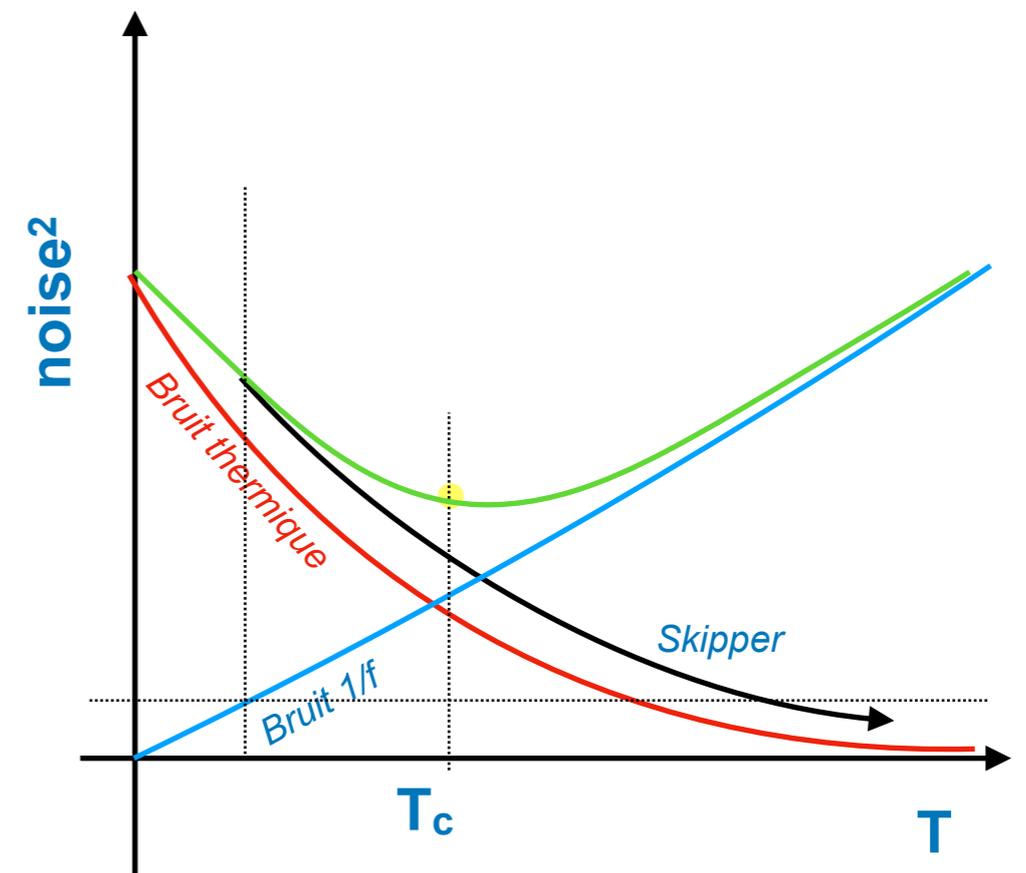
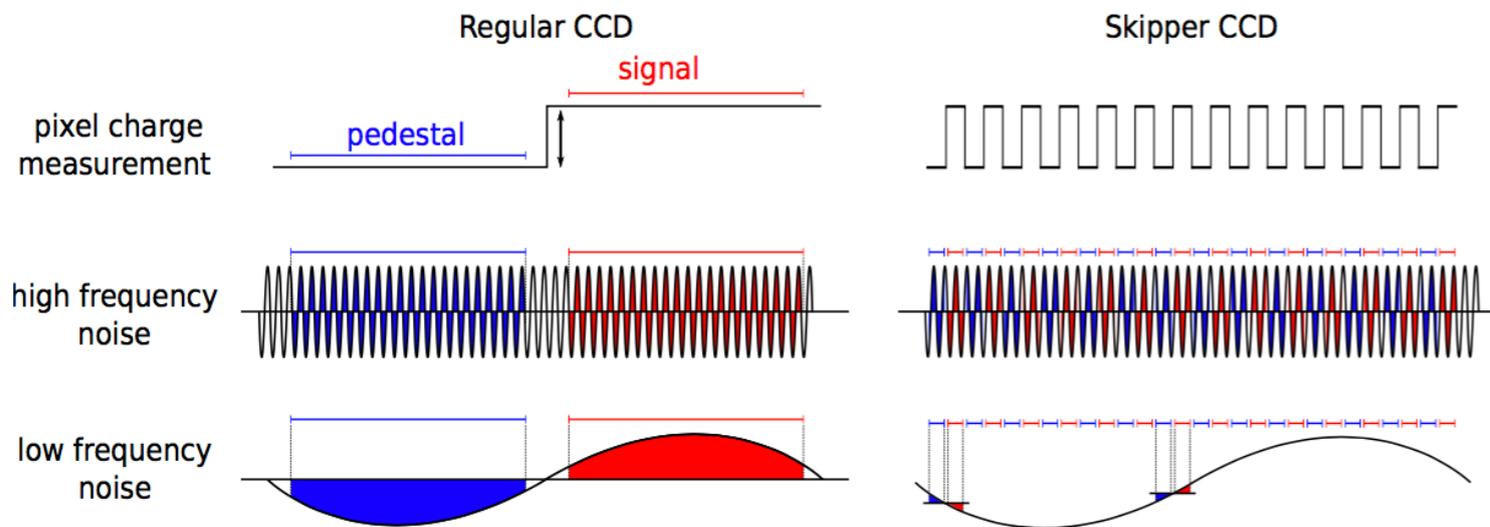
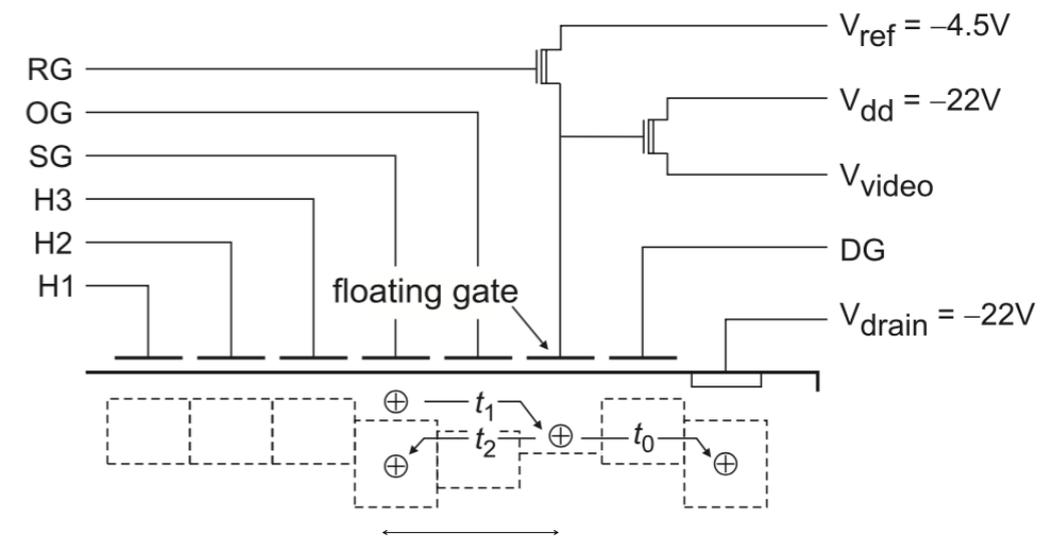
($\text{signal} - \text{pedestal}$) annule le bruit de reset (et autres bruits corrélés) est implémenté en analogique dans les systèmes de lecture (ASPIC puis CROC)

