



CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Détection γ par effet Cerenkov dans le détecteur CaLIPSO :

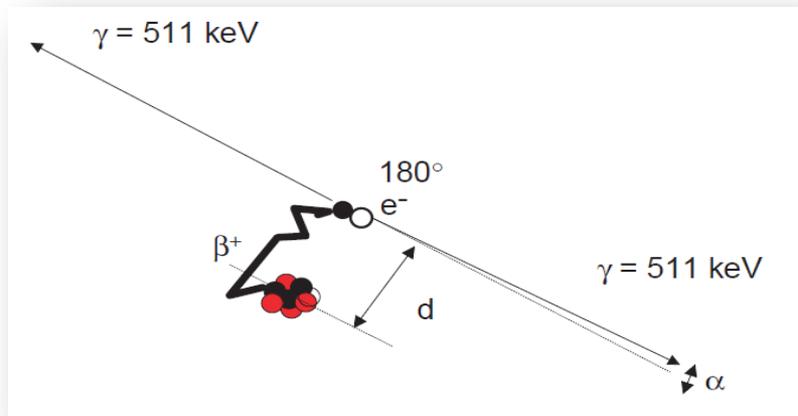
Préparation, étude et optimisation d'un Démonstrateur Optique

Emilie RAMOS
Journées doctorants IRFU
2 juillet 2013

CaLIPSO

Calorimètre Liquide Ionisation Position Scintillation Organométallique

Un détecteur pour l'imagerie TEP

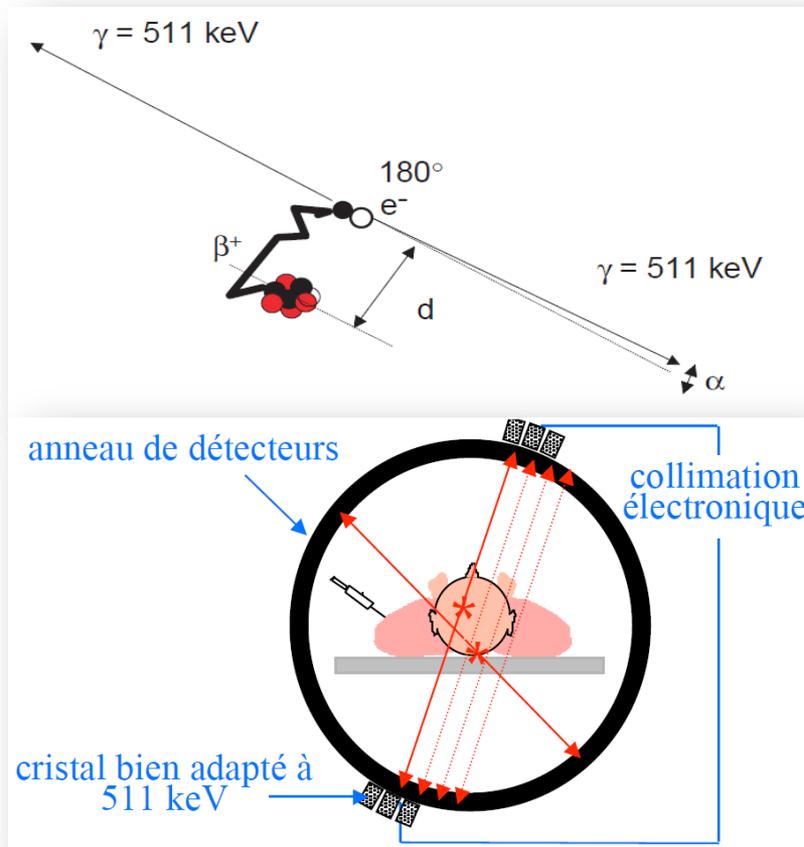


1. Injection radio-traceur (^{18}F FDG, ^{18}F -choline) \rightarrow fixation sur cellules d'intérêt
Emission β^+ parcours 0,5 mm \rightarrow annihilation
 \Rightarrow 2 gammas de 511 keV à $\approx 180^\circ$

