

# Optimisation de détecteurs cryogéniques semi-conducteurs pour le CEvNS et la matière noire

Journées réseau détecteurs semi-conducteurs 2021, IP2I

Jules Colas, Doctorant  
Encadrant: Julien Billard

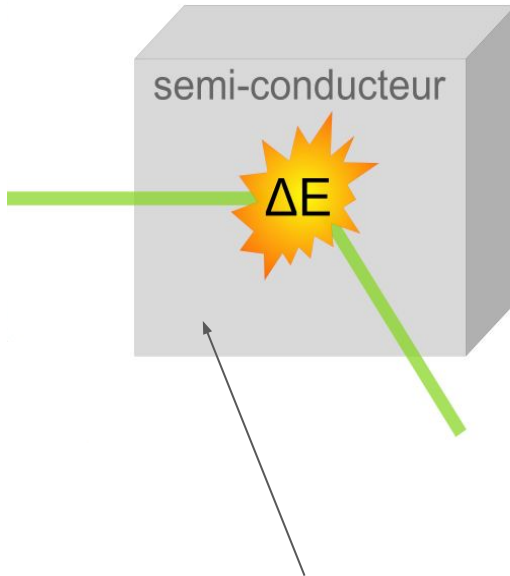
Présentation largement inspirée de la thèse de **Dimitri Misiak**  
Merci à lui !



# Sommaire

- Contexte
- Modélisation des détecteurs
- Optimisation par la simulation
- Confrontation simulations / mesures
- Conclusion

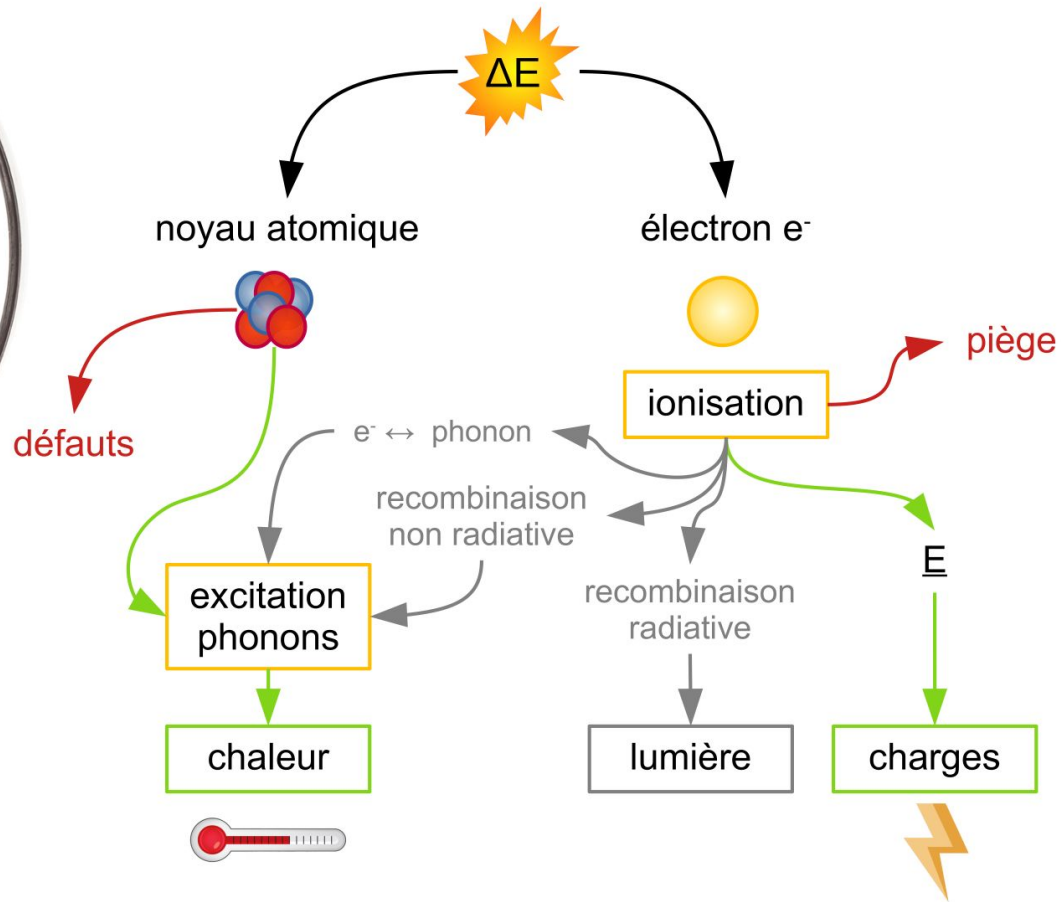
## Un détecteur = “Une cible cristalline instrumentée”



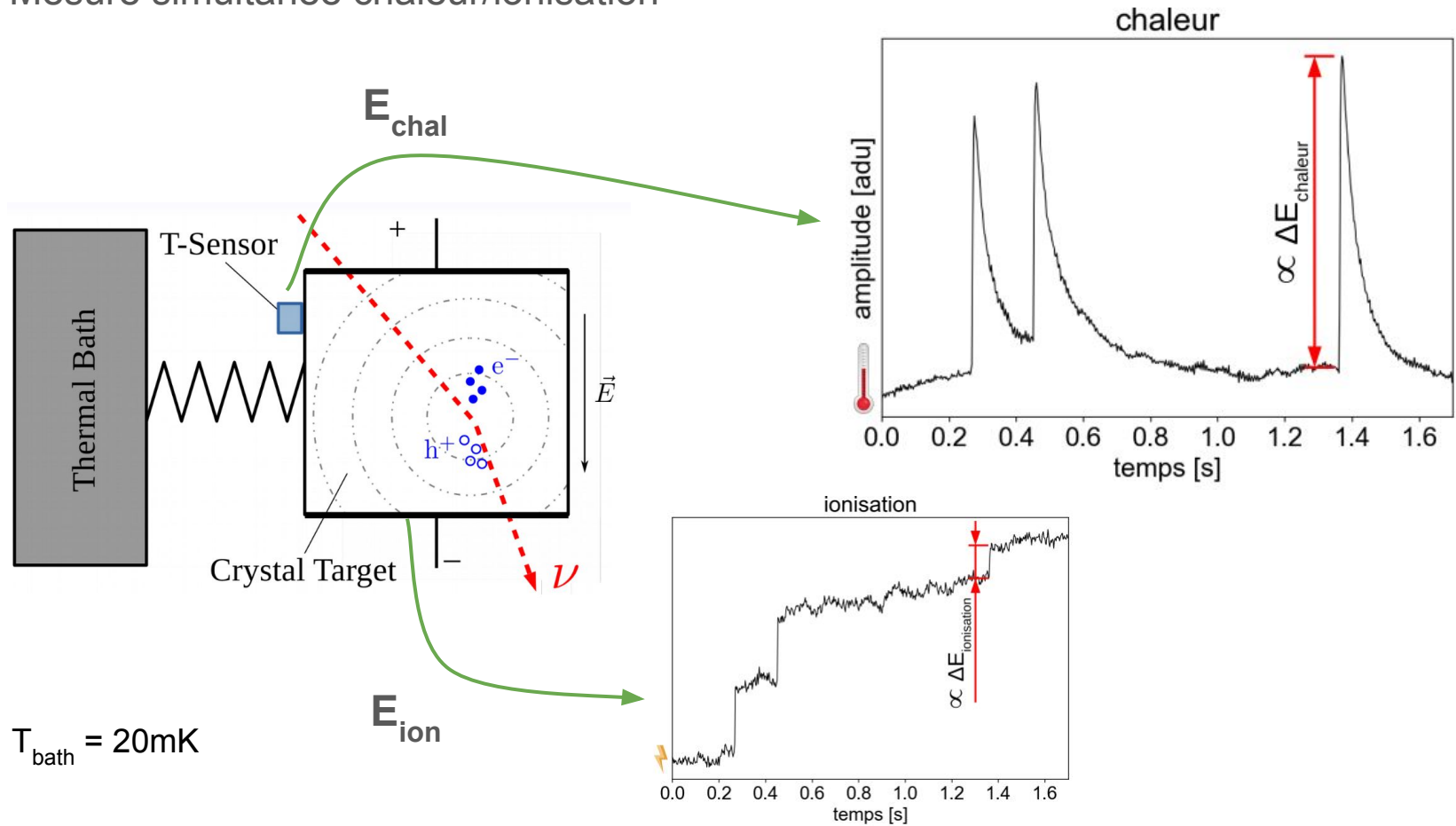
**Matériaux cible / Absorbeur**  
**Ge, pureté 1e10**