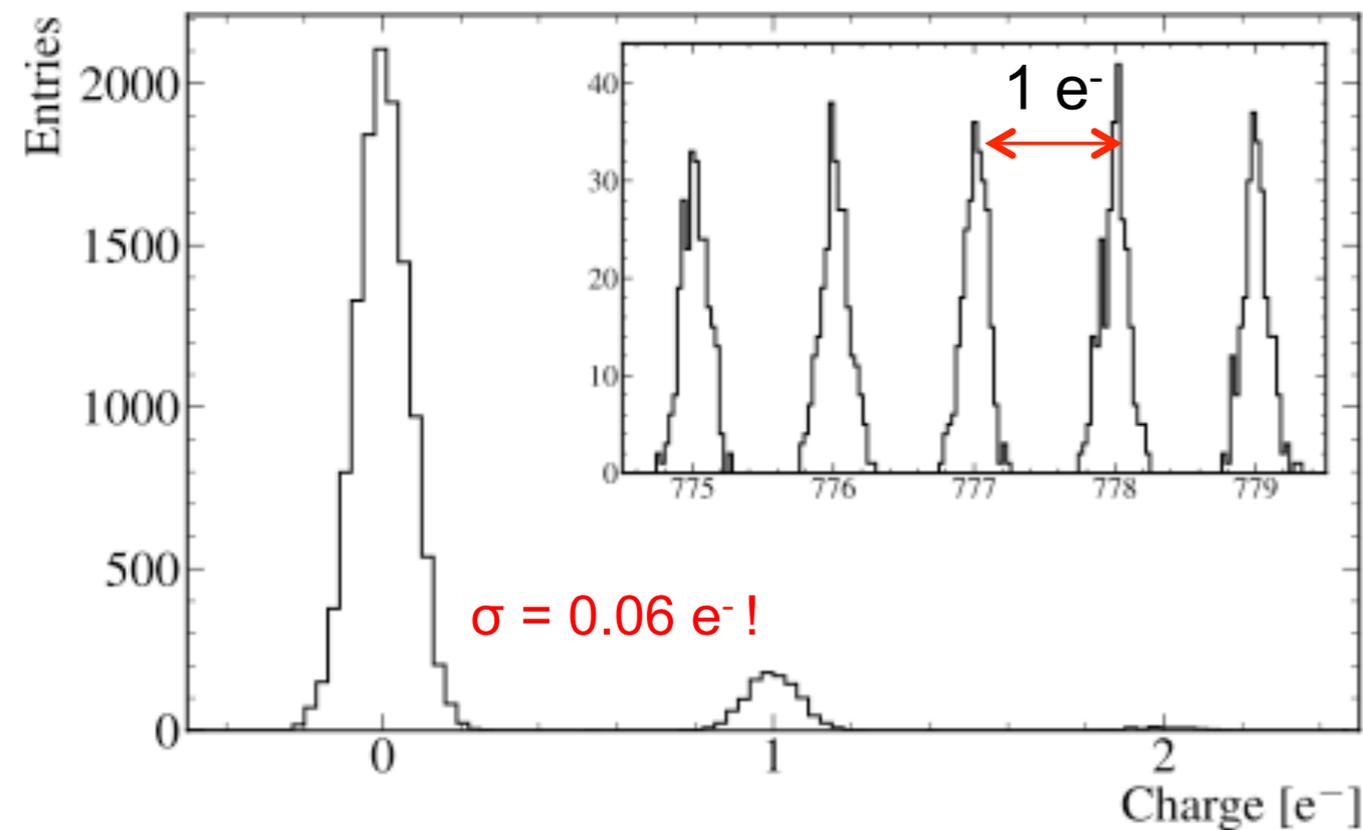
DAMIC-M lecture

- Mode skipper

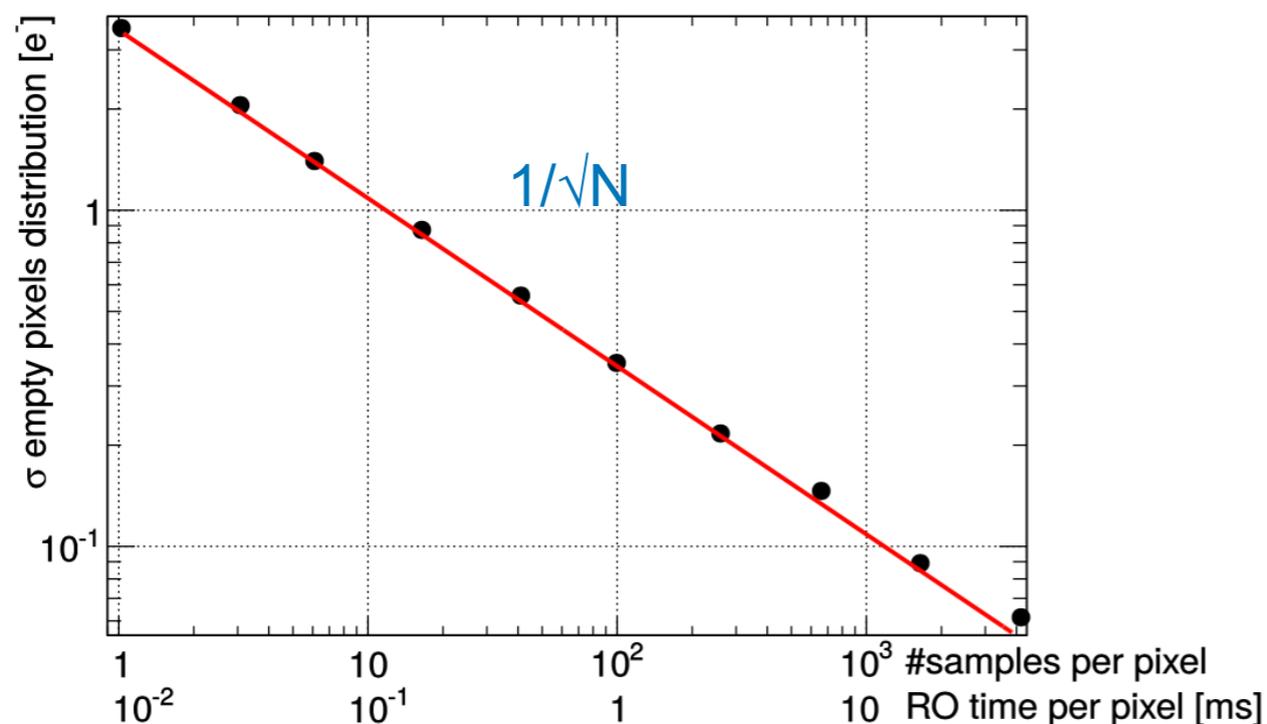
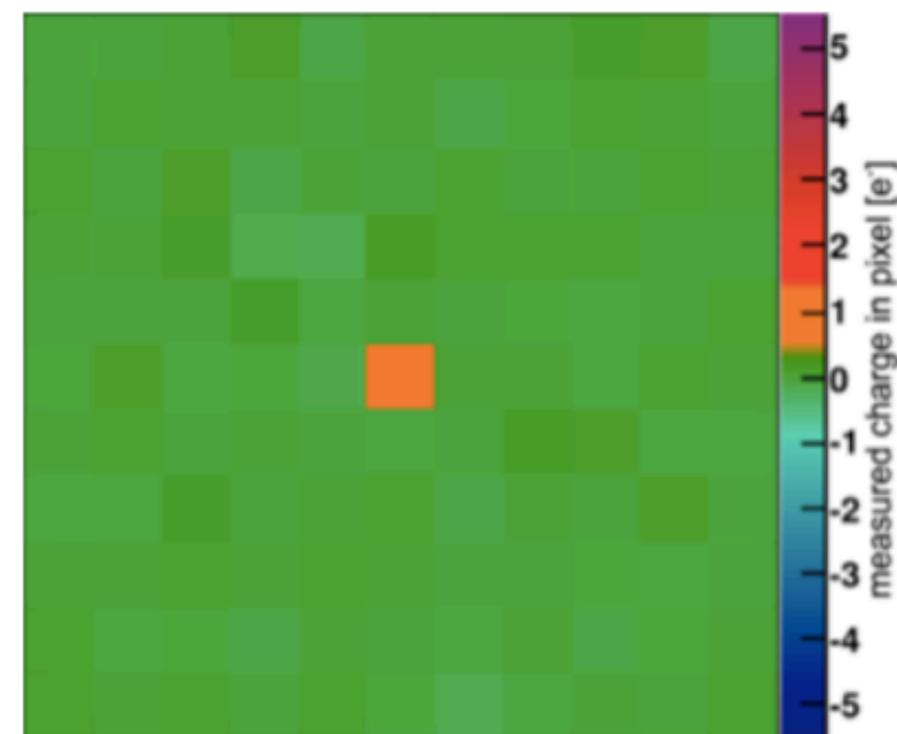
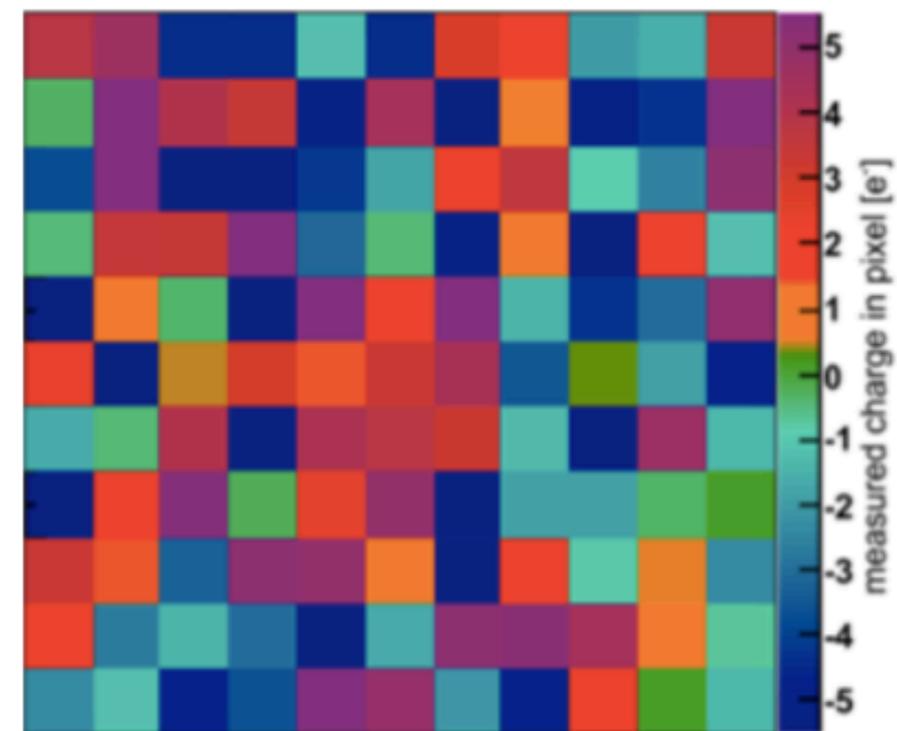
Mesure **non-destructive** de la charge!