CaLIPSO

Calorimètre **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

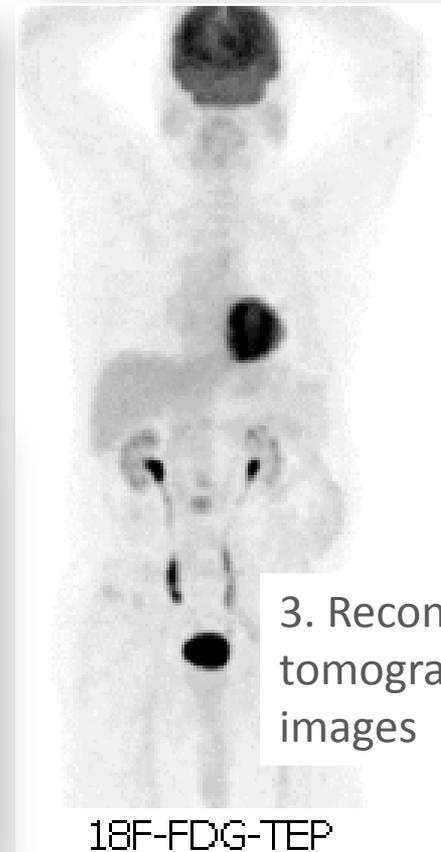
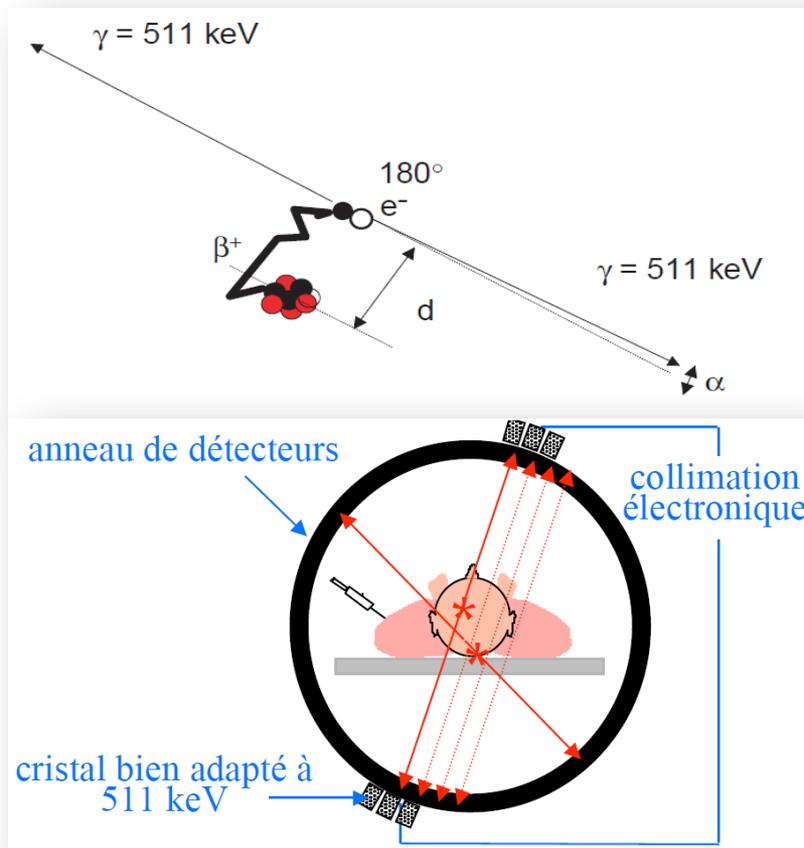
⇒ Points de croisement

= zones d'activité

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Un détecteur pour l'imagerie TEP



3. Reconstruction tomographique des images



CaLIPSO

Calorimètre **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^{er} démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé



CaLIPSO

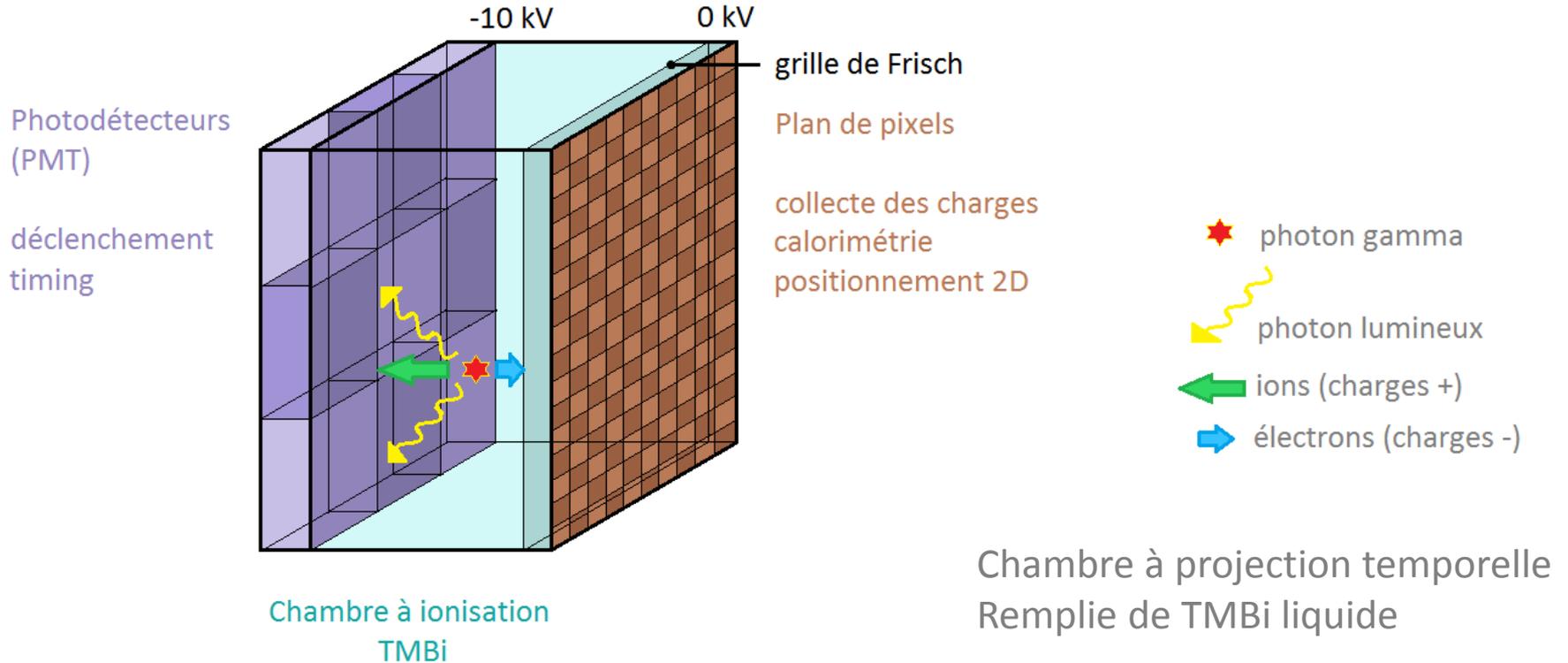
Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- 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^{er} démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Principe du détecteur





CaLIPSO

Calorimètre **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^{er} démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé



CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Intérêt en imagerie TEP

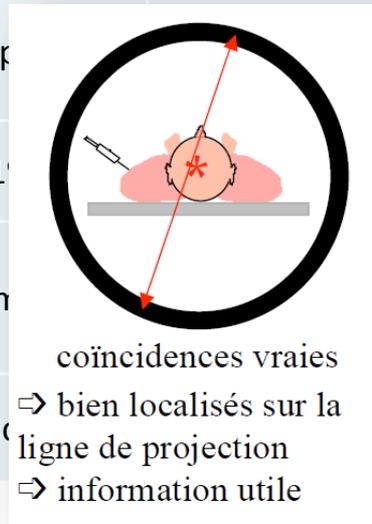
caractéristiques	LSO	CdTE	Xénon Liquide	TMBi
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)	95% (5cm)	95% (10cm)	85% (5cm)
Rapport photoélectrique	30%	15%	21%	47% Bi : Z = 83 !
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 ns optimisé	< 1 ns	375 ps à optimiser
Résolution énergie (FWHM)	15%	1%	5%	<10%
Localisation des interactions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