Mesurer les infimes variations d'énergie dans le matériaux cible

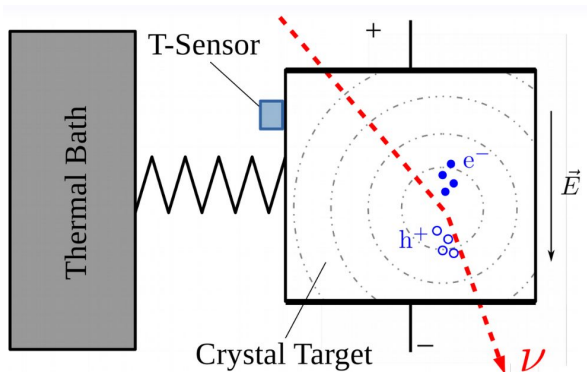
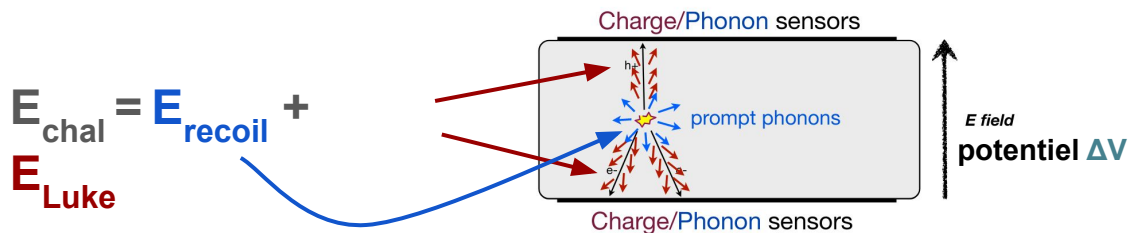
- ↳ Étudier les interactions fondamentales
- ↳ Recherche de nouvelles particules (DM, new bosons, ...)
- ↳ Mesurer les fonds radioactifs



# Mesure simultanée chaleur/ionisation



# Deux "modes de fonctionnements"



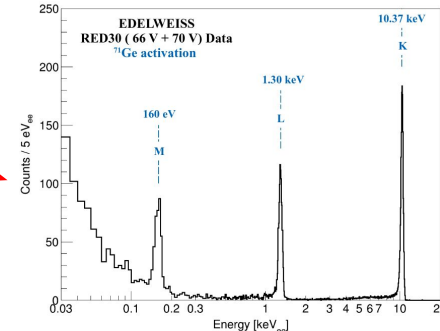
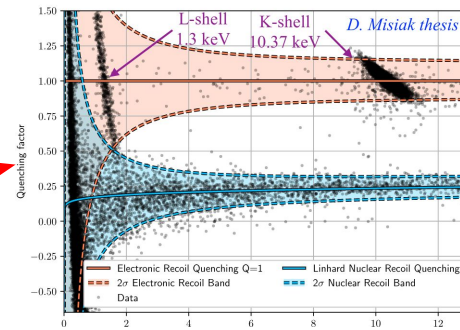
$T_{\text{bath}} = 20\text{mK}$

Low-Voltage (2V)  
Identification de particules

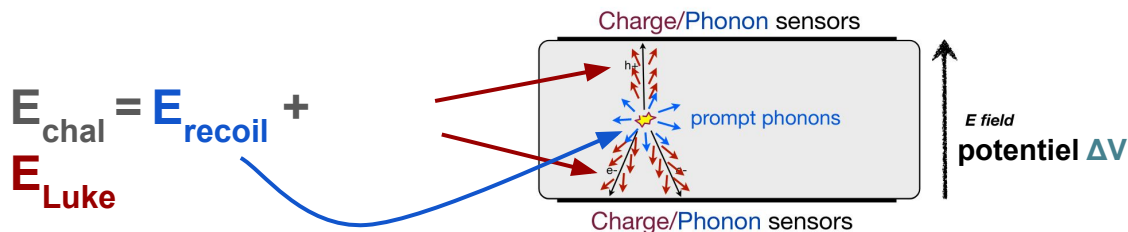
Boost du signal chaleur  
High-Voltage (200V)

$E_{\text{Luke}} = E_{\text{ion}} \Delta V / \epsilon$

$\epsilon = 3 \text{ eV (Ge)}$

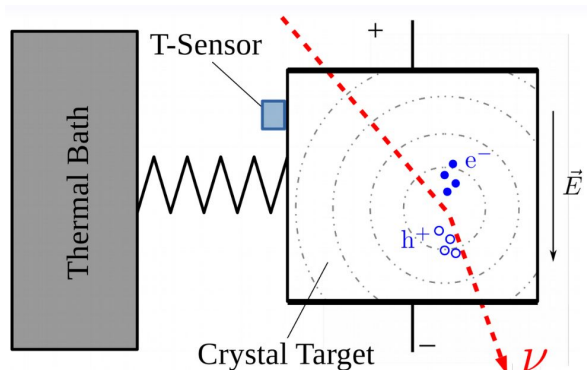


# Deux "modes de fonctionnements"



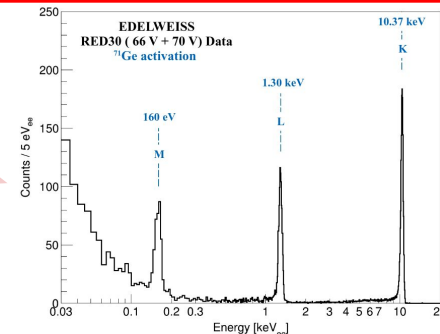
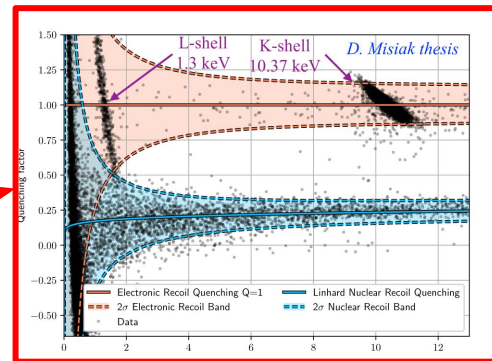
$$E_{\text{Luke}} = E_{\text{ion}} \Delta V / \epsilon$$

$$\epsilon = 3 \text{ eV (Ge)}$$



Low-Voltage (2V)  
Identification de particules

Boost du signal chaleur  
High-Voltage (200V)

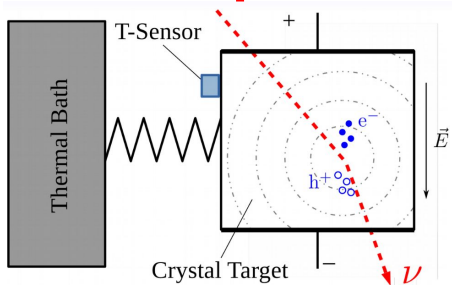
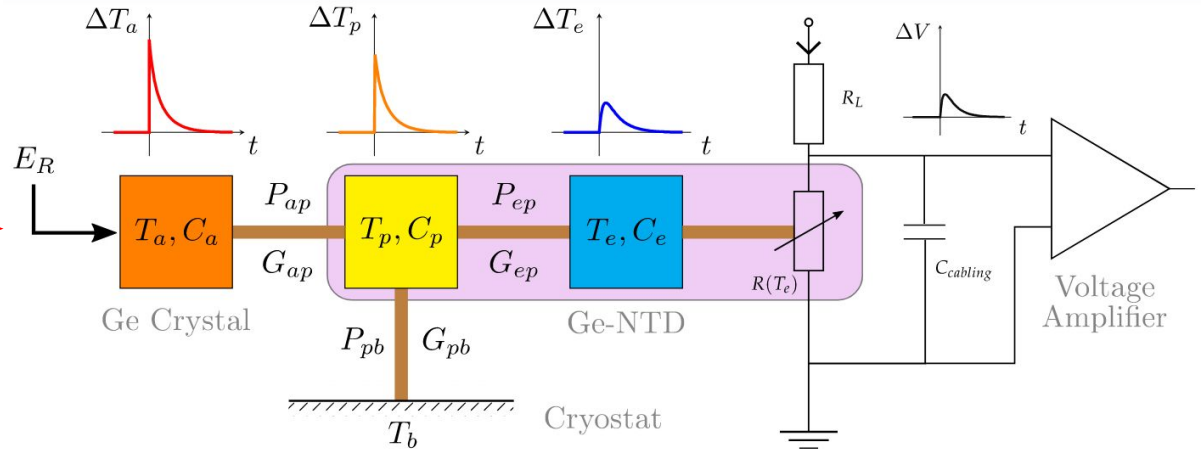
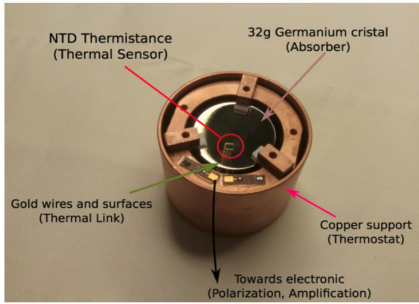


# Modélisation “chaleur”



# Modèle phénoménologique (voie chaleur)

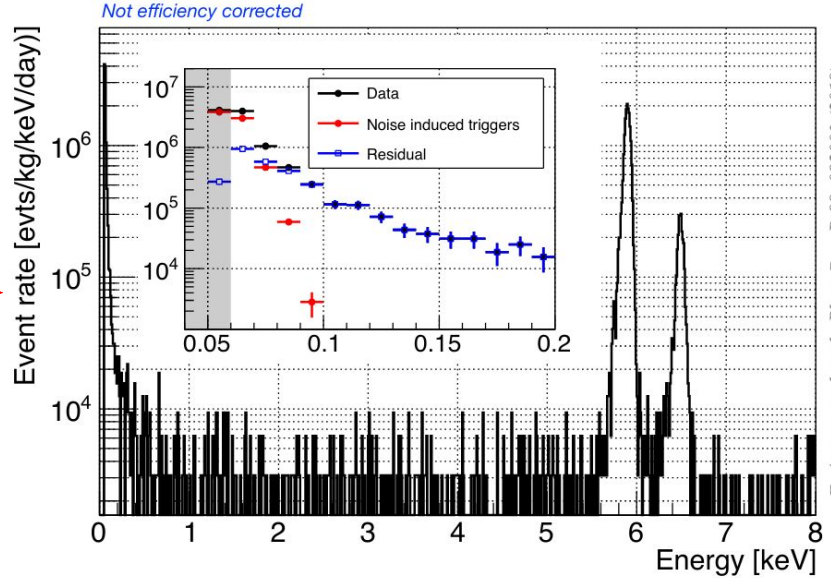
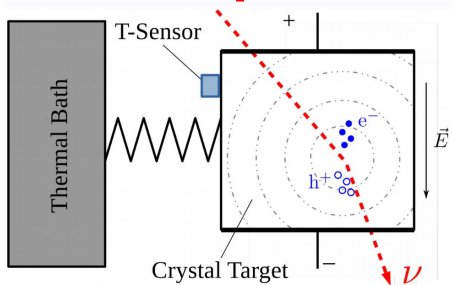
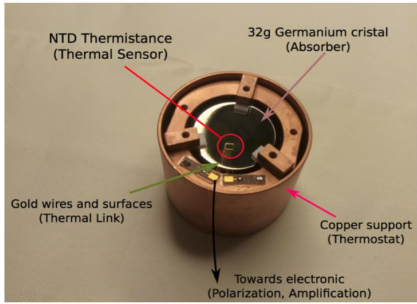
RED20: 17 eV heat, no electrodes



