



# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

## Détection $\gamma$ par effet Cerenkov dans le détecteur CaLIPSO :

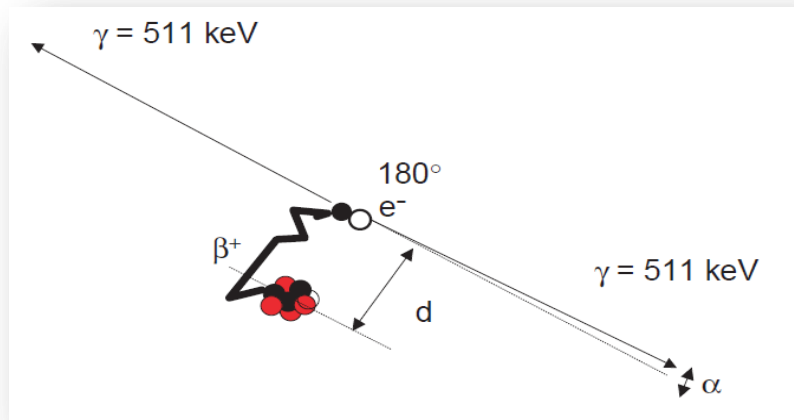
## Préparation, étude et optimisation d'un Démonstrateur Optique

Emilie RAMOS  
Journées doctorants IRFU  
2 juillet 2013

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

## Un détecteur pour l'imagerie TEP

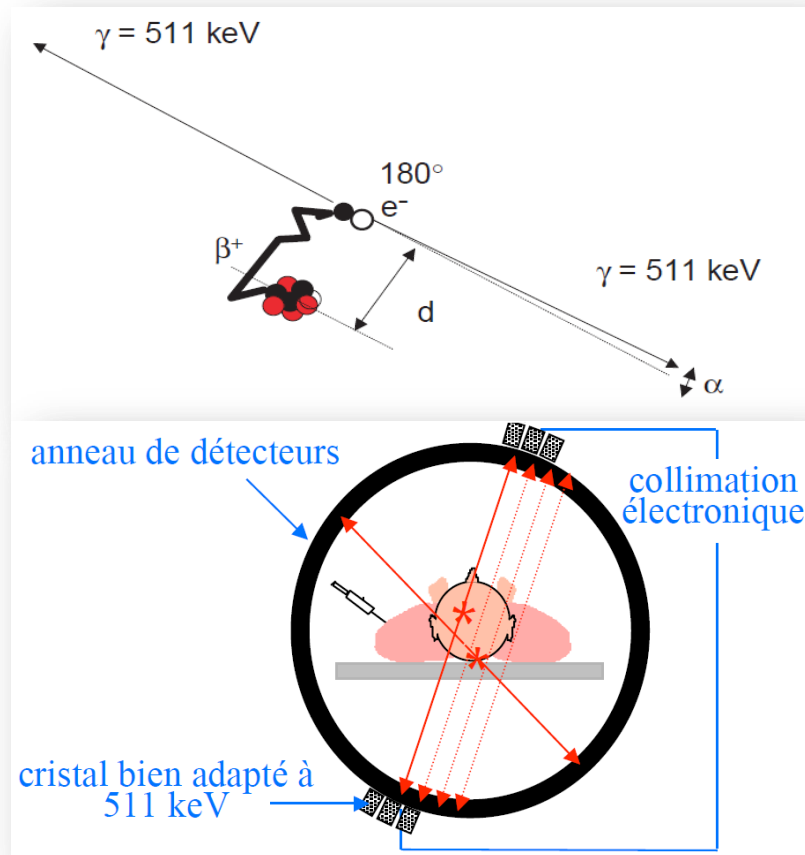


1. Injection radio-traceur ( $^{18}\text{F}$ FDG,  $^{18}\text{F}$ -choline)  $\rightarrow$  fixation sur cellules d'intérêt  
Emission  $\beta^+$  parcours 0,5 mm  $\rightarrow$  annihilation  
 $\Rightarrow$  2 gammas de 511 keV à  $\approx 180^\circ$

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

## Un détecteur pour l'imagerie TEP



2. Détection des gammas en coïncidence grâce à un anneau de détecteurs.

Millions de lignes de réponse / s

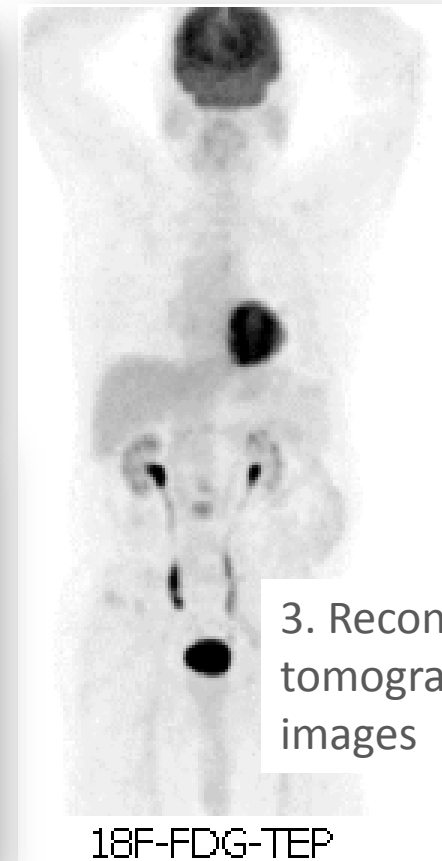
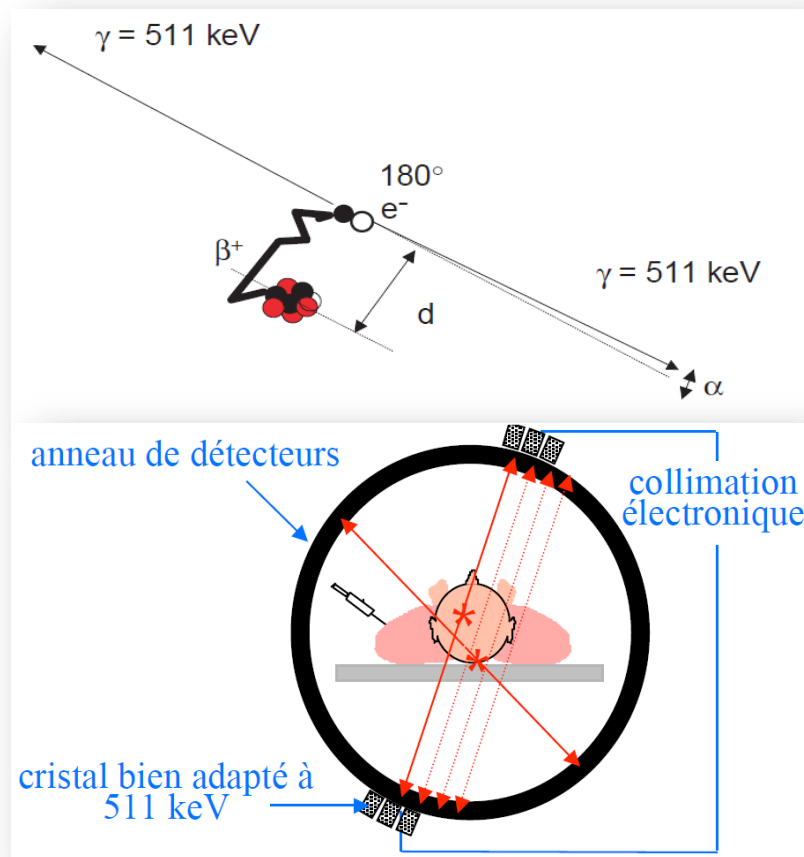
⇒ Points de croisement

= zones d'activité

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

## Un détecteur pour l'imagerie TEP





# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

## I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO

- a) Principe du détecteur
- b) Intérêt en imagerie TEP
- c) Enjeux technologiques