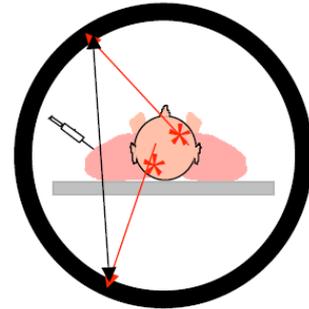


CaLIPSO

Calorimètre Liquide Ionisation Positif

ganométallique

- Intérêt en imagerie TEP



coïncidences fortuites
 ⇒ mauvaise localisation
 ⇒ réduction des capacités de comptage
 ⇒ biais quantitatif

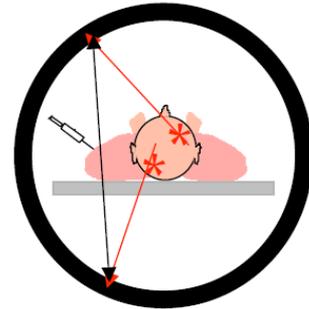
caractéristiques	LSO			TMBi
Pouvoir d'atténuation	95% (2,2cm)			85% (5cm)
Rapport photoélectrique	30%			47% Bi : Z = 83 !
Résolution en temps	500 ps optimisé	2 ns optimisé	< 1 ns	375 ps à optimiser
Résolution énergie (FWHM)	15%	1%	5%	<10%
Localisation des interactions (Résolution spatiale)	1 cm 0.2 cm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

CaLIPSO

Calorimètre Liquide Ionisation Positif

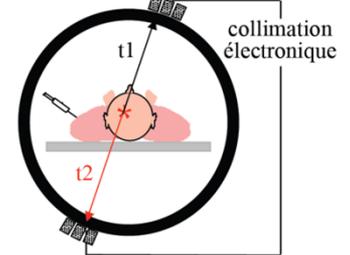
- Intérêt en imagerie TEP

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

organométallique



mesure de $t_2 - t_1$

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

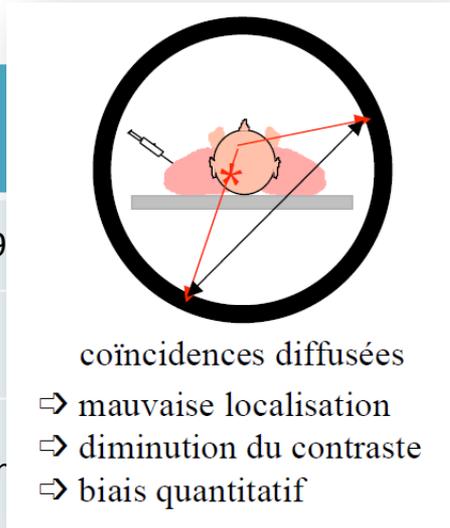
Bi : $Z = 83$!

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Intérêt en imagerie TEP

caractéristiques	LSO			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%	375 ps à optimiser
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 **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%	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 **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%	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 **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^{er} démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

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





CaLIPSO

Calorimètre **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

Calorimètre **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^{er} démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