$$\begin{cases}
 C_a \frac{dT_a}{dt} &= g_{glue} S_{NTD} (T_p^{ng} - T_a^{ng}) \\
 C_p \frac{dT_p}{dt} &= -g_{glue} S_{NTD} (T_p^{ng} - T_a^{ng}) + \mathcal{V}_{NTD} g_{ep} (T_e^n - T_p^n) - g_k S_{Au} (T_p^{nk} - T_b^{nk}) \\
 C_e \frac{dT_e}{dt} &= \frac{V^2}{R(T_e)} - \mathcal{V}_{NTD} g_{ep} (T_e^n - T_p^n) \\
 C_{cabling} \frac{dV}{dt} &= \frac{V_B - V}{R_L} - \frac{V}{R(T_e)}
 \end{cases}$$

# Modèle phénoménologique (voie chaleur)

RED20: 17 eV heat, no electrodes



Résolution de 17eV démontrée sur 32g

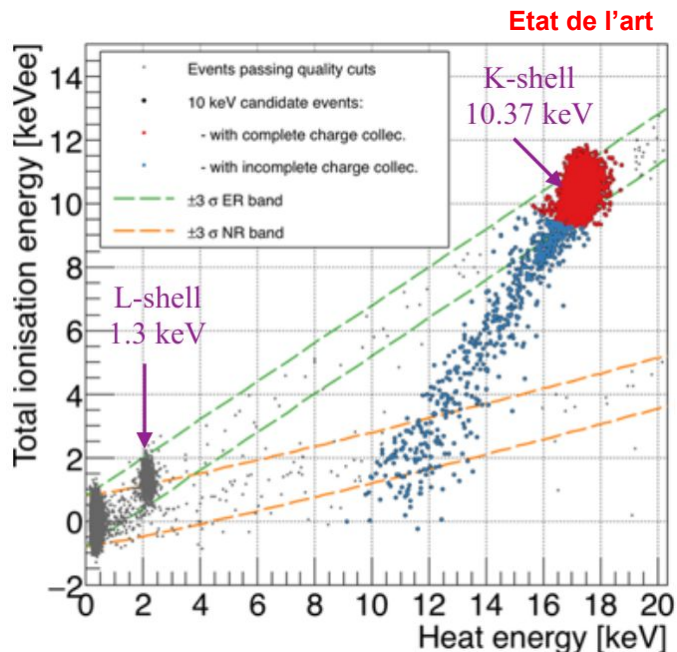
E.Armengaud et al., Phys. Rev. D 99, 082003 (2019)

22eV en moyenne pour 38g

Très proche du cahier des charges de RICOCHET (~10eV)

Et pour l'ionisation ???

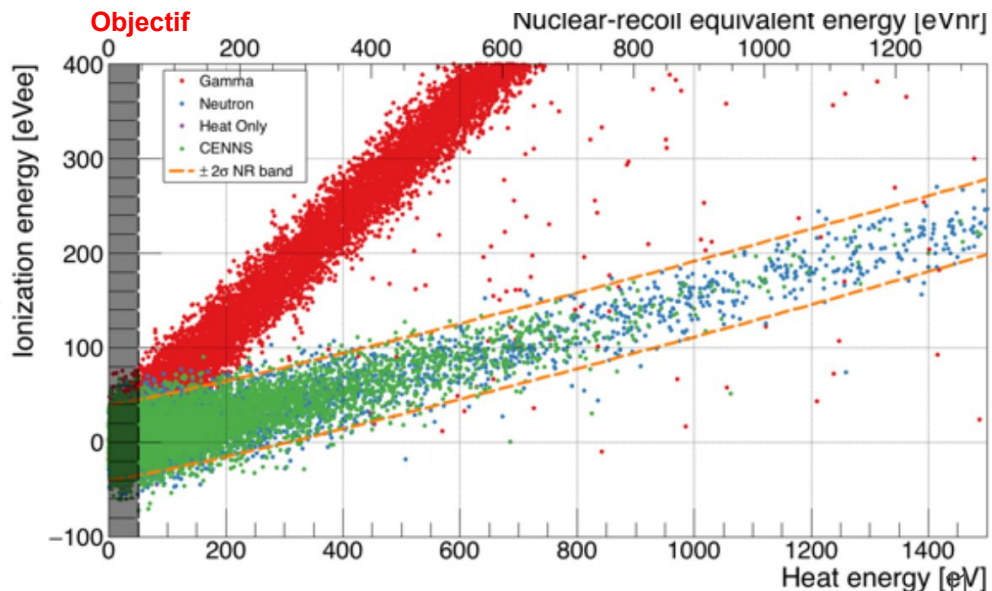
Discrimination ER/NR  
Double mesure chaleur/ionisation  
Limitée à 1keV ...



## Discrimination à 200 eV

Nécessite une résolution ionisation de 20 eV  
Optimisation de la collection de charge.

- 1) Capa < 20pF
- 2) Electronique bas bruit HEMT (A. Juillard, J-B. Filippini)
- 3) Large volume fiduciel
- 4) Rejet des événements de surface (?)



## Discrimination ER/NR

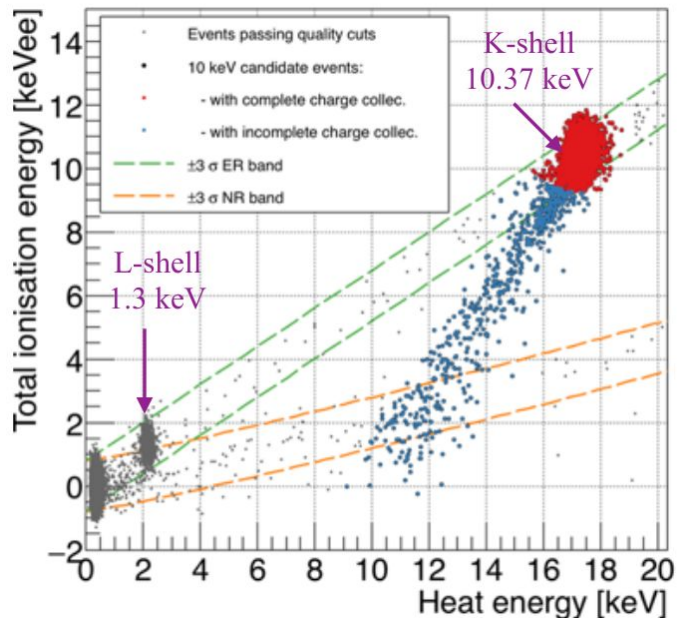
### Double mesure chaleur/ionisation

Limitée à 1keV ...

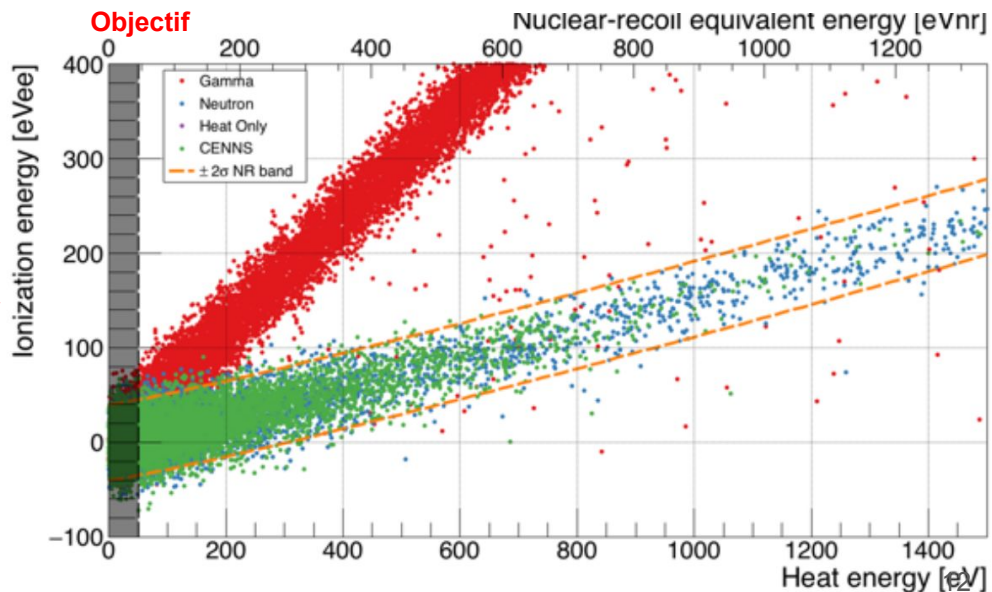
## Simulations COMSOL (Électrostatique)

- ↳ Simulation du design des électrodes
- ↳ Validation avec des données exp.