Mesure rapide (élimine le bruit en $1/f$)
 mesure N fois (élimine le bruit thermique $\approx 1/\sqrt{N}$)





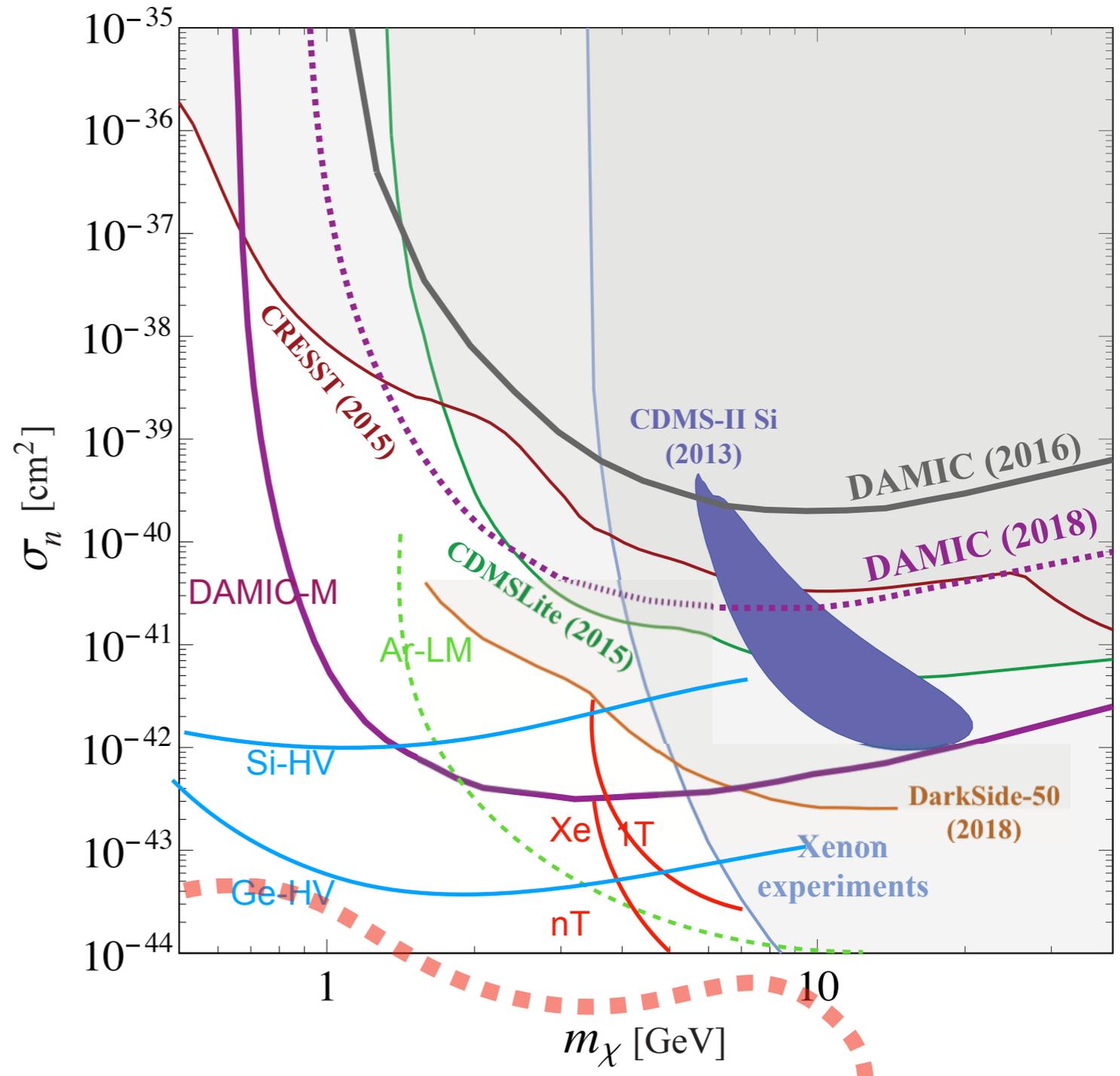
Les propriétés du mode skipper ont été démontrées sur un CCD DAMIC de petite taille à Fermilab



- Buts pour DAMIC-M:
- Résolution de 0.1 e-
 - Temps de lecture ≤ 1 ms

WIMP (recul nucléaire)

- Bkg 0.1 DRU
- Bruit de lecture 0.1 e-
- Seuil 2e-
- Courant de fuite 10⁻⁵ e-/jour/pixel