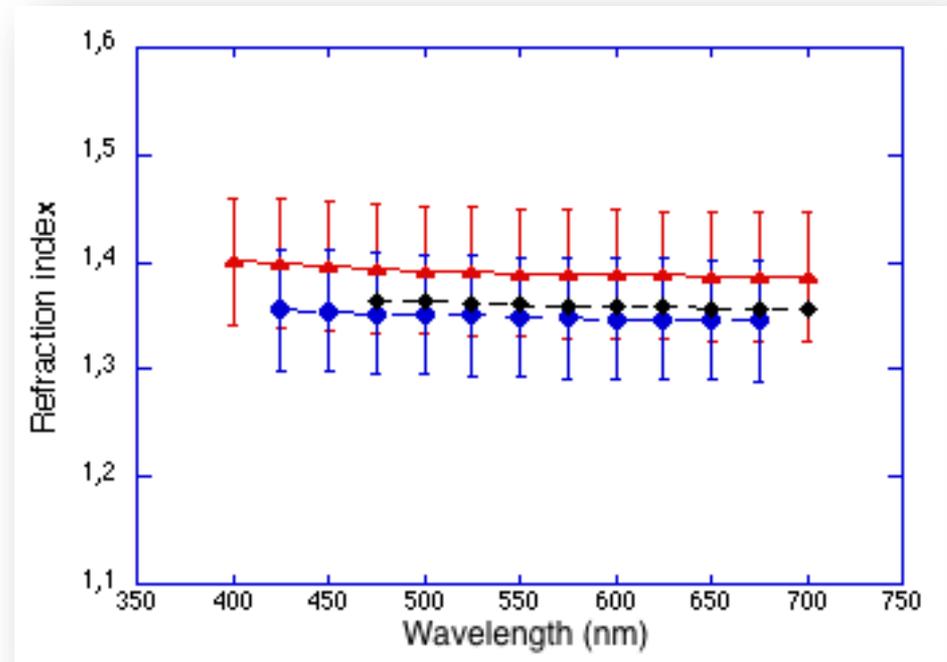
CaLIPSO

Calorimètre **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

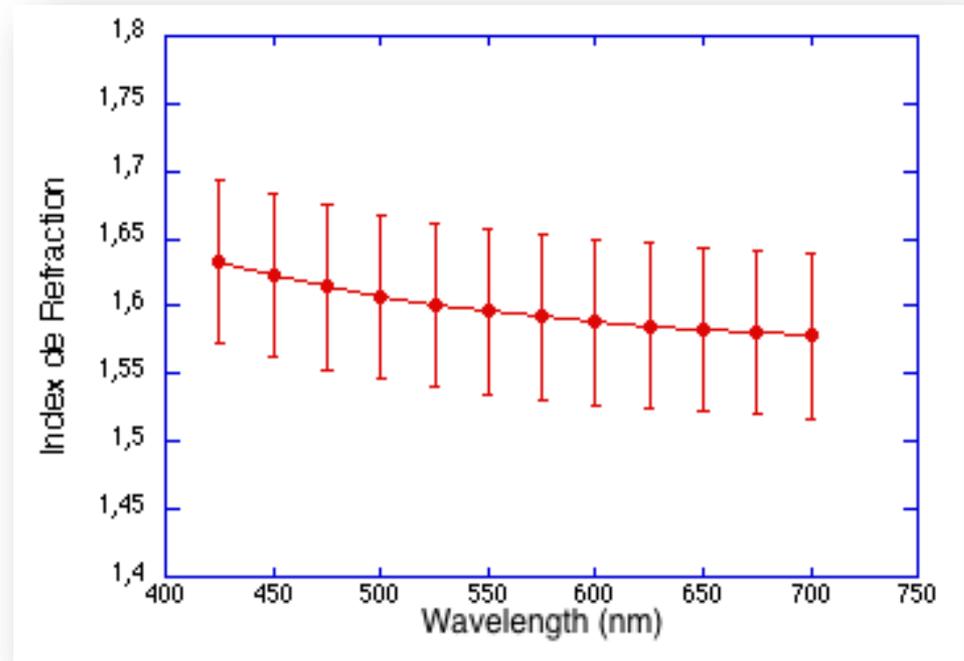
Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- indice de réfraction



Daniel Desforge
Emilie Ramos

Erreurs :
géométrie
de la cuve



Mesure au goniomètre

Cellules prismatiques étanches

Mesure sur le TMBi



CaLIPSO

Calorimètre **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^{er} démonstrateur optique
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