## II. Propriétés optiques du TMBi

## III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique

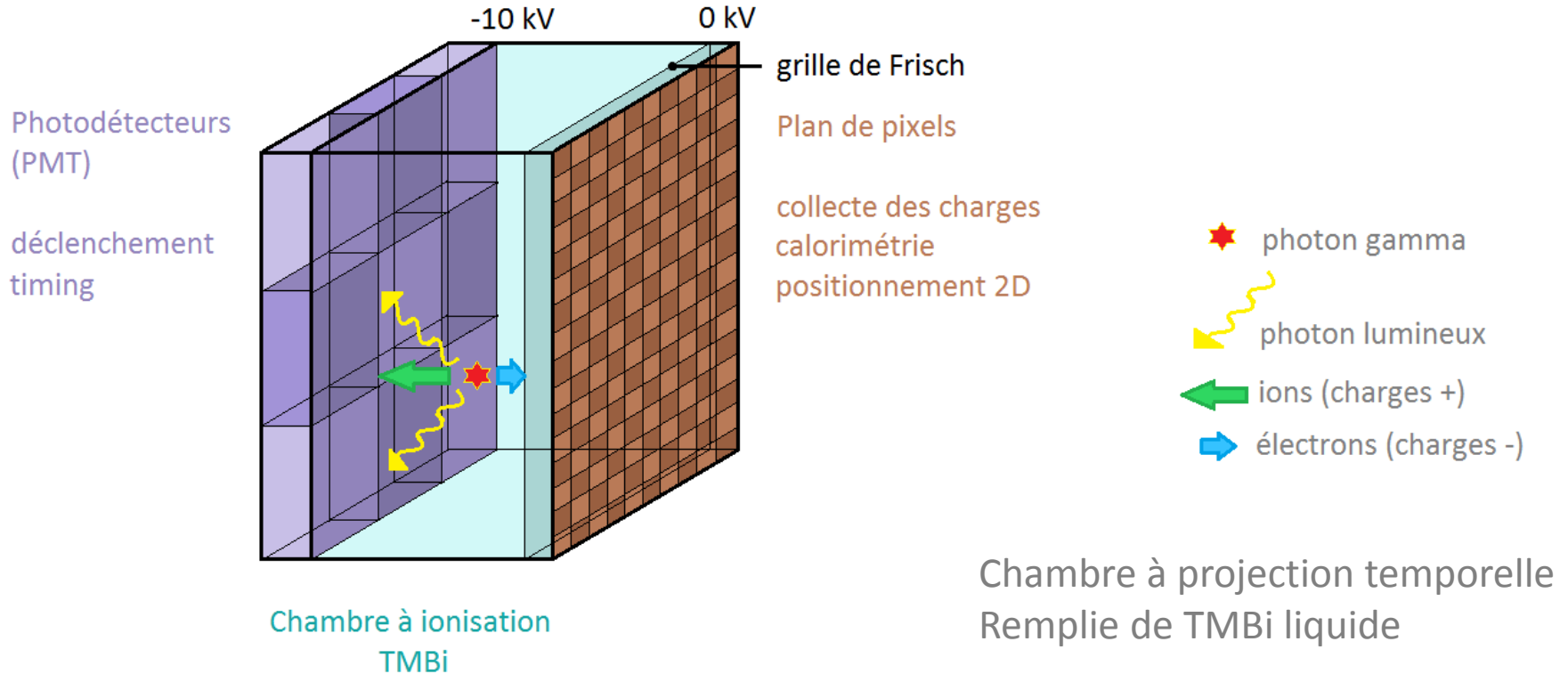
## IV. Voies d'optimisation

## V. Futur démonstrateur optique optimisé

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Principe du détecteur





# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

## I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO

- a) Principe du détecteur
- b) Intérêt en imagerie TEP**
- c) Enjeux technologiques

## II. Propriétés optiques du TMBi

## III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique

## IV. Voies d'optimisation

## V. Futur démonstrateur optique optimisé



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Intérêt en imagerie TEP

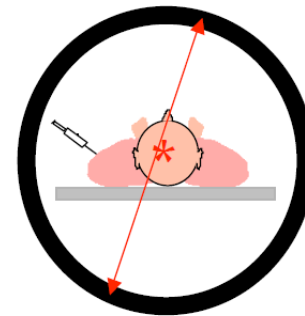
caractéristiques	LSO	CdTE	Xénon Liquide	TMBi
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)	95% (5cm)	95% (10cm)	85% (5cm)
Rapport photoélectrique	30%	15%	21%	<b>47%</b> Bi : Z = 83 !
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 ns optimisé	< 1 ns	<b>375 ps à optimiser</b>
Résolution énergie (FWHM)	15%	1%	5%	<10%
Localisation des interactions (Résolution spatiale)	1 cm 0.2 cm fraction	0,8 mm pixels	0,2 mm calculés	<b>0,2 mm calculés</b>
Utilisateur	Facile	Facile	Difficile (cryogénie)	<b>Facile</b>

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Intérêt en imagerie TEP

caractéristiques	LSO	CdTE	Xénon Liquide	TMBi
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)	95% (5cm)	95% (10cm)	85% (5cm)
Rapport photoélectrique	30%	15%	21%	<b>47%</b> Bi : Z = 83 !
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 ns op		<b>375 ps à optimiser</b>
Résolution énergie (FWHM)	15%	1		<10%
Localisation des interactions (Résolution spatiale)	1 cm 0.2 cm fraction	0,8 mm		<b>0,2 mm calculés</b>
Utilisateur	Facile	Fac		<b>Facile</b>



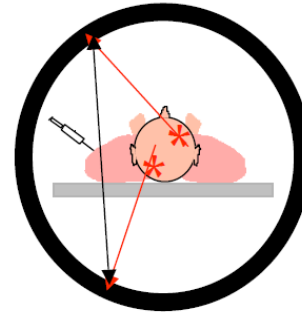
coïncidences vraies  
 ⇒ bien localisés sur la ligne de projection  
 ⇒ information utile

# CaLIPSO

Calorimètre Liquide Ionisation Positif

ganométallique

## • Intérêt en imagerie TEP



coïncidences fortuites

- ⇒ mauvaise localisation
- ⇒ réduction des capacités de comptage
- ⇒ biais quantitatif

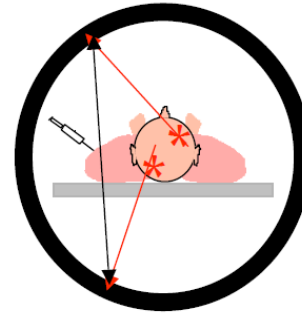
caractéristiques	LSO			TMBi
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)			85% (5cm)
Rapport photoélectrique	30%			47% Bi : Z = 83 !
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 ns optimisé	< 1 ns	375 ps à optimiser
Résolution énergie (FWHM)	15%	1%	5%	<10%
Localisation des interactions (Résolution spatiale)	1 cm 0.2 cm fraction	0,8 mm pixels	0,2 mm calculés	0,2 mm calculés
Utilisateur	Facile	Facile	Difficile (cryogénie)	Facile

# CaLIPSO

Calorimètre Liquide Ionisation Positif

## • Intérêt en imagerie TEP

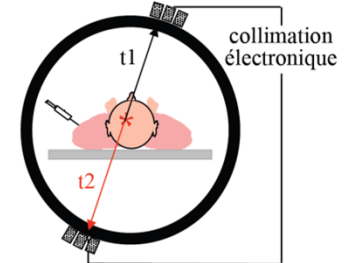
caractéristiques	LSO			
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)			
Rapport photoélectrique	30%			
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 ns optimisé	< 1 ns	375 ps à optimiser
Résolution énergie (FWHM)	15%	1%	5%	<10%
Localisation des interactions (Résolution spatiale)	1 cm 0.2 cm fraction	0,8 mm pixels	0,2 mm calculés	0,2 mm calculés
Utilisateur	Facile	Facile	Difficile (cryogénie)	Facile



coïncidences fortuites

- ⇒ mauvaise localisation
- ⇒ réduction des capacités de comptage
- ⇒ biais quantitatif

ganométallique



mesure de  $t_2 - t_1$

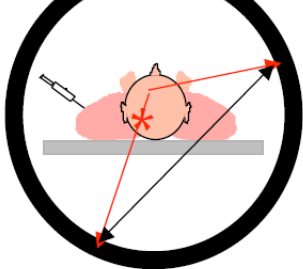
estimation directe de la position de l'annihilation sur la ligne de projection

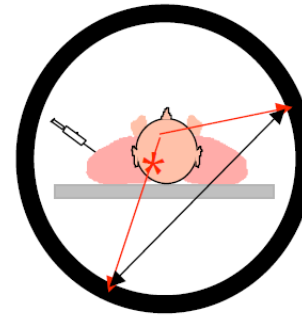
Bi :  $Z = 83$  !

# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Intérêt en imagerie TEP

caractéristiques	LSO	<div><p>coïncidences diffusées</p><ul style="list-style-type: none"><li>⇒ mauvaise localisation</li><li>⇒ diminution du contraste</li><li>⇒ biais quantitatif</li></ul></div>			TMBi
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)	9	85% (5cm)		
Rapport photoélectrique	30%		47%		
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 r	Bi : Z = 83 !		
Résolution énergie (FWHM)	15%	1%	5%	<10%	
Localisation des interactions (Résolution spatiale)	1 cm 0.2 cm fraction	0,8 mm pixels	0,2 mm calculés	0,2 mm calculés	
Utilisateur	Facile	Facile	Difficile (cryogénie)	Facile	



coïncidences diffusées

- ⇒ mauvaise localisation
- ⇒ diminution du contraste
- ⇒ biais quantitatif

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Intérêt en imagerie TEP

caractéristiques	LSO	CdTE	Xénon Liquide	TMBi
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)	95% (5cm)	95% (10cm)	85% (5cm)
Rapport photoélectrique	30%	15%	21%	<b>47%</b> Bi : Z = 83 !
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 ns optimisé	< 1 ns	<b>375 ps à optimiser</b>
Résolution énergie (FWHM)	15%	1%	5%	<10%
Localisation des interactions (Résolution spatiale)	1 cm 0.2 cm fraction	0,8 mm pixels	0,2 mm calculés	<b>0,2 mm calculés</b>
Utilisateur	Facile	Facile	Difficile (cryogénie)	<b>Facile</b>

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Intérêt en imagerie TEP

caractéristiques	LSO	CdTE	Xénon Liquide	TMBi
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)	95% (5cm)	95% (10cm)	85% (5cm)
Rapport photoélectrique	30%	15%	21%	<b>47%</b> Bi : Z = 83 !
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 ns optimisé	< 1 ns	<b>375 ps à optimiser</b>
Résolution énergie (FWHM)	15%	1%	5%	<10%
Localisation des interactions (Résolution spatiale)	1 cm 0.2 cm fraction	0,8 mm pixels	0,2 mm calculés	<b>0,2 mm calculés</b>
Utilisateur	Facile	Facile	Difficile (cryogénie)	<b>Facile</b>



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

## I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO

- a) Principe du détecteur
- b) Intérêt en imagerie TEP
- c) **Enjeux technologiques**

## II. Propriétés optiques du TMBi

## III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique

## IV. Voies d'optimisation

## V. Futur démonstrateur optique optimisé



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Enjeux technologiques
  - Ultra-vide, ultra-propreté, ultra-purification





# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Enjeux technologiques
    - Ultra-vide, ultra-propreté, ultra-purification
    - TMBi réactif avec tous matériaux oxydants
    - TMBi méconnu car jamais utilisé dans un détecteur
    - Pas de scintillation : effet Cerenkov
- ⇒ **Très peu de lumière !**



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
  - a) Indice de réfraction
  - b) Coefficient d'absorption
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

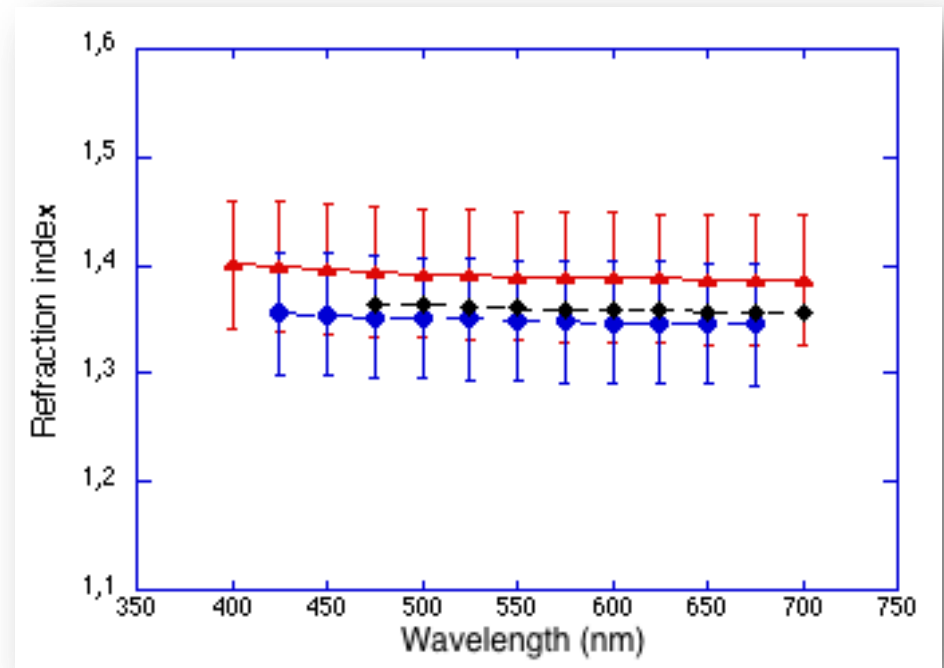
# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- indice de réfraction



Daniel Desforge  
Emilie Ramos



Mesure au goniomètre

Cellules prismatiques étanches

Test sur l'acétone avec 2 cuves différentes

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- indice de réfraction



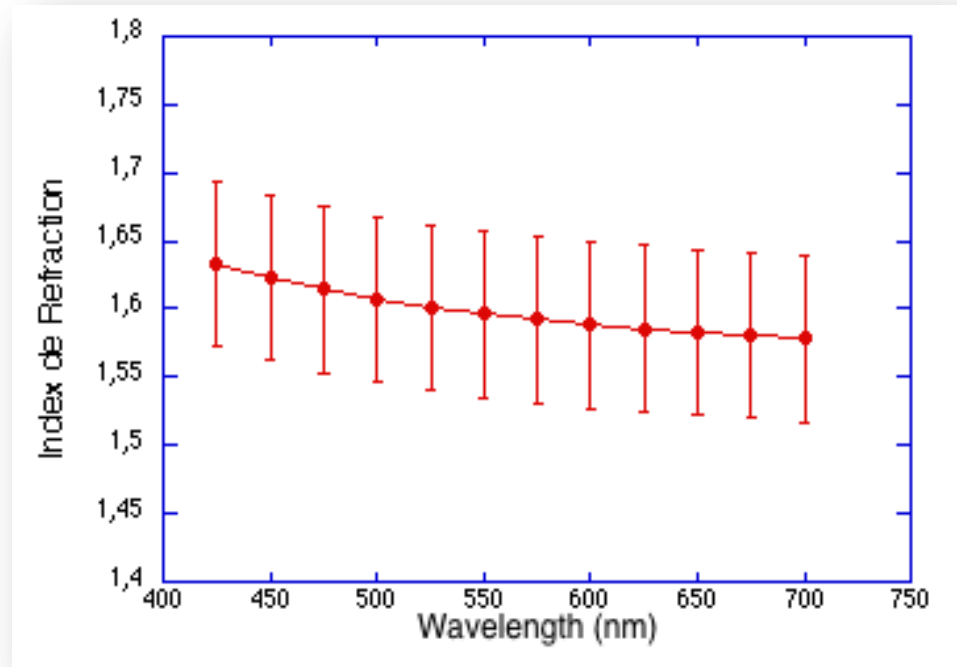
Daniel Desforge  
Emilie Ramos

Erreurs :  
géométrie  
de la cuve

Mesure au goniomètre

Cellules prismatiques étanches

Mesure sur le TMBi





# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
  - a) Indice de réfraction
  - b) Coefficient d'absorption**
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

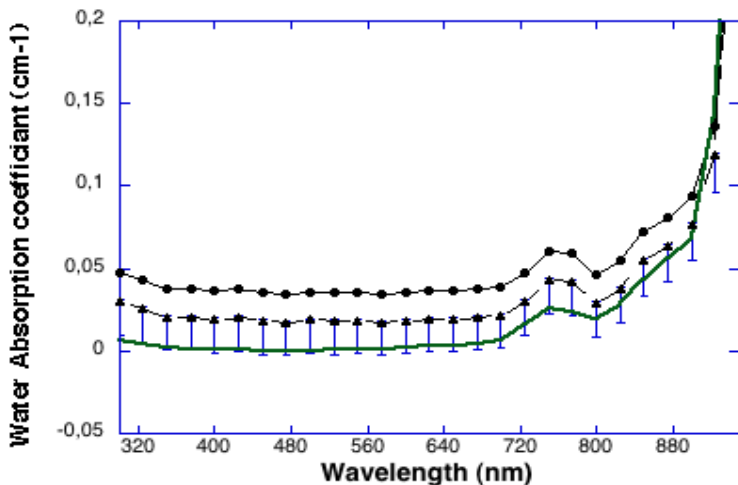
- longueur d'absorption

Cuves en verre à faces parallèles étanches

Tenir compte des différentes pertes lumineuses:

- Absorption dans le verre
- Réflexions de Fresnel à toutes les interfaces

Test avec de l'eau



- \* sans compter l'abs du verre
- \* en comptant l'abs du verre
- \* référence

→ pertes de lumière 2%



# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

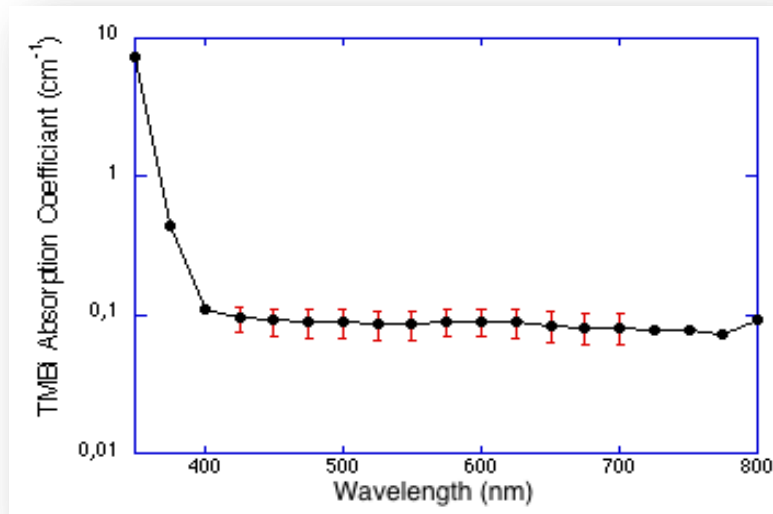
- longueur d'absorption

Cuves en verre à faces parallèles étanches

Tenir compte des différentes pertes lumineuses:

- Absorption dans le verre
- Réflexions de Fresnel à toutes les interfaces

Mesure sur le TMBi



erreurs dominées par  
l'incertitude sur les pertes  
de lumière







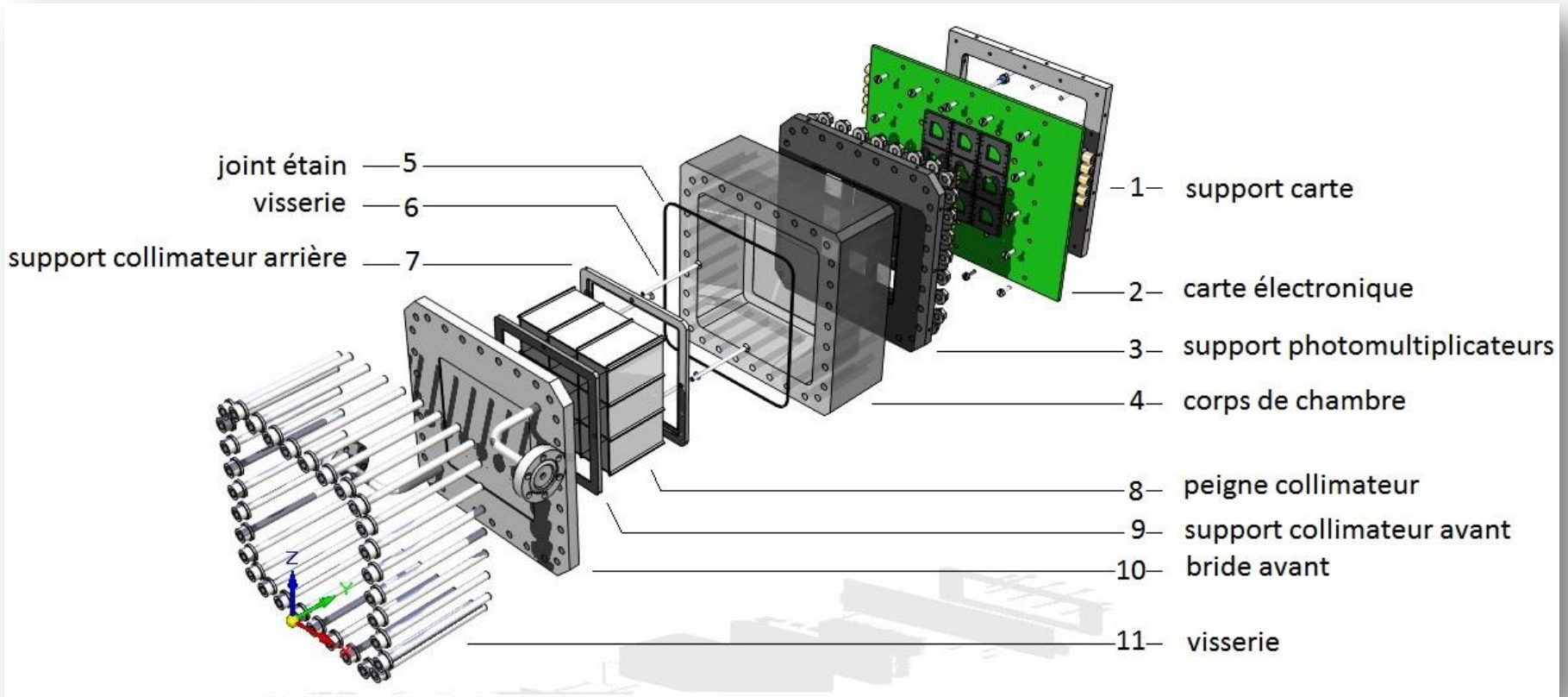
# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
  - a) Plans et montage
  - b) Efficacité et résolution en temps
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



Dessins Jean-Philippe Mols

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



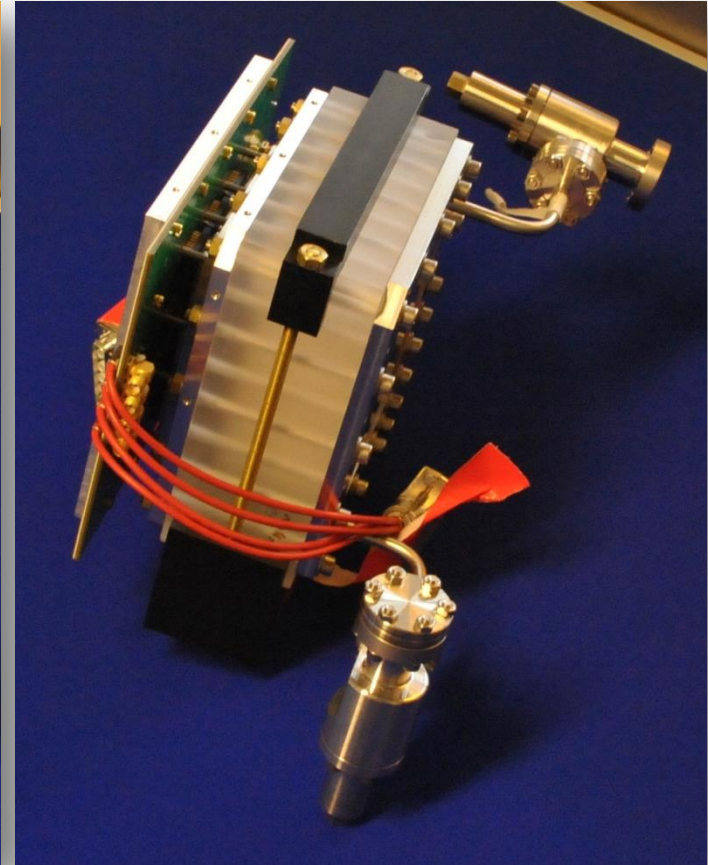
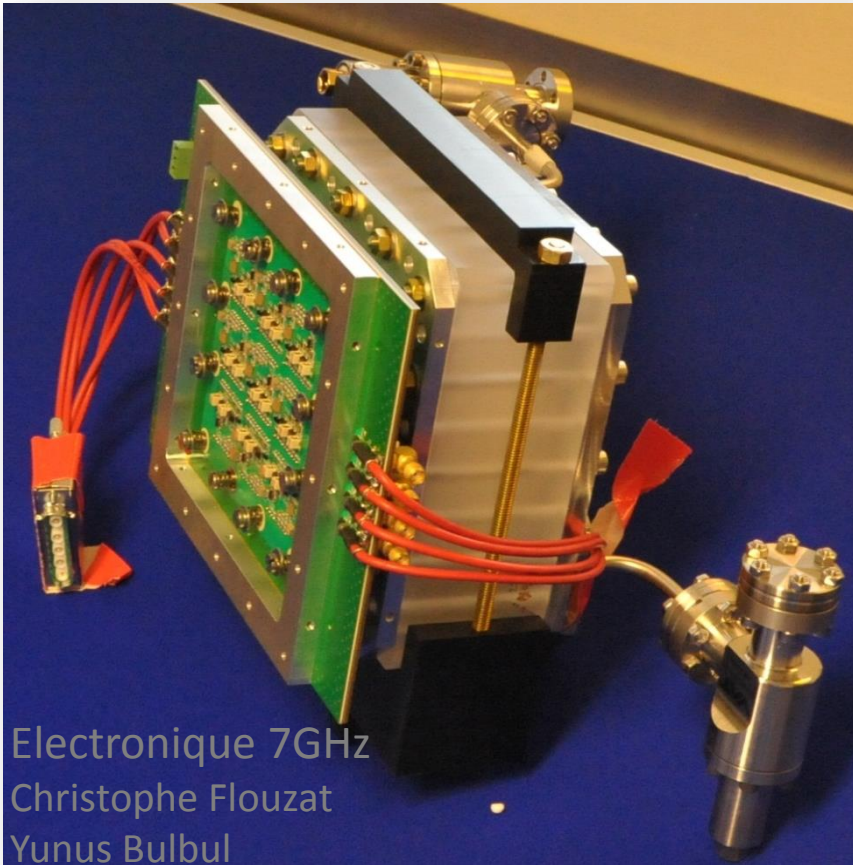
Pierre Starzynski  
Emilie Ramos

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



# CaLIPSO

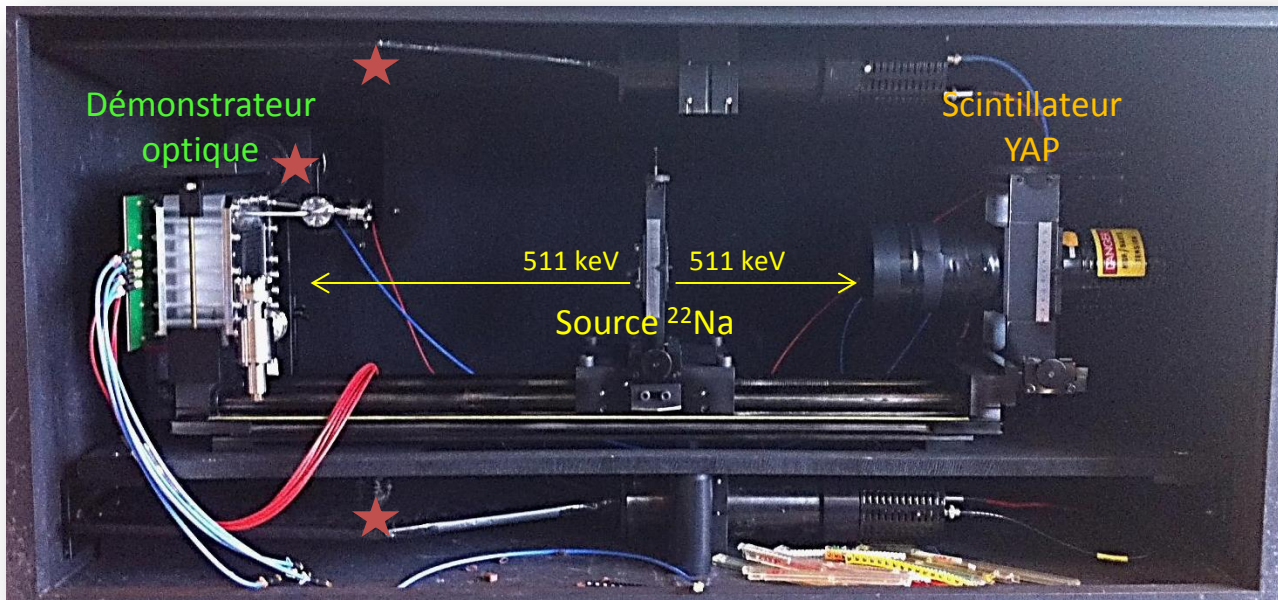
**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
  - a) Plans et montage
  - b) Efficacité et résolution en temps**
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Démonstrateur intégré au banc de mesure



★ 3 raquettes PMTs  
(tag cosmiques)