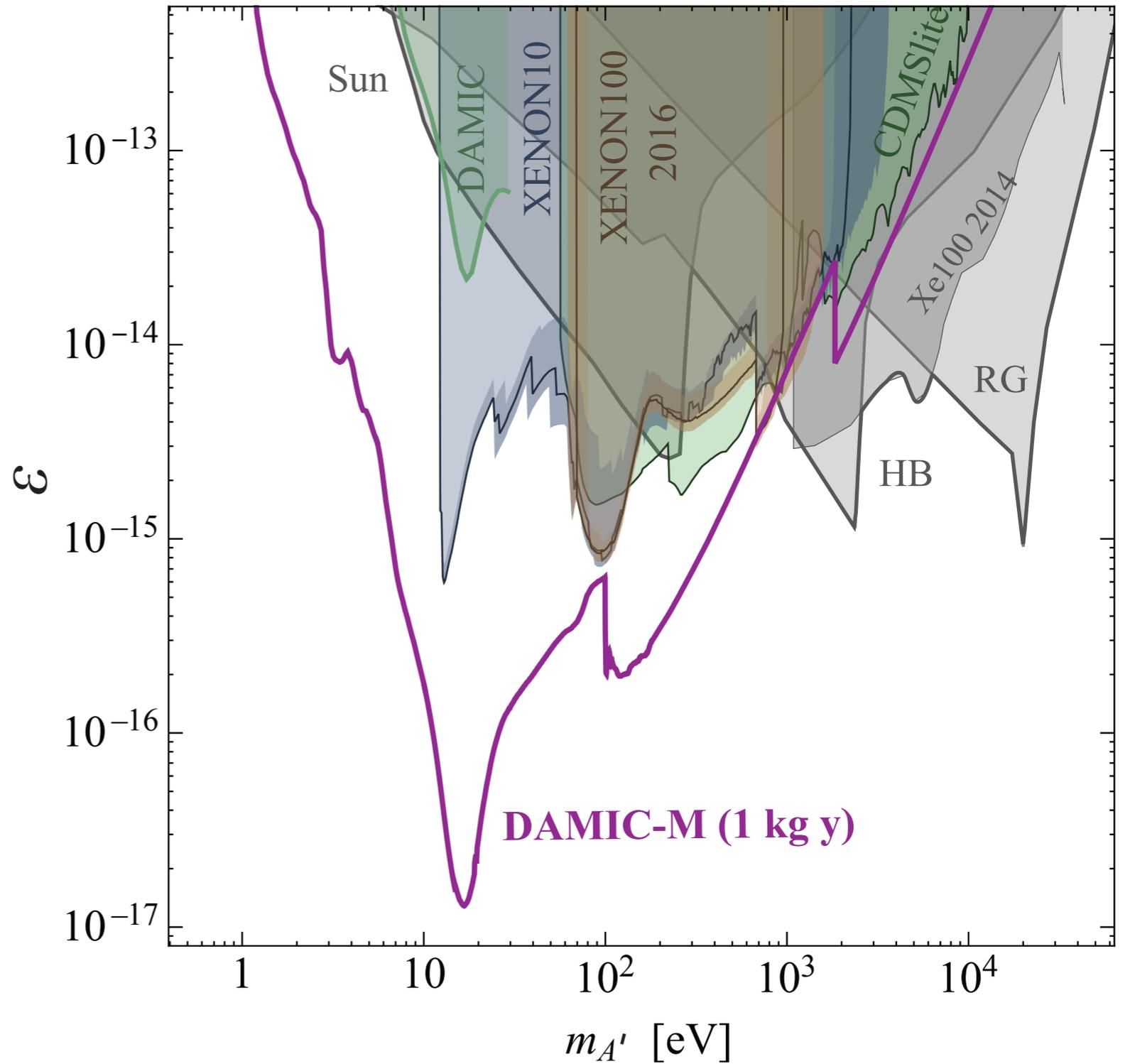
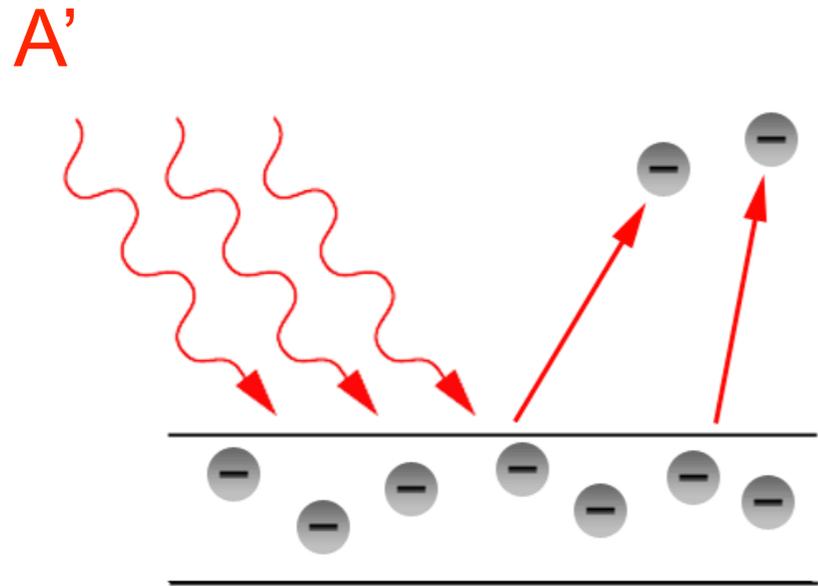


Atouts des CCD :

seuil, faible courant de fuite, identification des chaines radioactives de bruit de fond

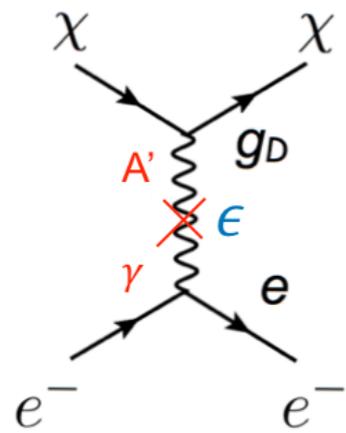
absorption de photons "lourds"