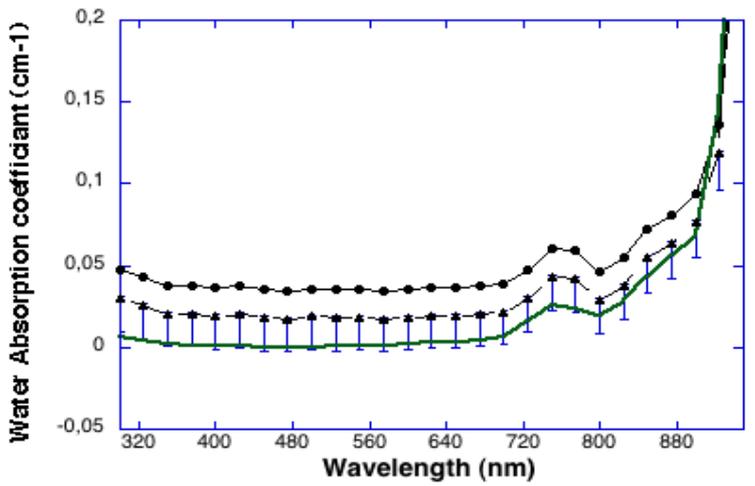
- longueur d'absorption

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

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

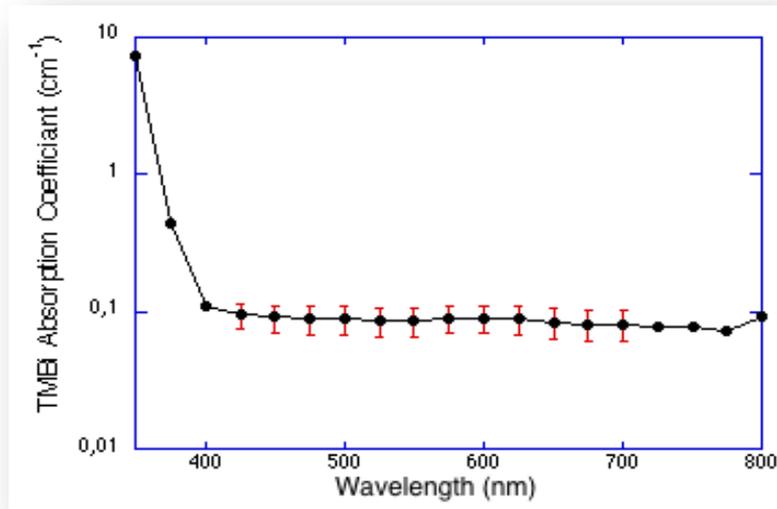
- longueur d'absorption

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