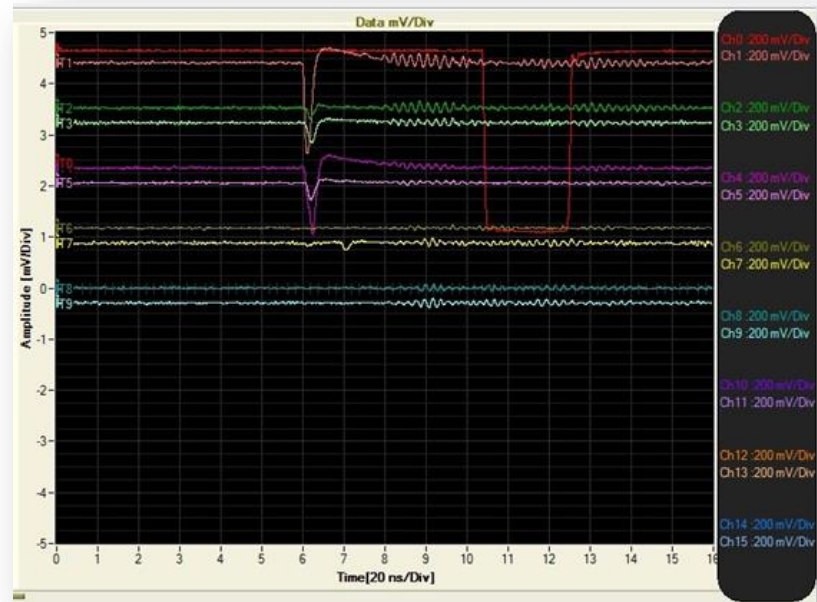
- Voir déclenchement de plusieurs cellules sur un signal fort (cosmiques)
- Évaluer efficacité de déclenchement du démonstrateur

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Démonstrateur intégré au banc de mesure

- Visualisation déclenchement de plusieurs cellules sur un signal fort (cosmiques) →
- Validation du principe de déclenchement sur un 511 keV Cerenkov (1<sup>ère</sup> mondiale)
- Mesures préliminaires de l'efficacité de déclenchement et de la résolution en temps du démonstrateur

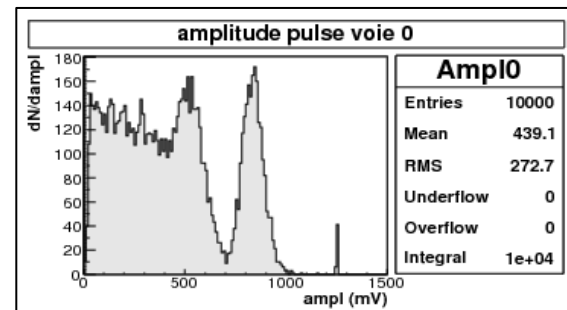
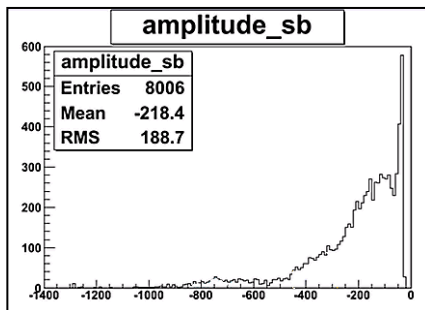




# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Remplacement de la source de  $^{22}\text{Na}$  par du  $^{18}\text{F}$   
 $\Rightarrow$  Pas d'émission  $\gamma$  parasite à 1,3 MeV
- Nouveaux détecteurs YAP optimisés (cristaux plus petits, meilleur rendement de scintillation, meilleurs couplages optiques)  
 $\Rightarrow$  Meilleure résolution en temps et en énergie (sélection des 511 keV)







# CaLIPSO

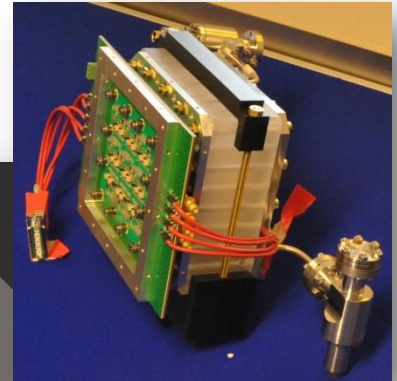
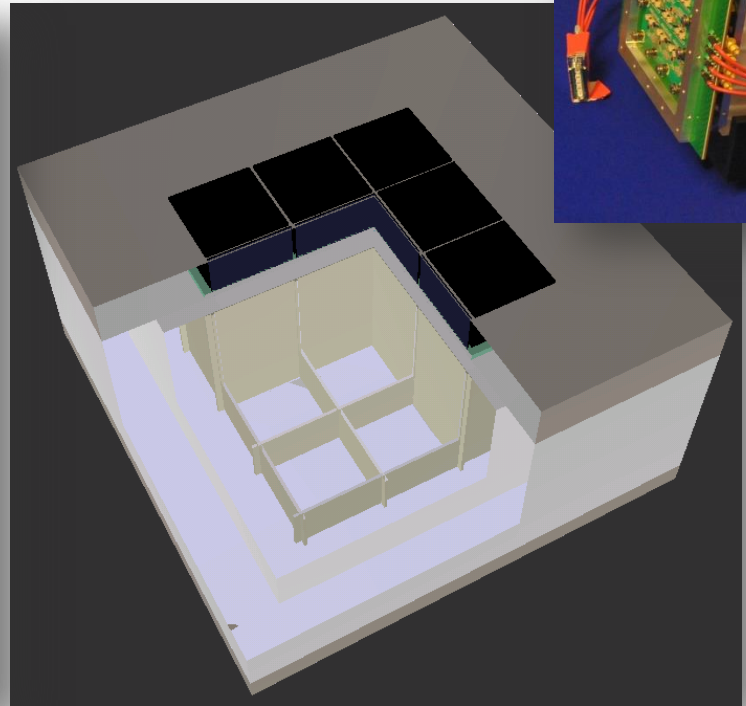
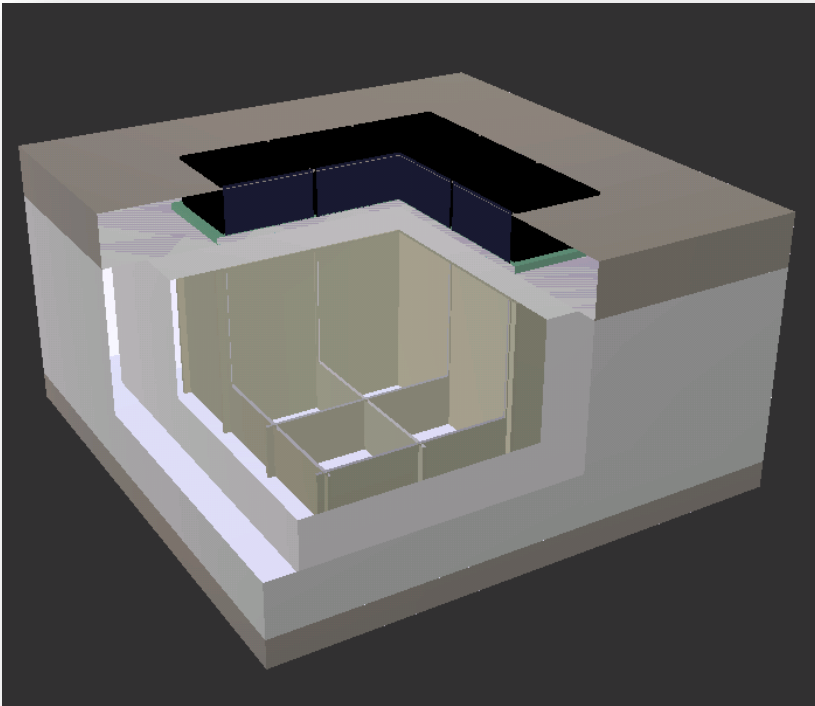
**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
  - a) **Simulation Monte Carlo du démonstrateur**
  - b) Optimisations pour améliorer la collection de lumière
  - c) Résolution en temps attendue
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

# CaLIPSO

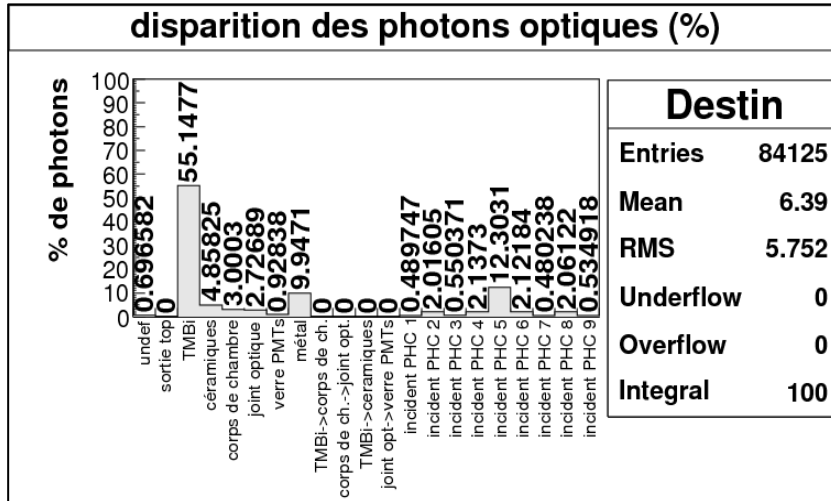
**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Géométrie du démonstrateur optique dans Geant4