$$\epsilon e A'_\mu J_{EM}^\mu$$



Atouts des CCD : seuil et faible courant de fuite

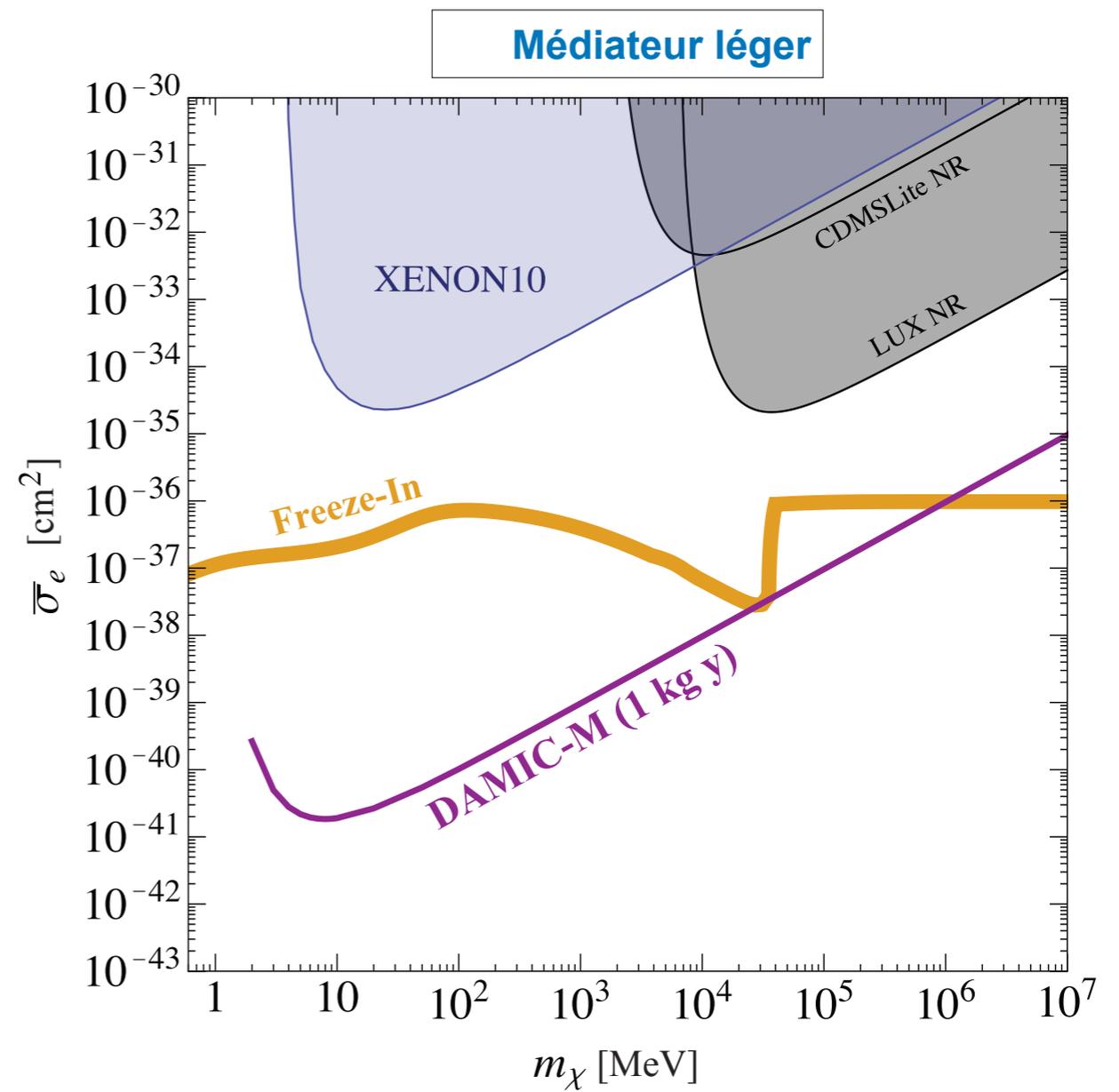
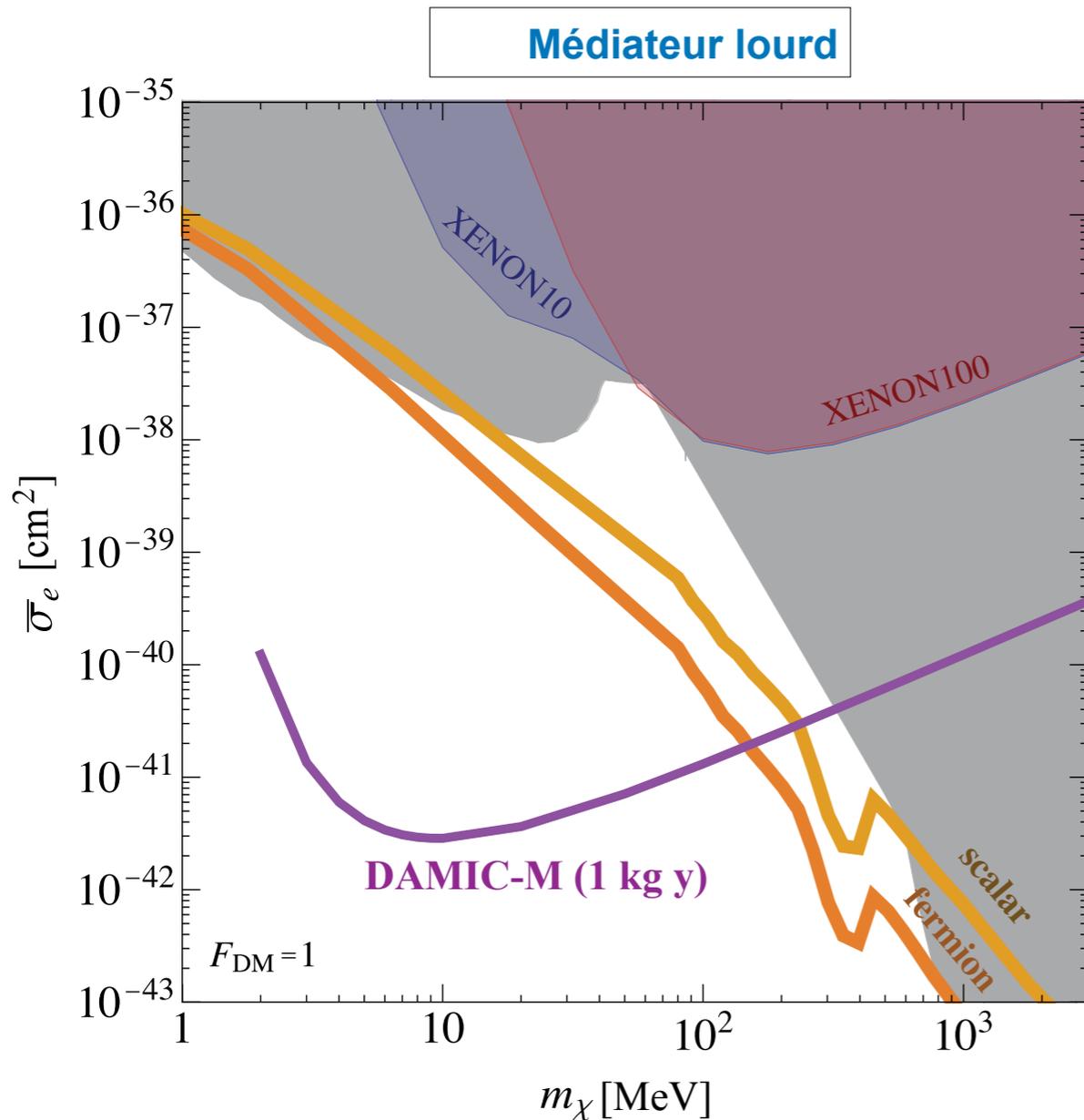
diffusion DM - électron



- Reculs électroniques :
- l'énergie déposée est au plus : $\frac{1}{2}m_\chi v_\chi^2 \lesssim 3 \text{ eV} \left(\frac{m_\chi}{\text{MeV}} \right)$
- Un signal est détectable si : $m_\chi \gtrsim 0.3 \text{ MeV} \times \frac{\Delta E_B}{1 \text{ eV}}$.

$$\bar{\sigma}_e \approx \alpha \epsilon^2 \alpha_D \times \{\text{espace de phase}\}$$

On peut explorer des masses au MeV pour $\Delta E_B \sim 3 \text{ eV}$



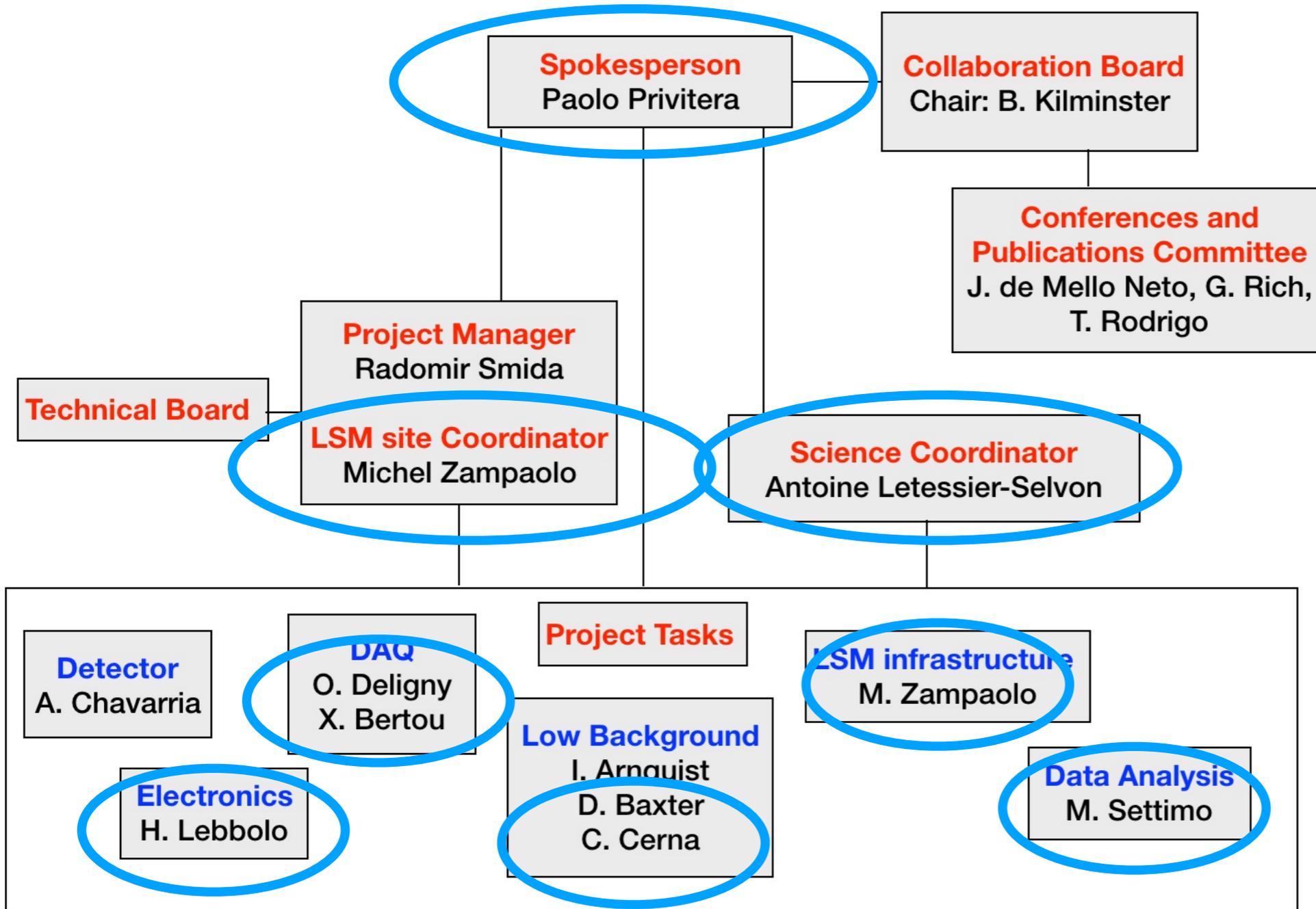
Ressources financières sur 5 ans, 2019 - 2023