Etat de l'art



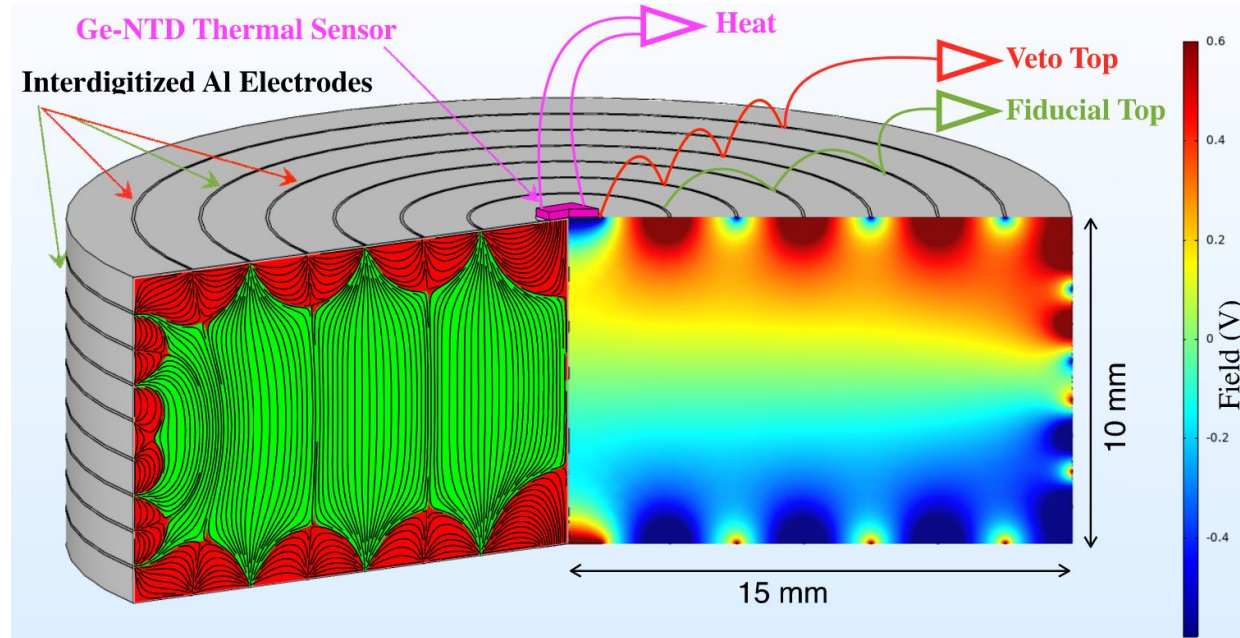
Objectif



# Modélisation des électrodes

### Modèle électrostatique

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot (\epsilon_{0r} \vec{E}) = \rho_f \\ \vec{E} = -\vec{\nabla} V \end{cases}$$

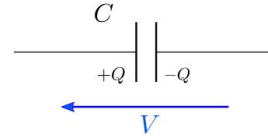


# Modèle de capacité pour les électrodes

## Condensateur simple

↳ C scalaire

$$Q = CV \Leftrightarrow V = \frac{Q}{C}$$



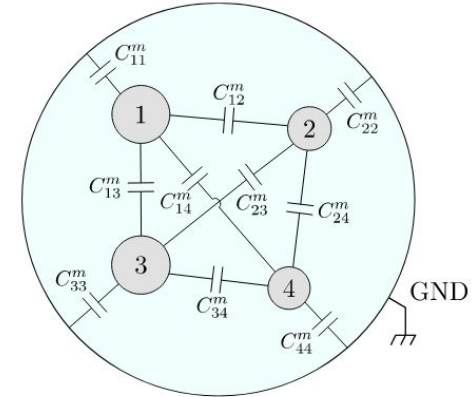
## Détecteur FID

- ↳ 4 électrodes + chassis (GND)
- ↳ Plusieurs potentiels
- ↳ Matrice de capacité de Maxwell C

$$\vec{Q} = \begin{pmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \\ Q_D \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad \vec{V} = \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \end{pmatrix}$$

$$\vec{Q} = C\vec{V} \quad \Leftrightarrow \quad \vec{V} = C^{-1}\vec{Q}$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AC} & C_{AD} \\ C_{BA} & C_{BB} & C_{BC} & C_{BD} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_{CC} & C_{CD} \\ C_{DA} & C_{DB} & C_{DC} & C_{DD} \end{pmatrix}$$



**Lien entre C et C<sub>m</sub>** →  $\begin{cases} \forall i : & C_{ii} = \sum_j C_{ij}^m \\ \forall i \neq j : & C_{ij} = -C_{ij}^m \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \forall i : & C_{ii}^m = \sum_j C_{ij} \\ \forall i \neq j : & C_{ij}^m = -C_{ij} \end{cases}$

# Modèle de capacité pour les électrodes

## Conséquence directe

- ↳ Une charge collectée sur une électrode induit une tension sur toutes les électrodes du détecteur

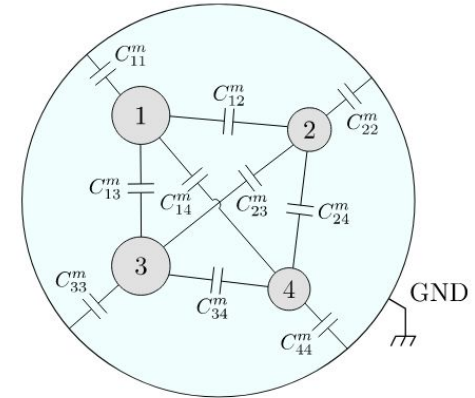
## Détecteur FID

- ↳ 4 électrodes + chassis (GND)
- ↳ Plusieurs potentiels
- ↳ Matrice de capacité de Maxwell C

$$\vec{Q} = \begin{pmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \\ Q_D \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad \vec{V} = \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \end{pmatrix}$$

$$\vec{Q} = C\vec{V} \quad \Leftrightarrow \quad \vec{V} = C^{-1}\vec{Q}$$

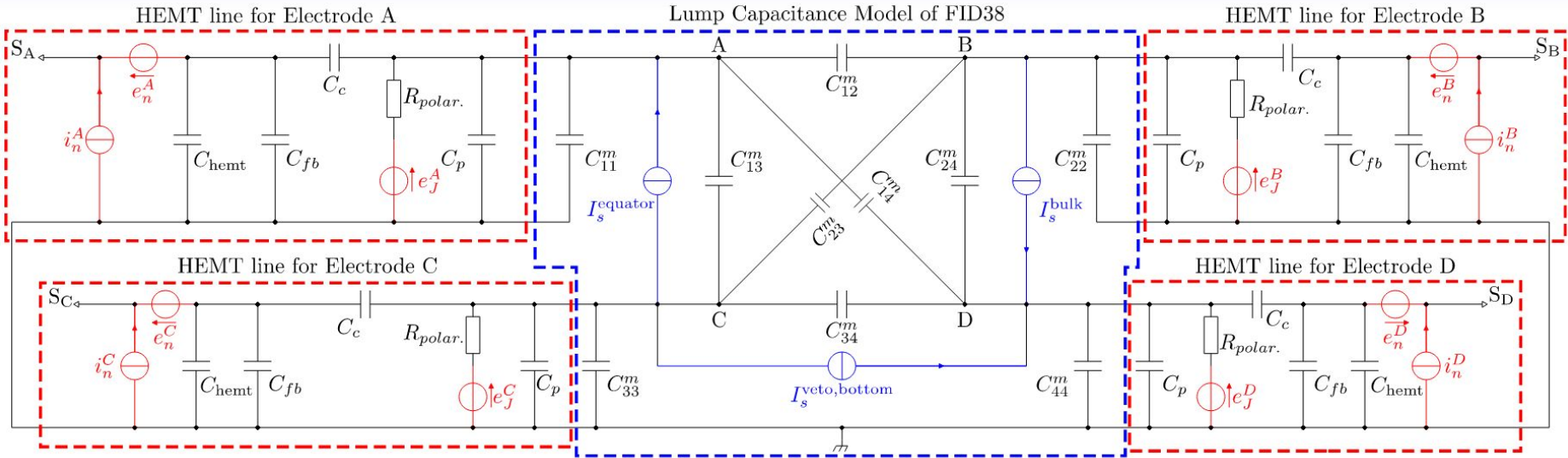
$$C = \begin{pmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AC} & C_{AD} \\ C_{BA} & C_{BB} & C_{BC} & C_{BD} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_{CC} & C_{CD} \\ C_{DA} & C_{DB} & C_{DC} & C_{DD} \end{pmatrix}$$



**Lien entre C et  $C_m$**   $\rightarrow$   $\begin{cases} \forall i : & C_{ii} = \sum_j C_{ij}^m \\ \forall i \neq j : & C_{ij} = -C_{ij}^m \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \forall i : & C_{ii}^m = \sum_j C_{ij} \\ \forall i \neq j : & C_{ij}^m = -C_{ij} \end{cases}$