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



Devenir des photons lumineux

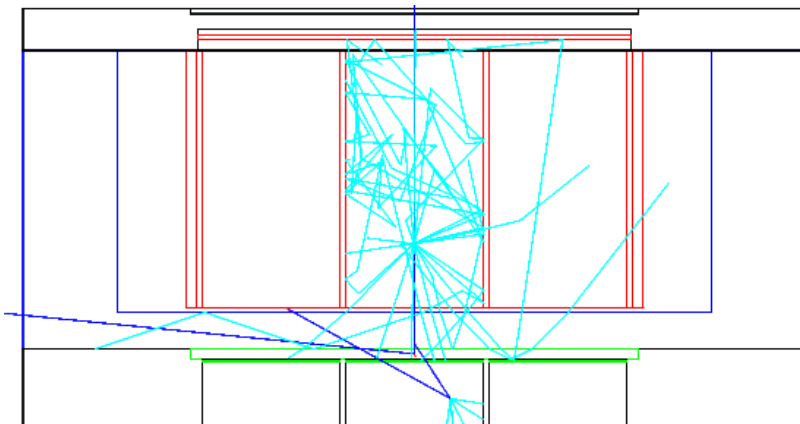
**55% auto-absorption**

**Diaphonie 76%**

⇒ 12% incidents photocathode voie 5

Efficacité globale de détection des gamma

**12,1%** (seuil de détection 1 photoélectron)



Géométrie initiale du démonstrateur optique



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
  - a) Simulation Monte Carlo du démonstrateur
  - b) Optimisations pour améliorer la collection de lumière**
  - c) Résolution en temps attendue
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

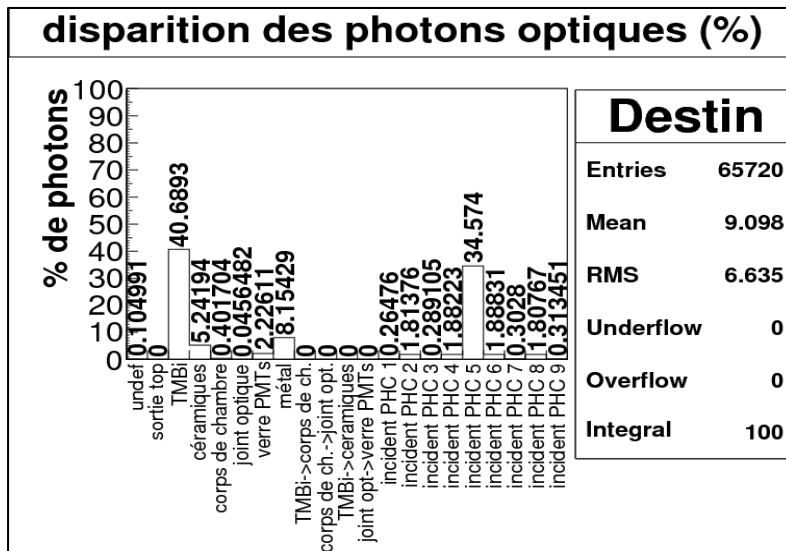
- Voies d'optimisation :

Modifications	DO version 1	DO version 2 optimisé
Joint optique	Épaisseur 2 mm $n = 1,41$	Épaisseur 10 $\mu\text{m}$ $n = 1,55$
Verre du corps de chambre	BK7 $n = 1,5$	Saphir $N = 1,75$
Épaisseur de la fenêtre	7 mm	2 mm
PMTs	R11265-100	R11265-200 Meilleure DQE
Épaisseur du détecteur	5 cm de TMBi	3 cm de TMBi $\Rightarrow$ Diminution de l'auto-absorption

# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Efficacité attendue :



Devenir des photons lumineux

55% auto-absorption → 41%

Diaphonie 76% → 24%

12% incidents photocathode voie 5 → 35%

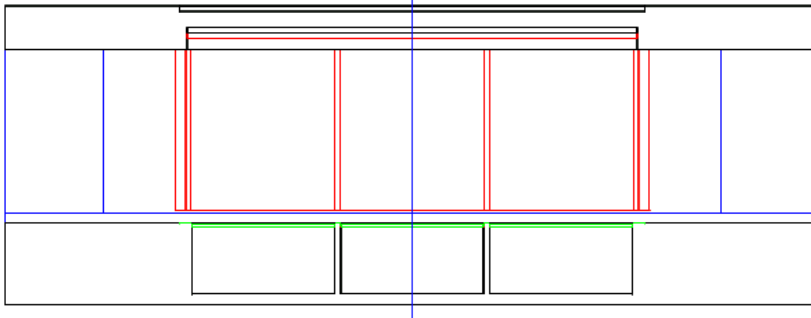
⇒ Efficacité de collection de lumière x3

Efficacité **globale** de détection des gamma

12,1% (seuil de détection 1 photoélectron)

→ 25%

⇒ Efficacité **globale** x2

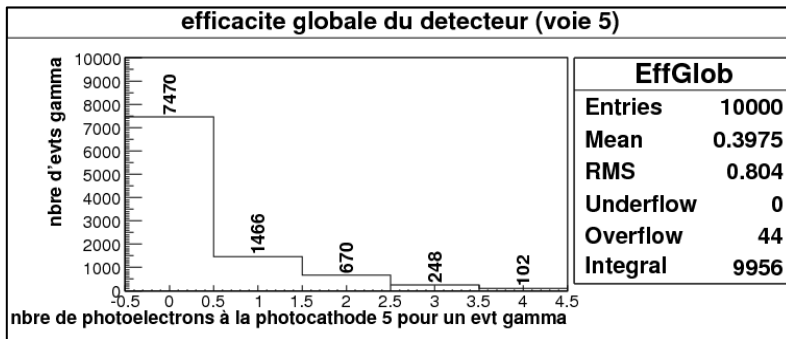


Géométrie optimisée 3cm du démonstrateur optique (v10)

# CaLIPSO

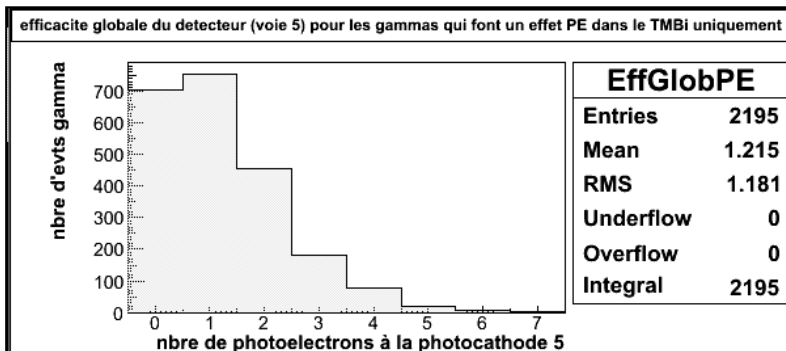
**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Efficacité attendue :



Efficacité **globale** de détection des gamma  
12,1% (seuil de détection 1<sup>er</sup> photoélectron)

→ 25%



MAIS processus d'intérêt = effet photoélectrique

Efficacité de détection des gamma sur l'effet  
photoélectrique (seuil de détection 1<sup>er</sup> photoélectron)

→ 68%



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

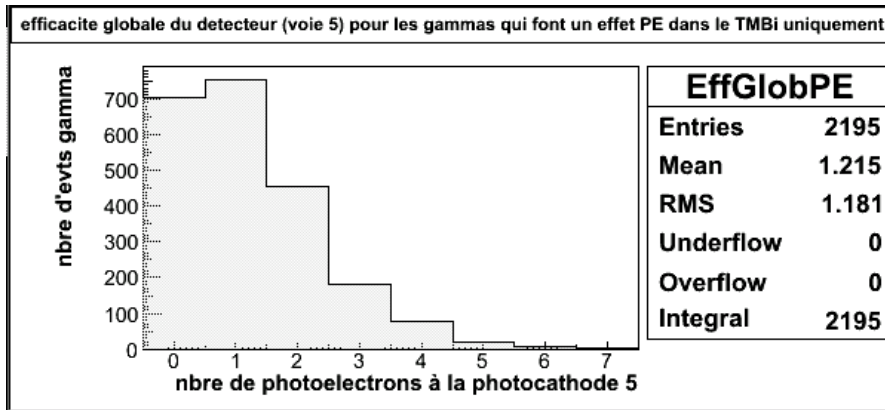
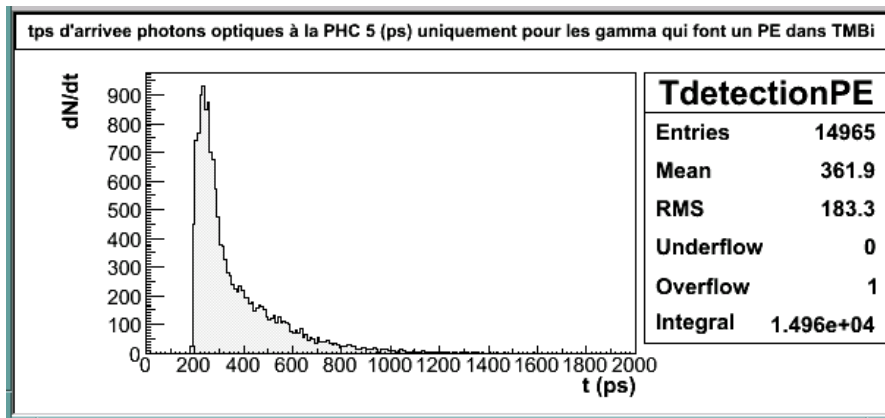
- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
  - a) Simulation Monte Carlo du démonstrateur
  - b) Optimisations pour améliorer la collection de lumière
  - c) **Résolution en temps attendue**
- V. Futur démonstrateur optique optimisé