- **ERC : 3, 35 M€ (dont 600 k€ retenus par la DR2 et SU)**
 - 5 postes temporaires de 3 ans au LPNHE: 0,7 M€
 - Dépenses ciblées: 1,1 M€ (CCD, électronique, bancs de tests, ...)
 - Investissement 0,45 M€ (salle blanche Modane, cuivre électroformé)
 - Dépenses générales 0,5 M€
- **NSF : 4 MUSD**
 - CCD, Cryostat, Kaptons
 - fonctionnement USA
 - Travel
- **Contribution CNRS/In2p3 : 2019-2023**
 - Salaires (PP + ALS) 0,5 M€ (CNRS, validé) —> Investissement
 - Fonctionnement des groupes français 0,1 M€/an, in2p3 (à valider)
 - PhD (bourses in2p3 avec UoC et régions, à valider)

Coût direct In2p3 0,5 M€ sur 7 M€ (7%, pour un projet à Modane)+PhDs

DAMIC-M en France

DAMIC-M Organizational Structure



6 laboratoires :

Ile de France: LPNHE,
LAL, IPNO

Nantes : SUBATECH

Bordeaux : CENBG

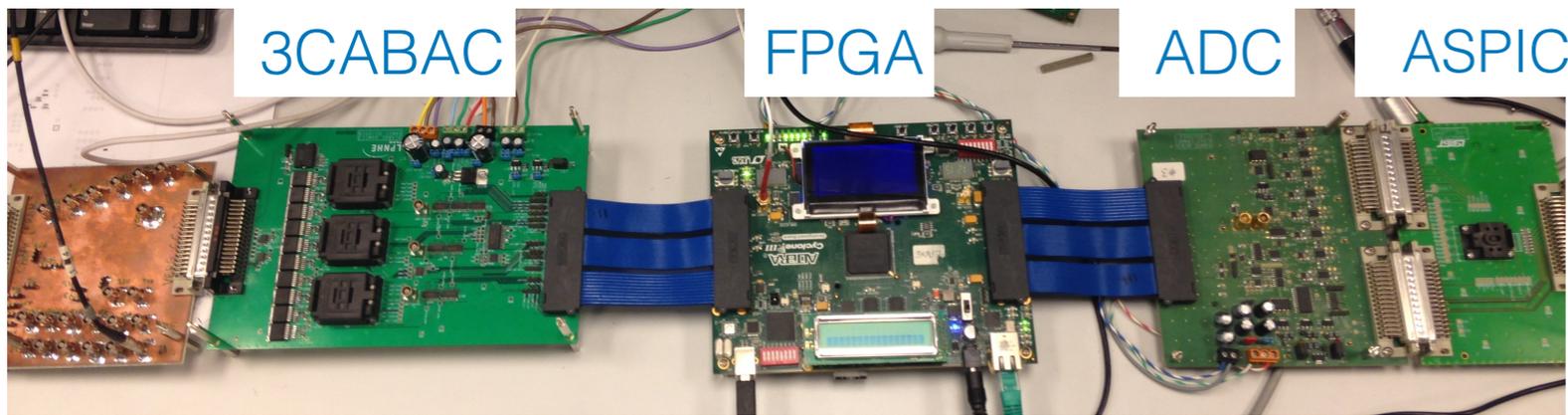
Grenoble : LSM (LPSC)

Le personnel français représente 40% des effectifs (25 sur 65) en plus du spokesperson nous coordonnons 5 des 6 tâches techniques, le site et la science. (USA 25%, Suisse 10%, Brésil, Argentine, Danemark, Espagne, Canada)

Planning prévisionnel

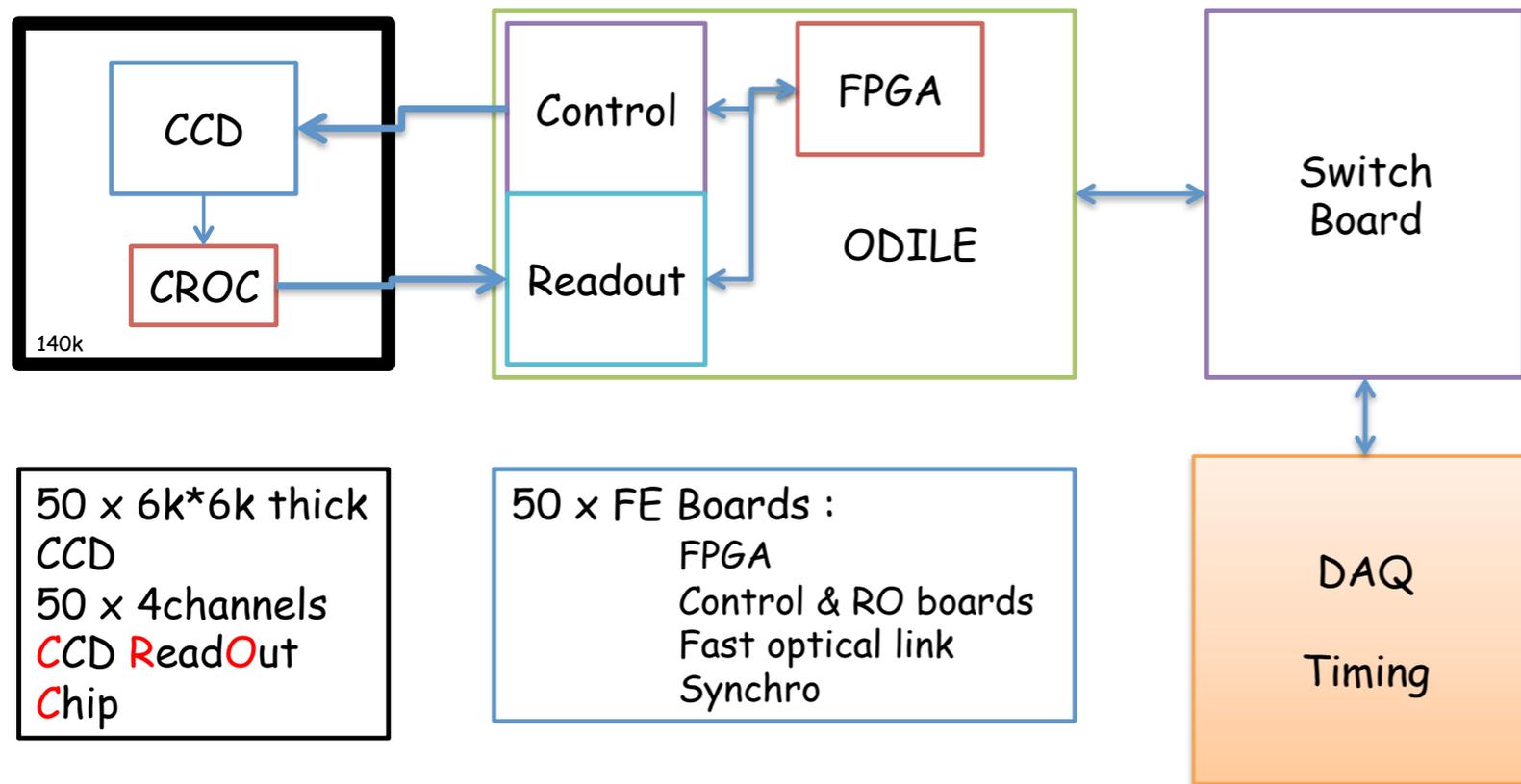
<i>Work Package</i>	2019				2020				2021				2022				2023			
CCDs	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Electronics	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■										
Cryostat	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■									
Shielding	■	■	■	■	■	■	■	■												
Background mitigation	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
Calibration	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
Simulation, analysis	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Installation	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
Data taking															■	■	■	■	■	■
 Design, preparation Pre-production, design evaluation Production																				