# Modèle de corrélation des bruit

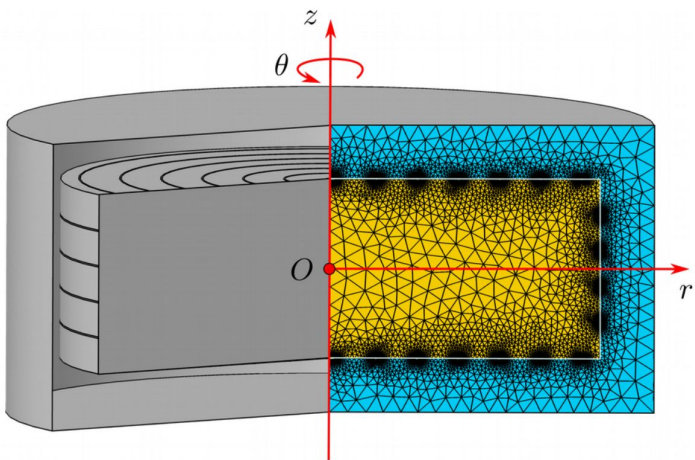


Propagation des bruits réalisée grâce au package Python **Lcapy**

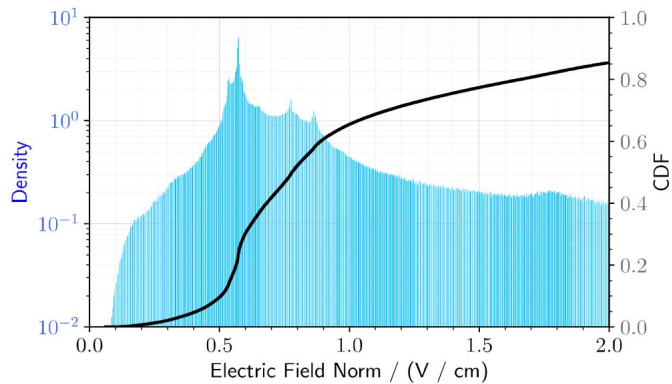
**10 à 20% d'impact sur le bruit total** d'une électrode par rapport à si elle était seule

**Il faut les capacités mutuelles !** → COMSOL nous les donne

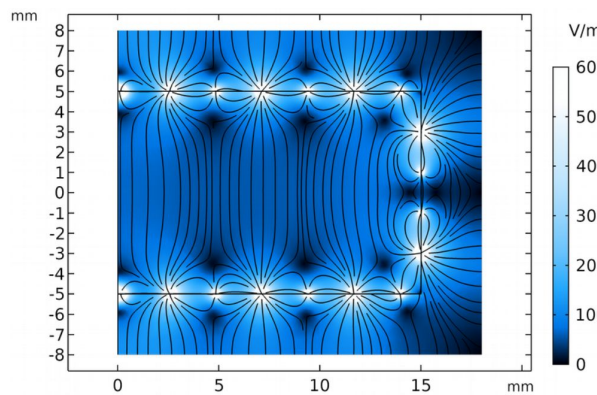
# Simulation et optimisation



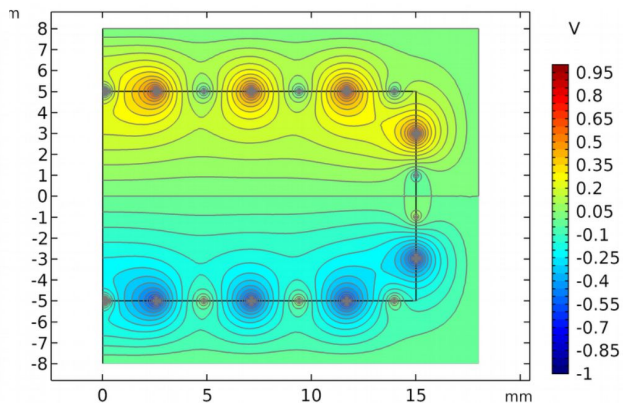
E. field magnitude distribution



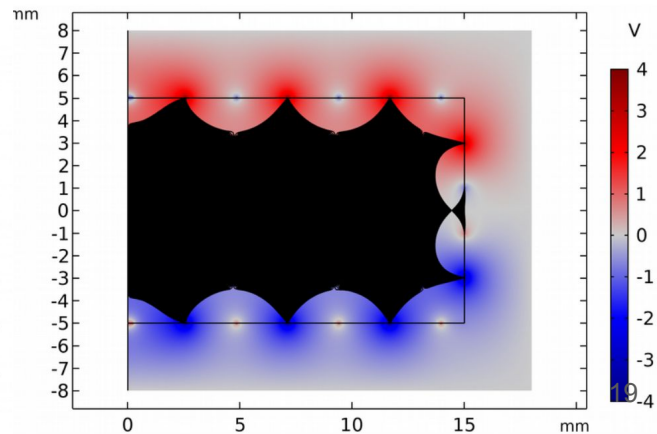
Electric field



Electric potential

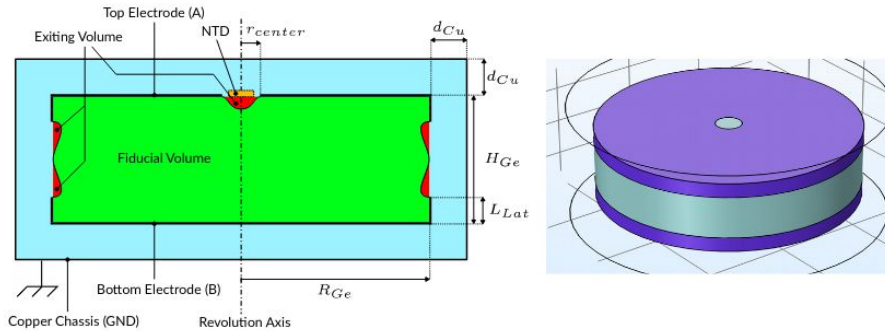


Fiducial Volume



# Deux designs différents : PLanaire et FID

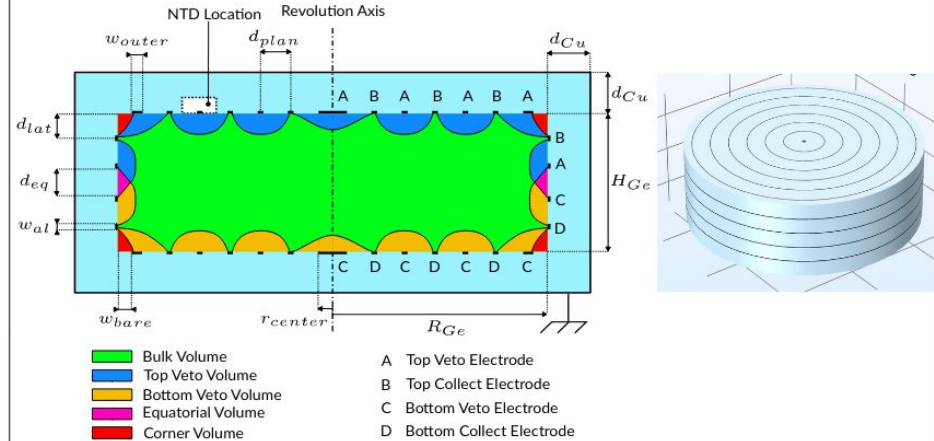
PL38: 2 Planar electrodes extended over the corners on the lateral surface



- ⊕ High fiducial volume
- ⊕ Low capacitance
- ⊖ No surface event rejection

3 Geometry parameters + 2 Polarization parameters

FID38: 4 Fully Interdigitized electrodes



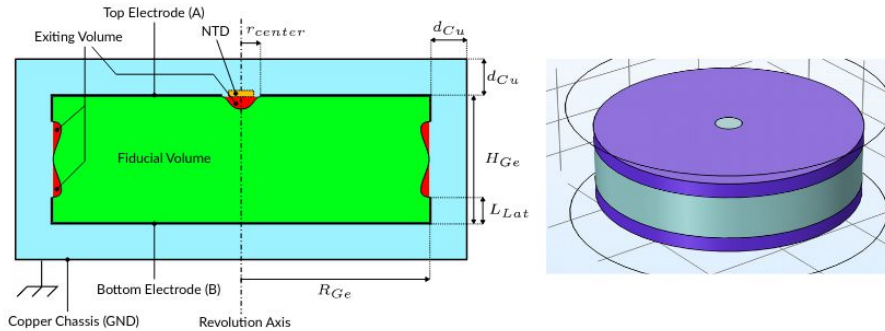
- Bulk Volume
- Top Veto Electrode
- Top Collect Electrode
- Bottom Veto Electrode
- Equatorial Volume
- Bottom Veto Electrode
- Corner Volume
- Bottom Collect Electrode

- ⊖ Lower fiducial volume
- ⊖ Higher capacitance
- ⊕ Rejection of the surface recoils

8 Geometry parameters + 3 Polarization parameters 20

# Deux designs différents : PLanaire et FID

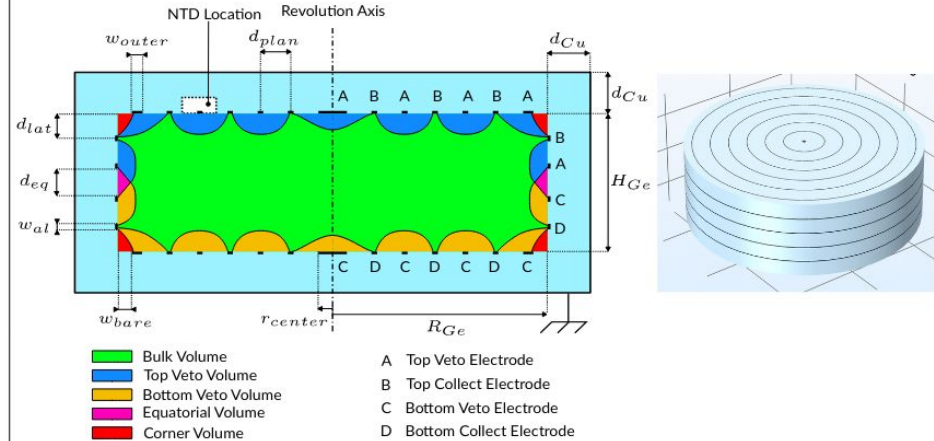
PL38: 2 Planar electrodes extended over the corners on the lateral surface