# CaLIPSO

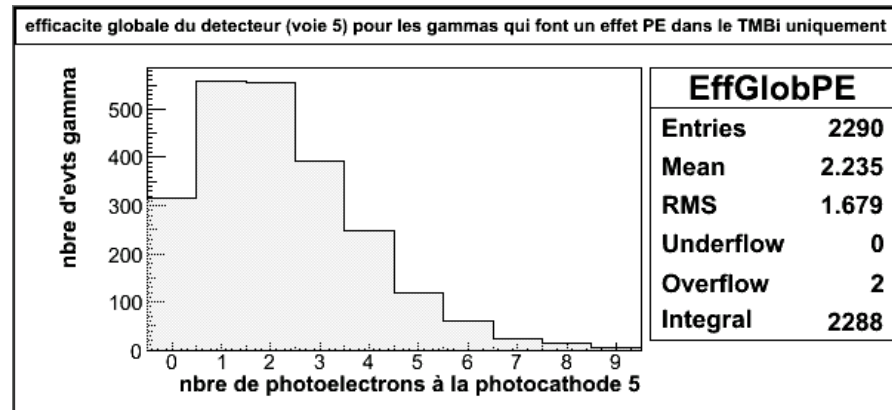
**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Données d'entrée:



DQE R11265-200

Efficacité sur effet  
PE = 68%



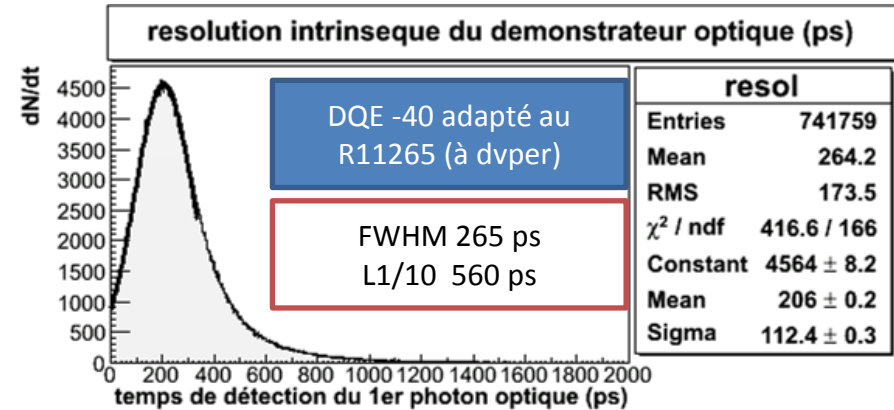
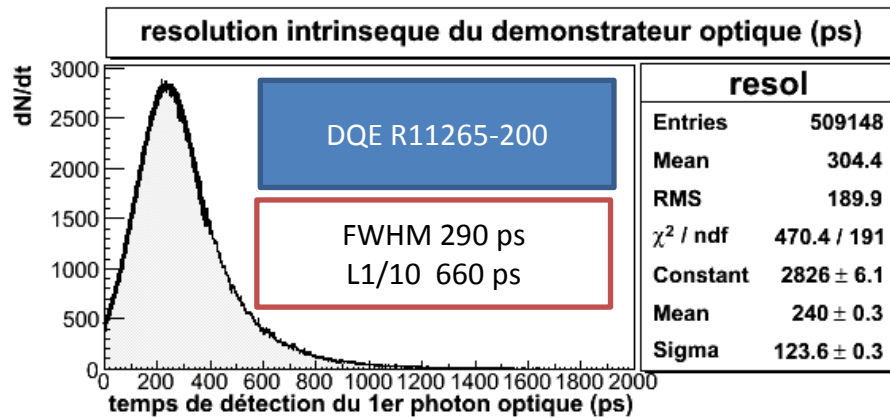
DQE -40 adapté au  
R11265 (à dvper)

Efficacité sur effet  
PE = 86%

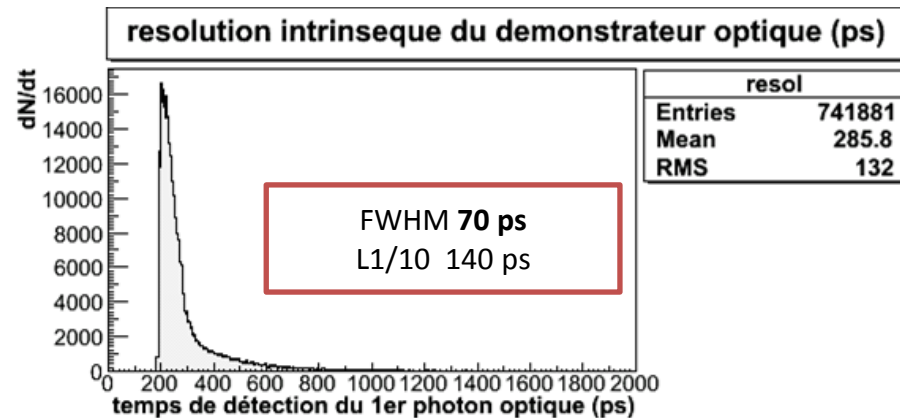
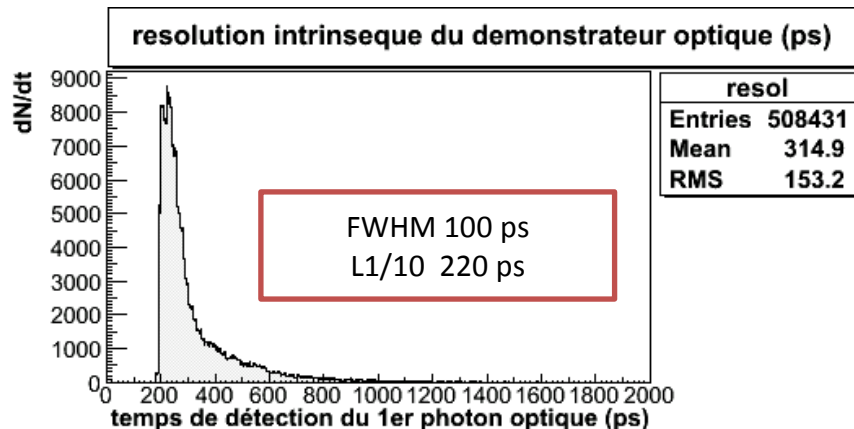
# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Résultats:



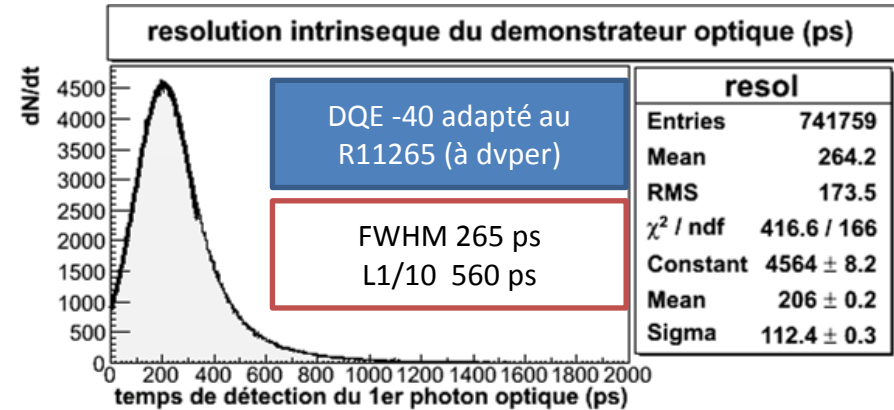
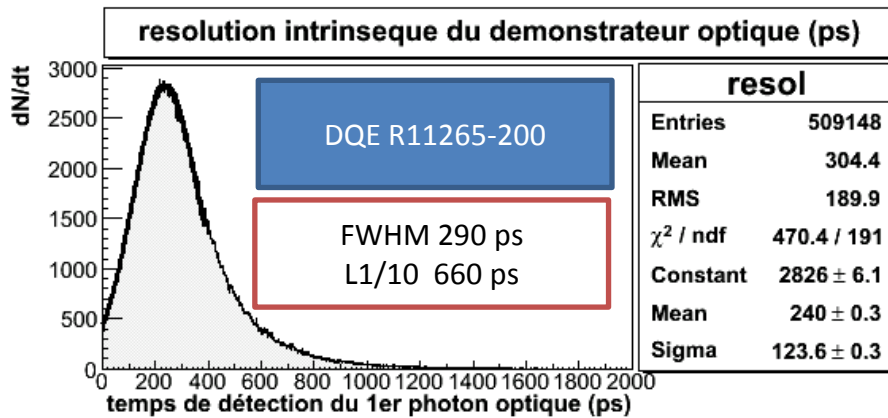
- En retirant le TTS des PMTs:



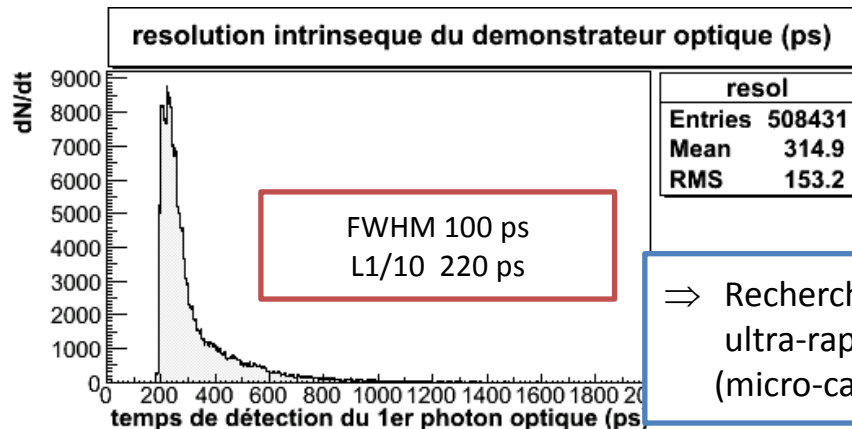
# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