DAMIC-M en France - Électronique & Bancs de tests



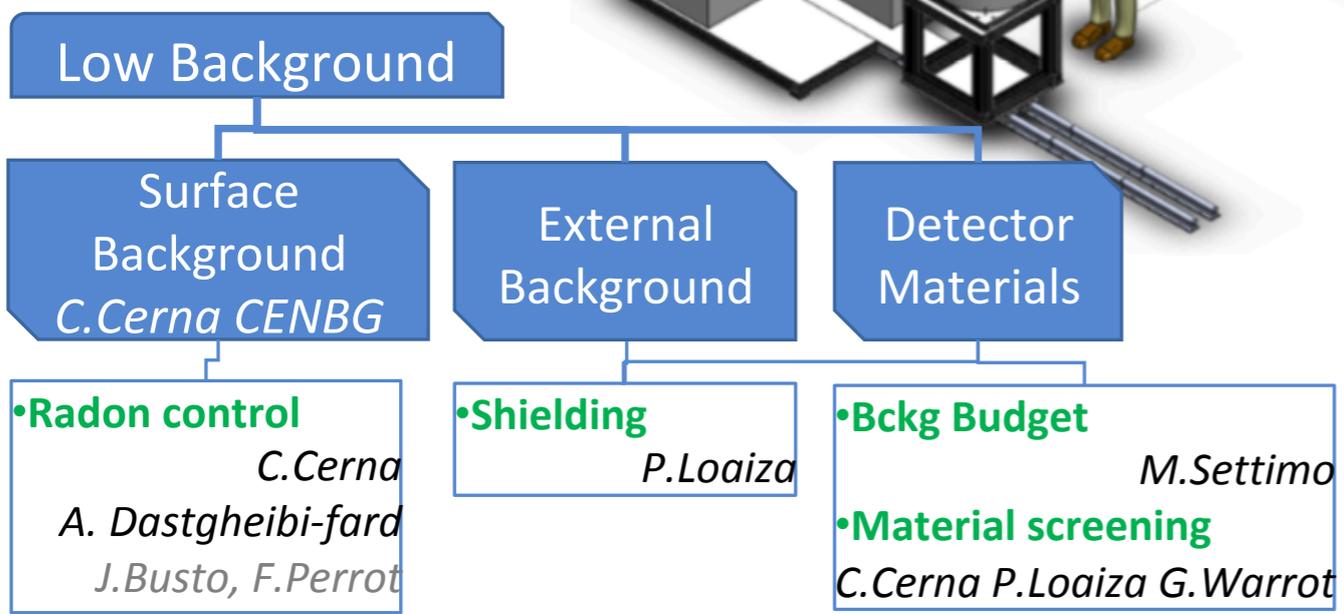
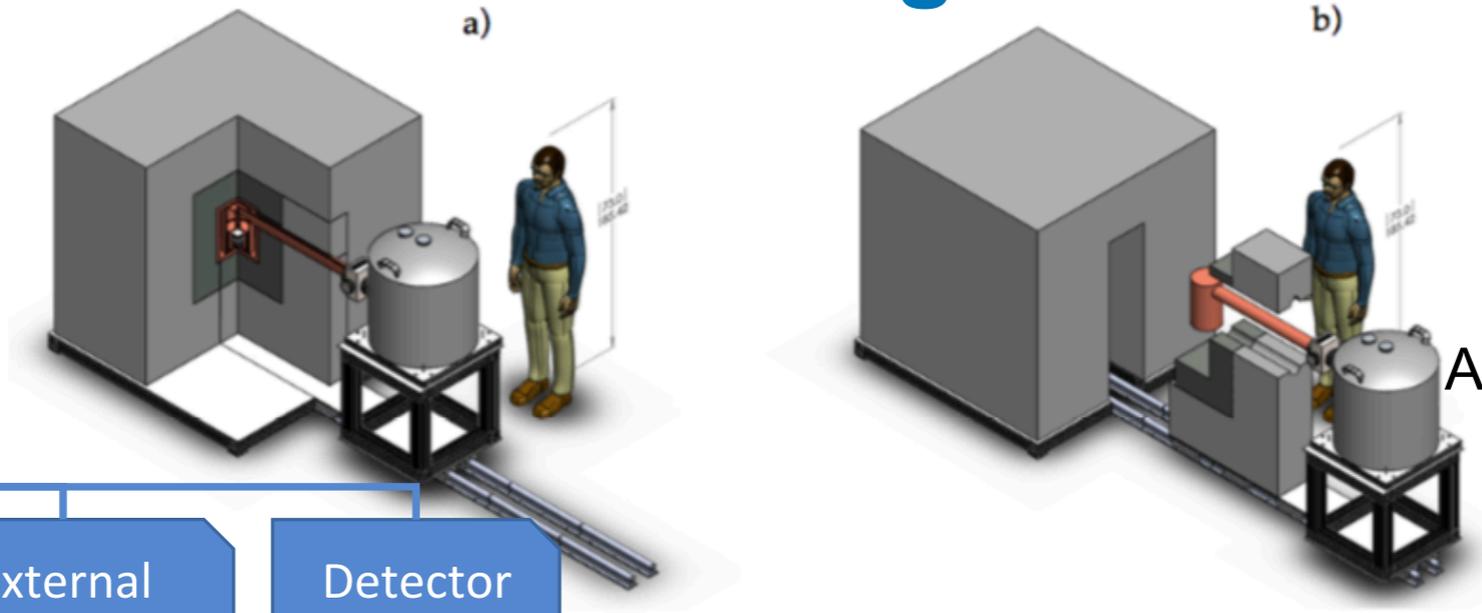
Equipe Technique
 P. Bailly / LPNHE
 M. Dhellot / LPNHE
 JJ. Dormard / LAL
 R. Gaïor / LPNHE
 L. Khalil / LPNHE
H. Lebbolo / LPNHE
 D. Martin / LPNHE
 P. Repain / LPNHE
 E. Sepulveda / LPNHE
 C. Sylvia / LAL
 P.Vallerand / LAL

Equipe Scientifique :
 R. Gaïor / LPNHE
A. Letessier Selvon / LPNHE
 A. Matalon / LPNHE
 P. Privitera / LPNHE
 G. Papadopoulos / LPNHE
 PhD2 / LPNHE
 PostDoc1, / LPNHE



- Conception, design, production, test CROC (ampli ultra low noise+ CDS)
- Conception, design, production, test 3-CABAC (séquenceur)
- Conception, design, production, test ADC (numérisation du signal vidéo, plusieurs options)
- Intégration ODILE (+DAQ - Orsay)
- Tests complets avec CCD, optimisation des modes de lecture (objectif < 0,1 e⁻ de bruit)

DAMIC-M en France - Low Background & Shielding



Equipe Technique
 Ch. Bourgeois / LAL
C. Cerna / CENBG
 A. Dastgheibi-Fard / LSM
 D. Douillet / LAL
 E. Guerard / LAL
 P. Loaiza / LAL
 Y. Peinaud / LAL
 G. Warrot / LSM

Expertise Bas bruit
Plateformes HP Germanium
CENBG / LAL / LSM

- CENBG Plateforme PRISNA
 - 3 HPGe à Bordeaux 50 mBq/kg
 - 2 HPGe à Modane 500 µBq/kg
- LSM
 - Accès ponctuels HPGe