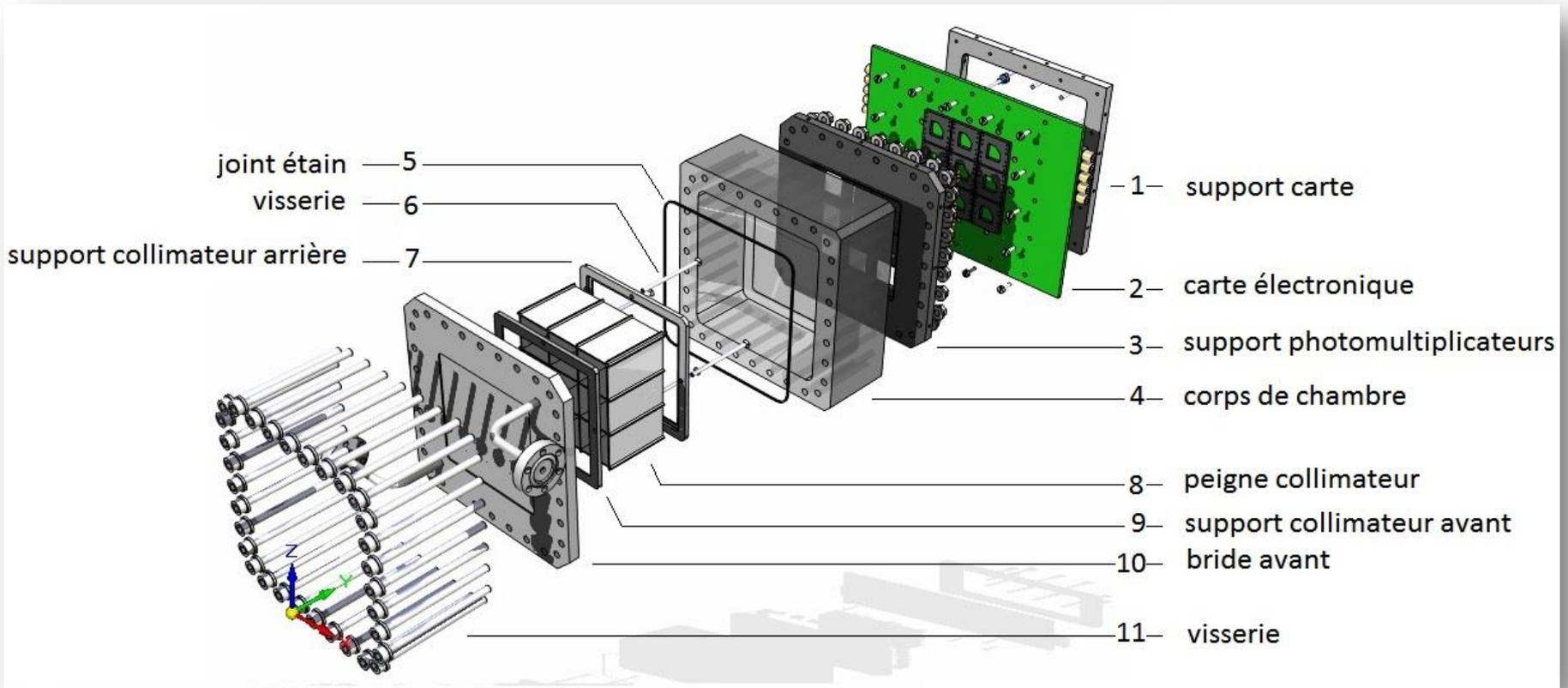
CaLIPSO

Calorimètre **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^{er} démonstrateur optique
 - a) Plans et montage
 - b) Efficacité et résolution en temps
- IV. Voies d'optimisation
- V. Futur démonstrateur optique optimisé