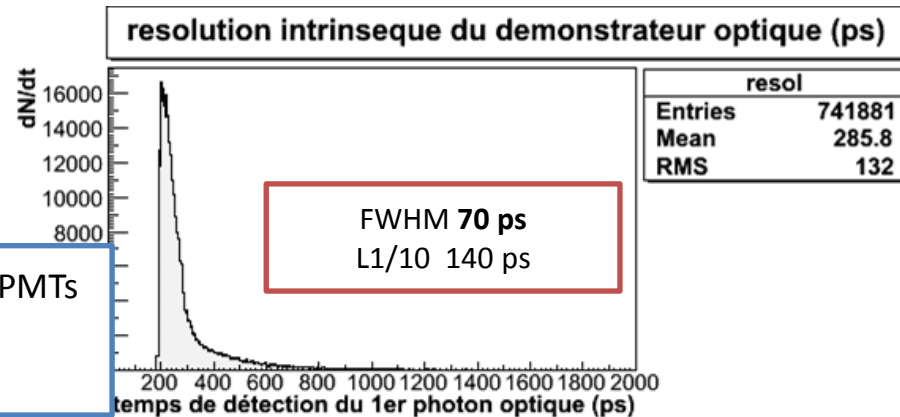
- Résultats:



- En retirant le TTS des PMTs:



⇒ Recherche de PMTs  
ultra-rapides  
(micro-canaux)





# CaLIPSO

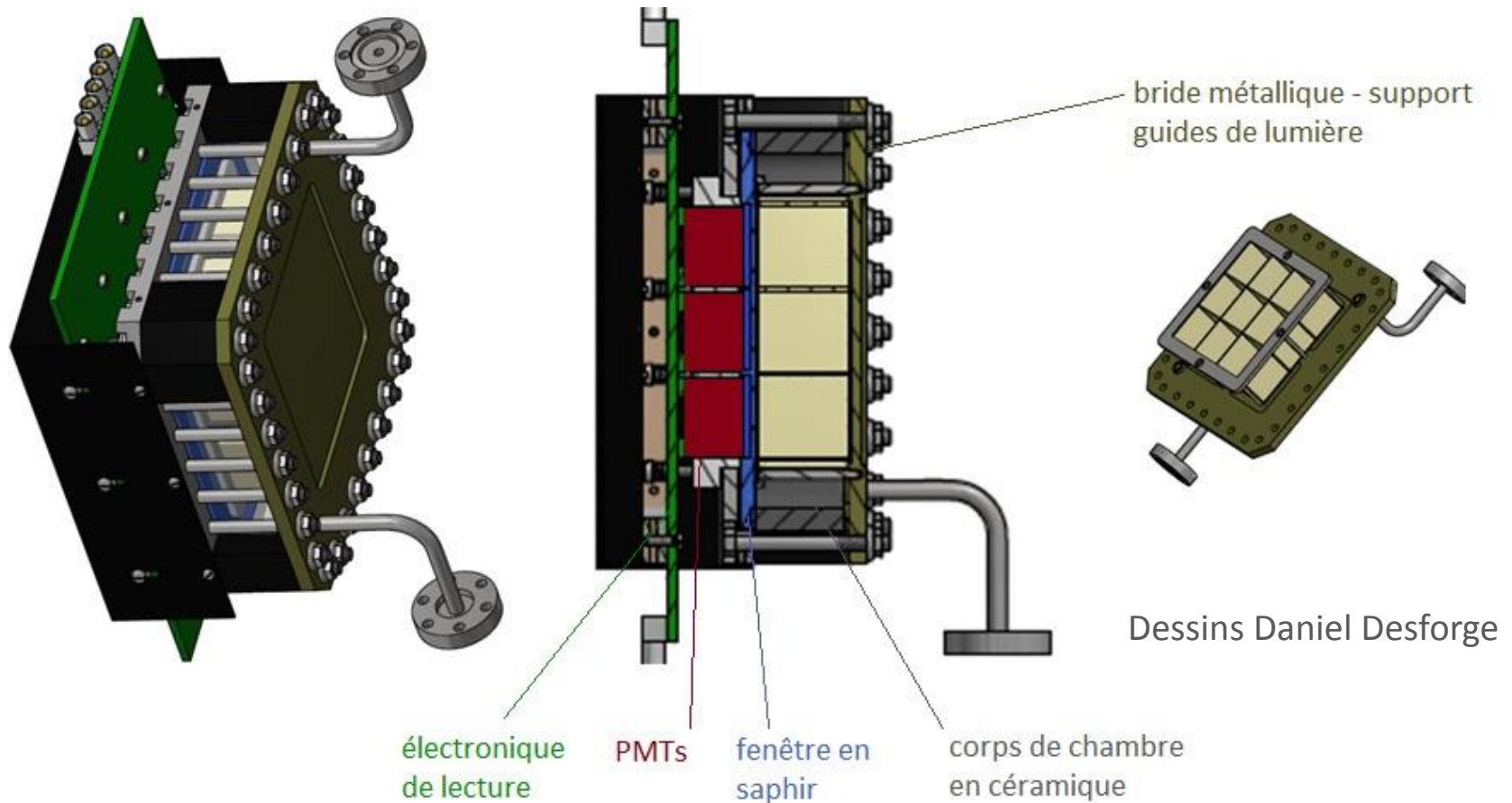
**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1<sup>er</sup> démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé**

# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

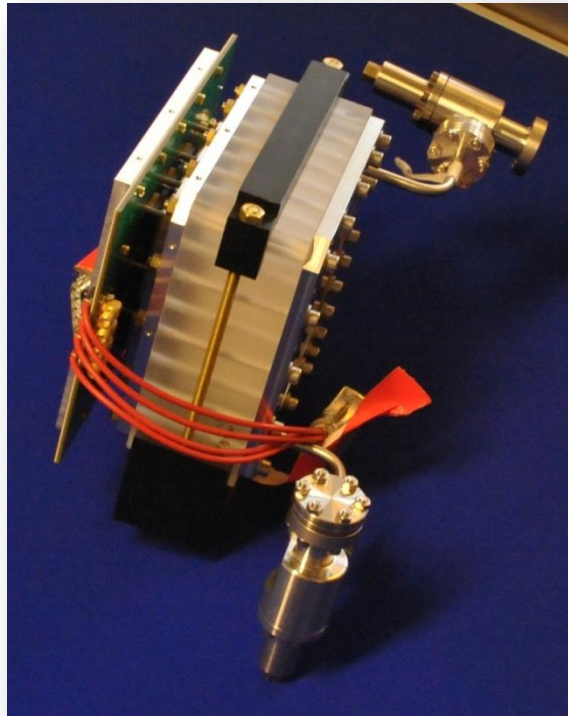
- Plans du démonstrateur optique v2



# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Montage cet été  
Résultats à venir . . .

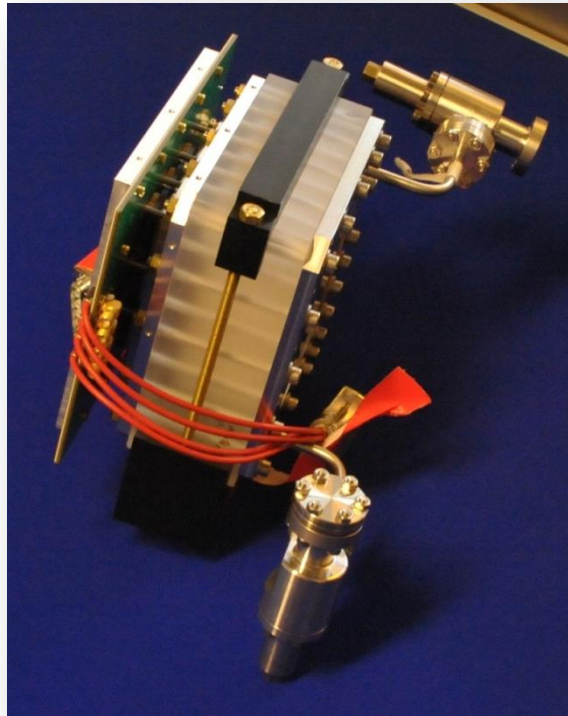




# CaLIPSO

**Ca**lorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Merci de votre attention



# CaLIPSO

**C**alorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Modélisation statistique de la détection
- Données d'entrée (Monte Carlo démonstrateur optique v2) :
  - Histogramme temps d'arrivée des photons optiques à la photocathode (n°5).
  - Histogramme nombre de photons optiques détectés par la photocathode (n°5), tenant compte de sa DQE.
  - Cas où le gamma fait UNIQUEMENT un effet photoélectrique dans le TMBi.
- Modèle simplifié :
  - Tirage aléatoire n°1 : Nombre de photons optiques détectés
  - Tirage aléatoire n°2 : Pour chaque photon optique détecté, tirage de son temps d'arrivée à la photocathode  $T_{arr}$
  - Tirage aléatoire n°3 : Décalage en temps  $T_{dec}$  induit par le PMT, tiré dans une gaussienne 270 ps FWHM (TTS des PMTs)
  - **Temps de détection  $T$**  du photon optique =  $T_{arr} + T_{dec}$
  - Seuil = 1<sup>er</sup> photoélectron donc on retient le  $T$  le plus petit ( **$T_{min}$** ) parmi tous les photons optiques détectés
  - ⇒ **Histogramme de tous les  $T_{min}$  calculés pour chacun des 100 000 évènements**