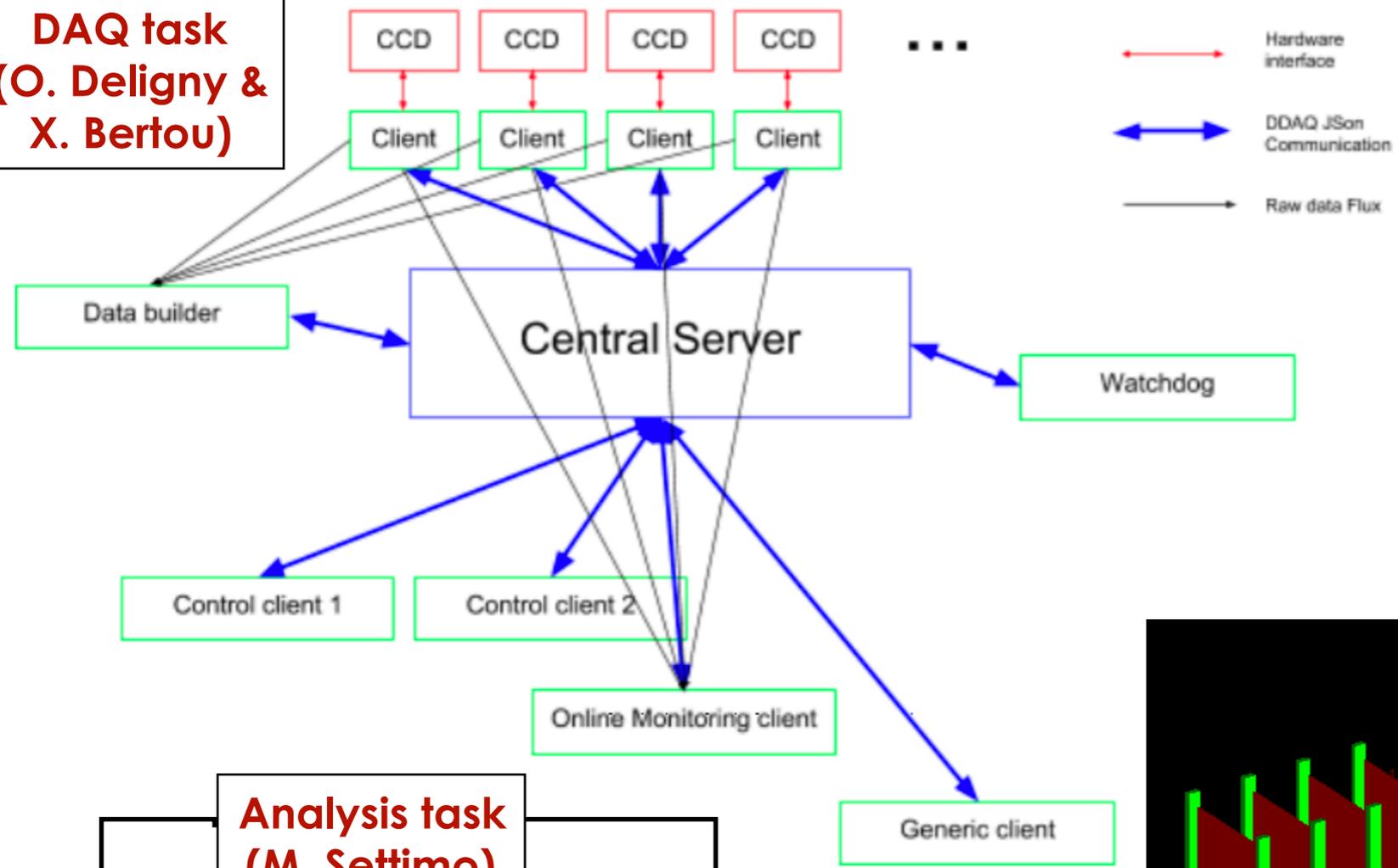
Expertise Radon
Emanation / Capture / Diffusion
CENBG / LSM / CPPM

- CENBG PRISNA Plateforme
 - 222Rn Emanation setup
[10-100] atomes/s/m²

Equipe Scientifique :
J. Busto / CCPM
 M. Settimo / SUBATECH
F. Perrot / CENBG
 F. Piquemal / CENBG

DAMIC-M en France - DAQ, Simulations, Analyse

DAQ task
(O. Deligny & X. Bertou)



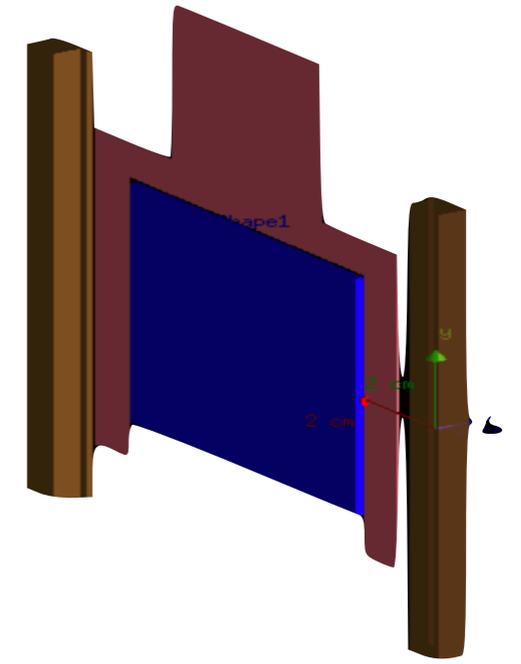
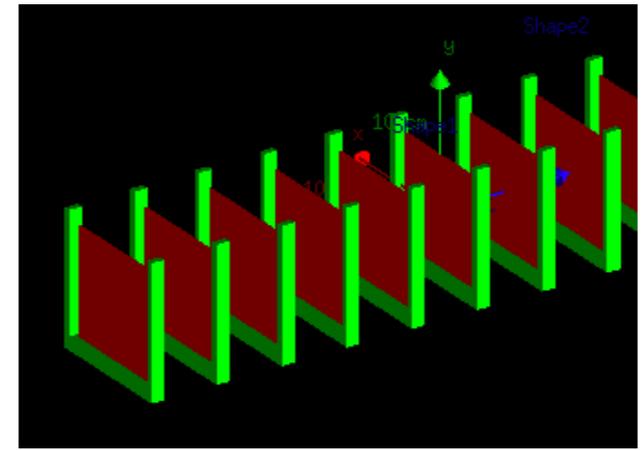
Equipe Technique
R. Gaior / LPNHE
P. Loaiza / LAL
E. Sepulveda / LPNHE

Equipe Scientifique :
P. Billoir / LPNHE
R. Gaior / LPNHE
G. Papadopoulos / LPNHE
A. Matalon / LPNHE
O. Deligny / IPNO
M. Settimo / SUBATECH

Analysis task
(M. Settimo)

Software

Analysis



Sim. Geant4
Subatech + ?

DQM & data
Processing
Subatech/IPNO

Reconst./data Selection
LPNHE/Subatech

Background budget
(det.design/materials/shielding)
Subatech/LAL + ?

+ LSM site coordination (M. Zampaolo & C. Vescovi/ LSM & LPSC)

Conclusions

- Durant les trois dernières années DAMIC a établi la compétitivité de la technologie CCD pour la recherche de WIMPS de basse masse. Les CCD sont uniques par leur résolutions spatiale et en énergie, leur faible courant de fuite et leur seuil extrêmement bas.
- DAMIC prend des données à SNOLAB. Les principaux résultats attendus sont la mesure précise du fond (^{32}Si et tritium) et les limites DM avec une exposition d'environ 10 kg.day
- DAMIC-M, un détecteur CCD d'un kilogramme à très faible bruit avec une résolution d'une fraction d'électron explorera un nouvel espace de paramètre, étudiant le paradigme WIMPs et le secteur caché avec une sensibilité améliorée de plusieurs ordres de grandeurs.
- DAMIC-M est financé en majorité par une bourse ERC Advanced Grant et un financement NSF. L'expérience sera installée au LSM. C'est une belle opportunité pour la formation de jeunes chercheurs et aussi pour que de nouveaux groupes rejoignent ce projet ambitieux.
- D'autres applications de la technologie des CCDs DAMIC sont envisageables (diffusion cohérente de neutrino, nuclear forensics,...)