- ⊕ High fiducial volume
- ⊕ Low capacitance
- ⊖ No surface event rejection

3 Geometry parameters + 2 Polarization parameters

FID38: 4 Fully Interdigitized electrodes



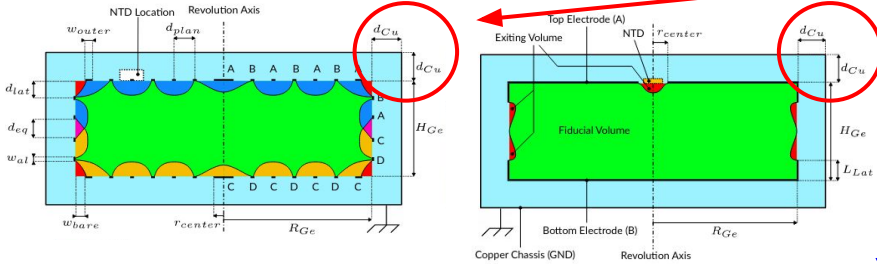
- ⊖ Lower fiducial volume
- ⊖ Higher capacitance
- ⊕ Rejection of the surface recoils

8 Geometry parameters + 3 Polarization parameters 21

# Analyse paramétrique

Exemples

# Effet de la distance au châssis : $d_{Cu}$



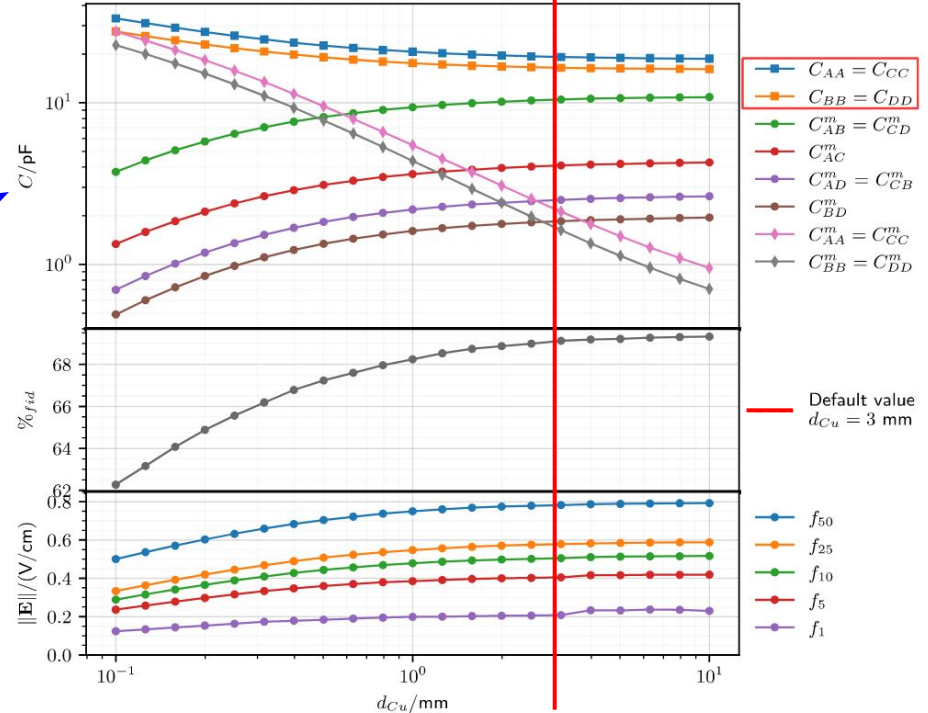
En augmentant la distance  $d_{Cu}$

- ◆ C diminue
- ◆ Le volume fiduciel augmente
- ◆ Champ E plus intense

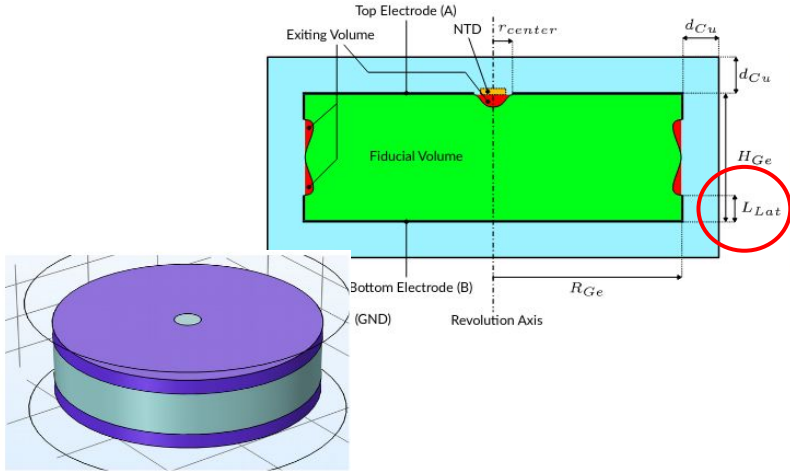
Critère d'optimisation

- ◆ Taille du CRYOCUBE

Valeur retenue :  $d_{Cu} = 3 \text{ mm}$



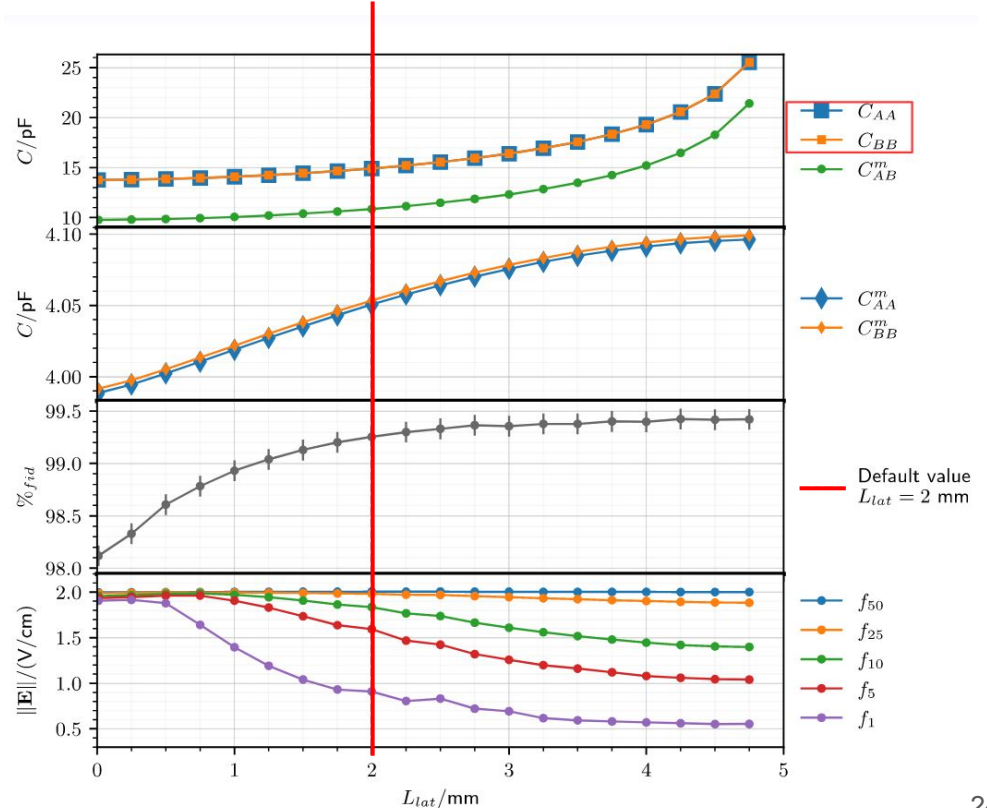
# Effet de la taille du recouvrement latéral : $L_{Lat}$



En augmentant la distance  $L_{Lat}$

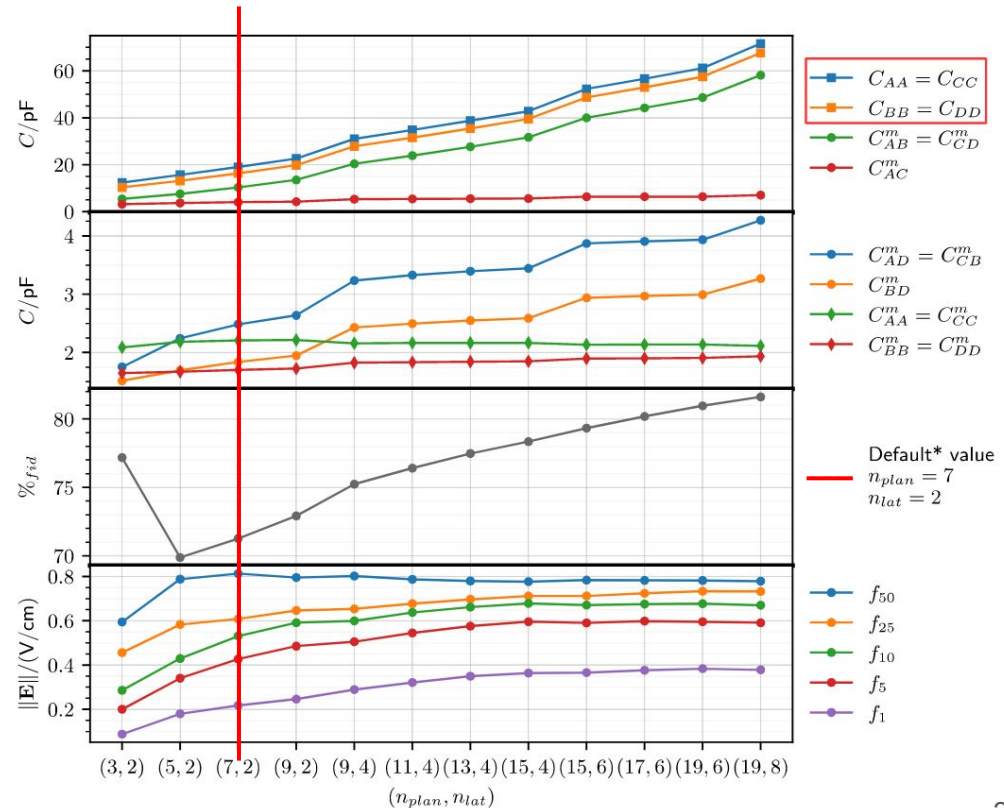
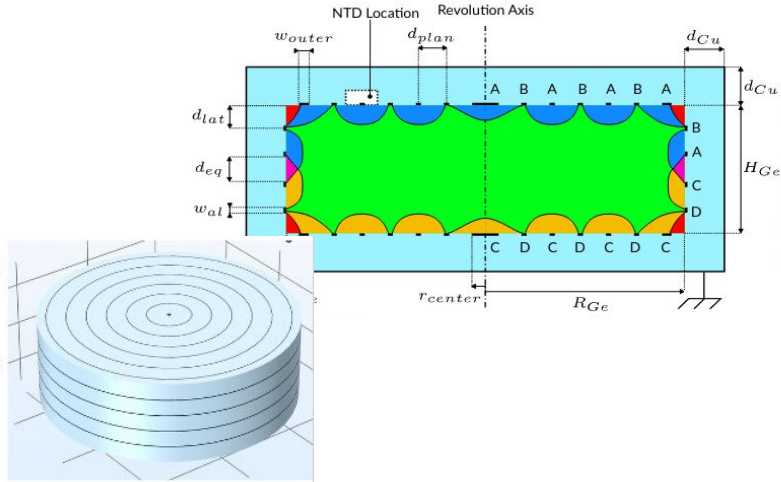
- ◆ C augmente
- ◆ E diminue aux angles
- ◆ Moins de lignes de champs quittent le cristal (meilleure conservation de charge!)

Valeur retenue :  $L_{Lat} = 2 \text{ mm}$





# Effet de la densité d'anneaux : ( $n_{Plan}$ , $n_{Lat}$ )



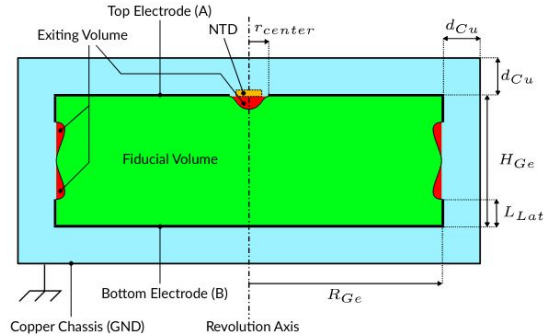
En augmentant le nombre d'anneaux

- ◆ C augmente
- ◆ Volume fiduciel augmente
- ◆ Champ E plus intense (aux bords)

Valeur retenue : ( $n_{Plan}$ ,  $n_{Lat}$ ) = (7, 2)

# Designs optimisés PL38 et FID38

PL38

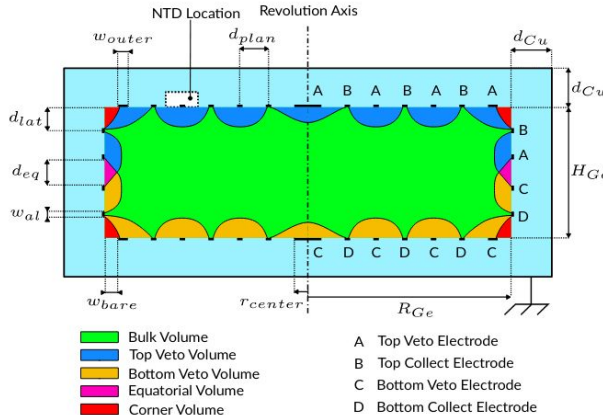


PL38 performances:

- ER/NR discrimination : YES
- Surface event rejection : NO
- Fiducial volume: **99.2%**
- 99% of volume:  $E > 0.9 \text{V/cm}$
- Capacitance matrix terms < 20pF

$$C = \begin{pmatrix} C_{AA} & C_{AB} \\ C_{BA} & C_{BB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 14.92 & -10.86 \\ -10.86 & 14.92 \end{pmatrix} \text{ pF}$$

FID38

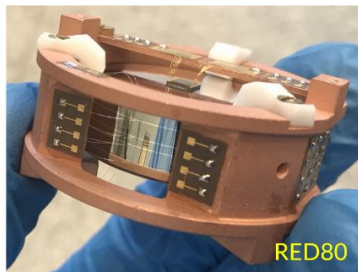


FID38 performances:

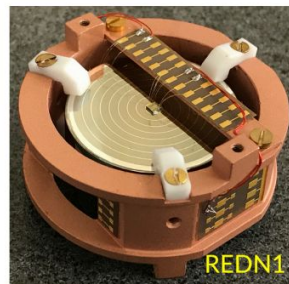
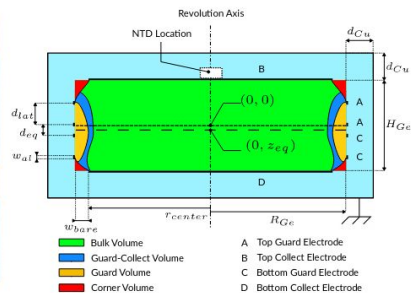
- ER/NR discrimination : YES
- Surface event rejection : YES
- Fiducial volume: **70%**
- 99% of volume:  $E > 0.2 \text{V/cm}$
- Capacitance matrix terms < 20pF

$$C = \begin{pmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AC} & C_{AD} \\ C_{BA} & C_{BB} & C_{BC} & C_{BD} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_{CC} & C_{CD} \\ C_{DA} & C_{DB} & C_{DC} & C_{DD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 18.25 & -10.19 & -4.02 & -2.58 \\ -10.19 & 15.94 & -2.58 & -1.98 \\ -4.02 & -2.58 & 18.25 & -10.19 \\ -2.58 & -1.98 & -10.19 & 15.94 \end{pmatrix} \text{ pF}$$

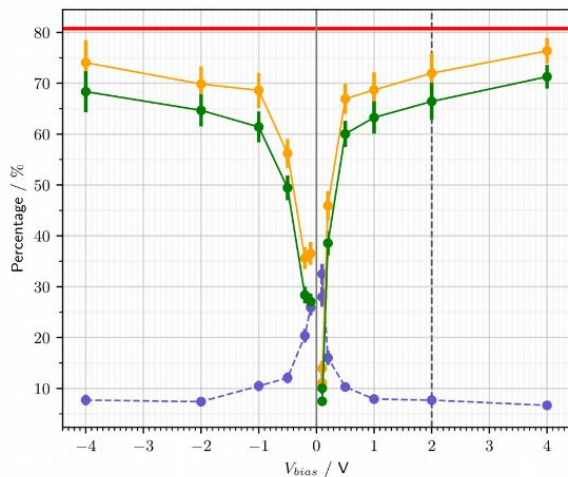
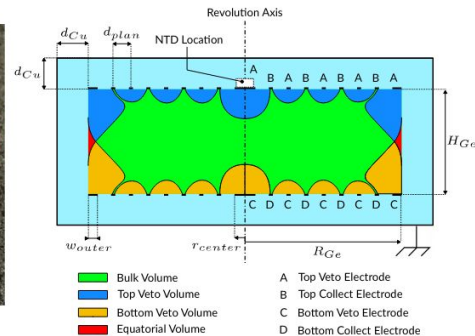
# Confrontation expériences / simulations



RED80



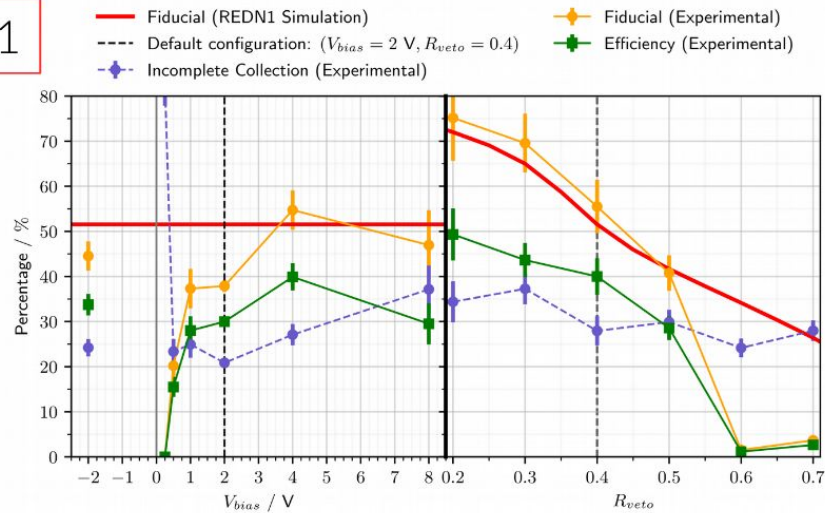
REDN1



RED80

- Fiducial (RED80 Simulation)
- - - Default configuration: ( $V_{bias} = 2 V$ )
- - - Incomplete collection (Experimental)
- Fiducial (Experimental)
- Efficiency (Experimental)

REDN1



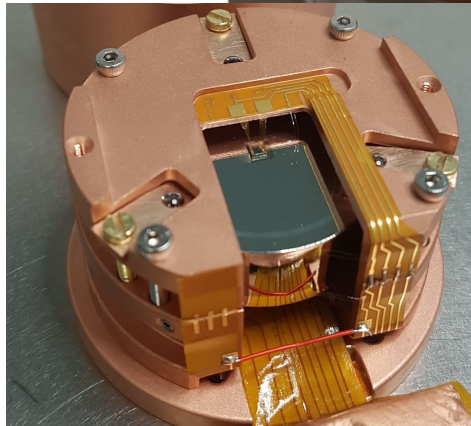
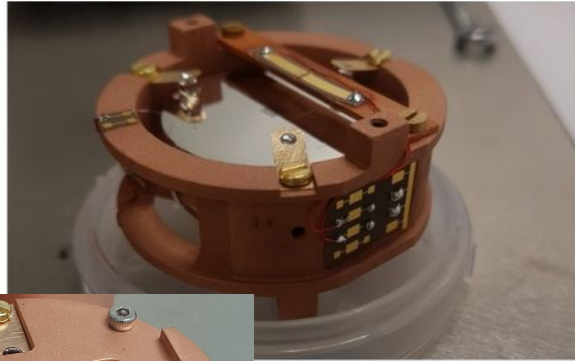
- Fiducial (REDN1 Simulation)
- - - Default configuration: ( $V_{bias} = 2 V$ ;  $R_{veto} = 0.4$ )
- - - Incomplete Collection (Experimental)
- Fiducial (Experimental)
- Efficiency (Experimental)

# Résultats des designs optimisés

PL38

RED120

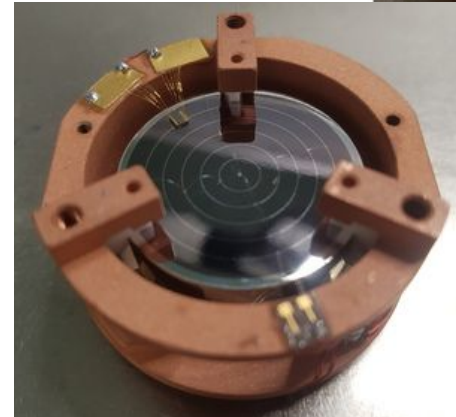
RED130



FID38

RED140

RED150



Analyse en cours ... résultats prévus pour le workshop LTD19, Juillet 2021

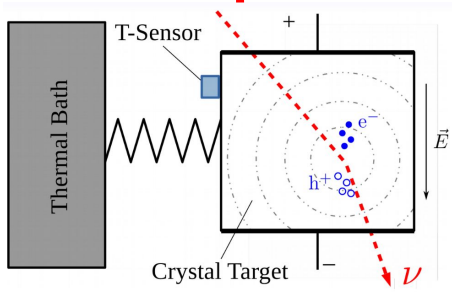
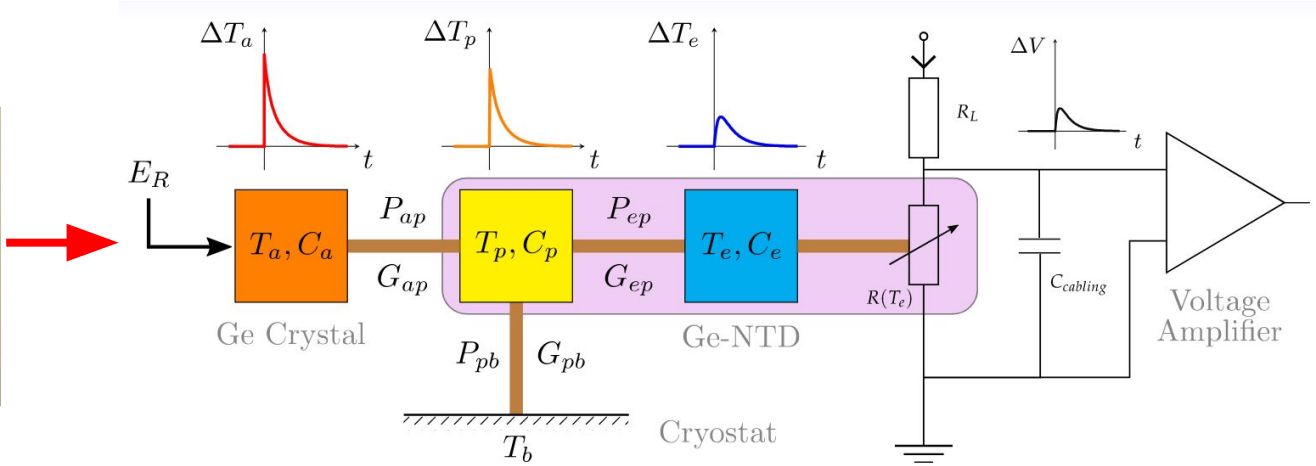
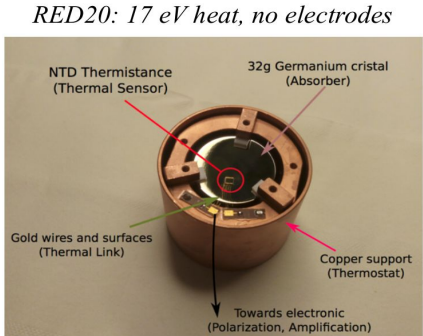
# Conclusion

- Les simulations COMSOL sont devenues indispensables pour la caractérisation et la modélisation de nos détecteurs.
- Elles ont permis de fabriquer différents designs optimisés pour nos besoins scientifiques.
- Les premières mesures expérimentales sont en accord avec les simulations.
- Les designs optimisés sont en cours d'analyse.

Merci de votre attention

Avez-vous des questions ?

# Modèle phénoménologique (voie chaleur)



## 3 "modes" de résolutions

Bonne compréhension des phénomènes !

### Etat stationnaire

- ◆  $R_0$  et  $T_0$  du NTD
- ◆ Liens thermiques ( $G_{pb}$ ,  $G_{ep}$ )
- ◆ Courant de polarisation optimal

### Régime perturbatif

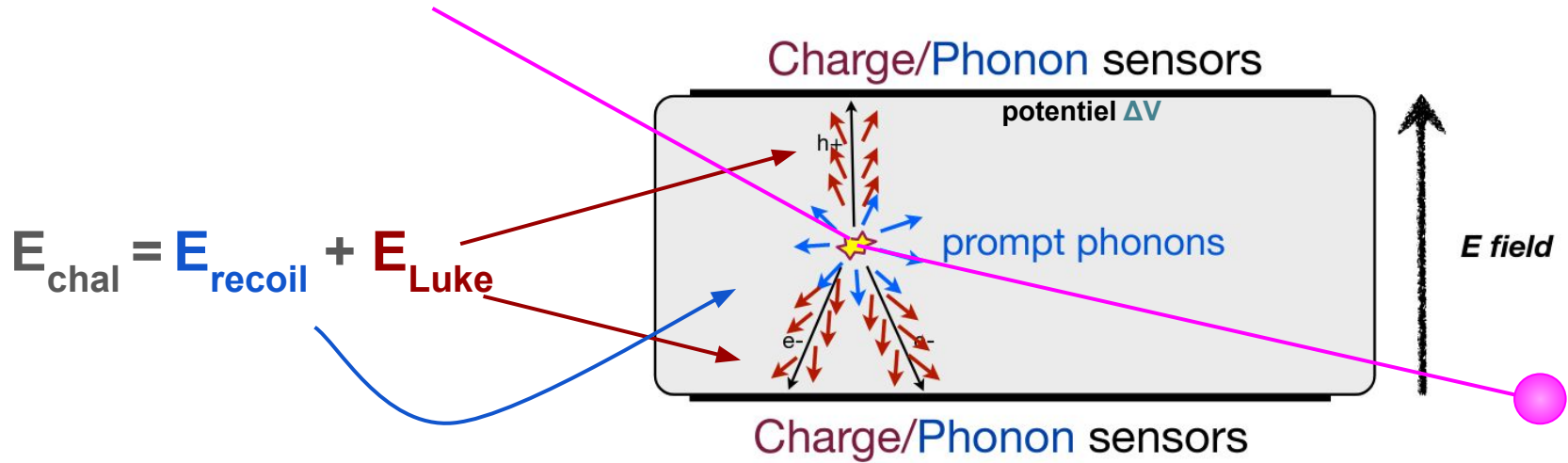
- ◆ Réponse temporelle
- ◆ Forme des pulses

### Espace des fréquences

- ◆ Modèles de bruit (TFN, Johnson..)



L'effet Luke-Neganov : les charges produisent des phonons.



$E_{\text{Luke}}$  peut être vu comme la contribution d'un "effet joule" des charges accélérées dans le cristal

# Bilan voie chaleur

→ Bonne compréhension phénoménologique !

→ Prototype RED20

- ◆ Résolution = 17eV
- ◆ EDELWEISS-Surf
- ◆ Calibration avec  $^{55}\text{Fe}$