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

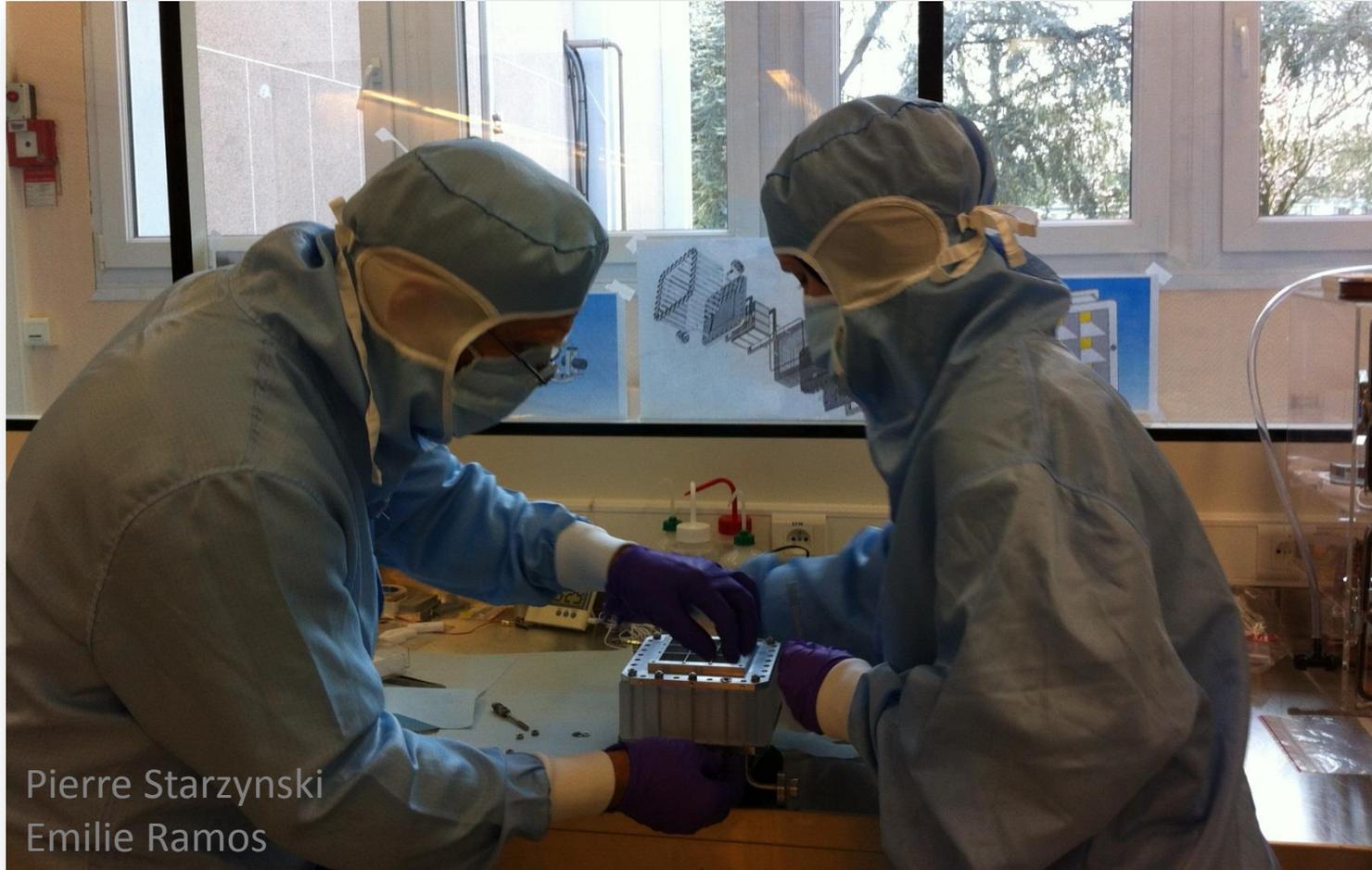


Dessins Jean-Philippe Mols

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

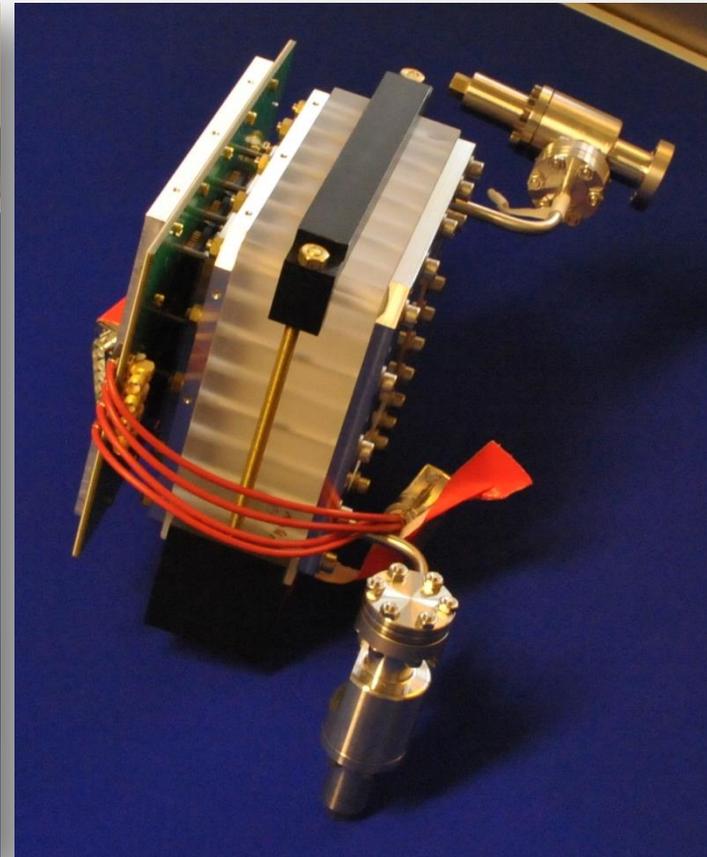
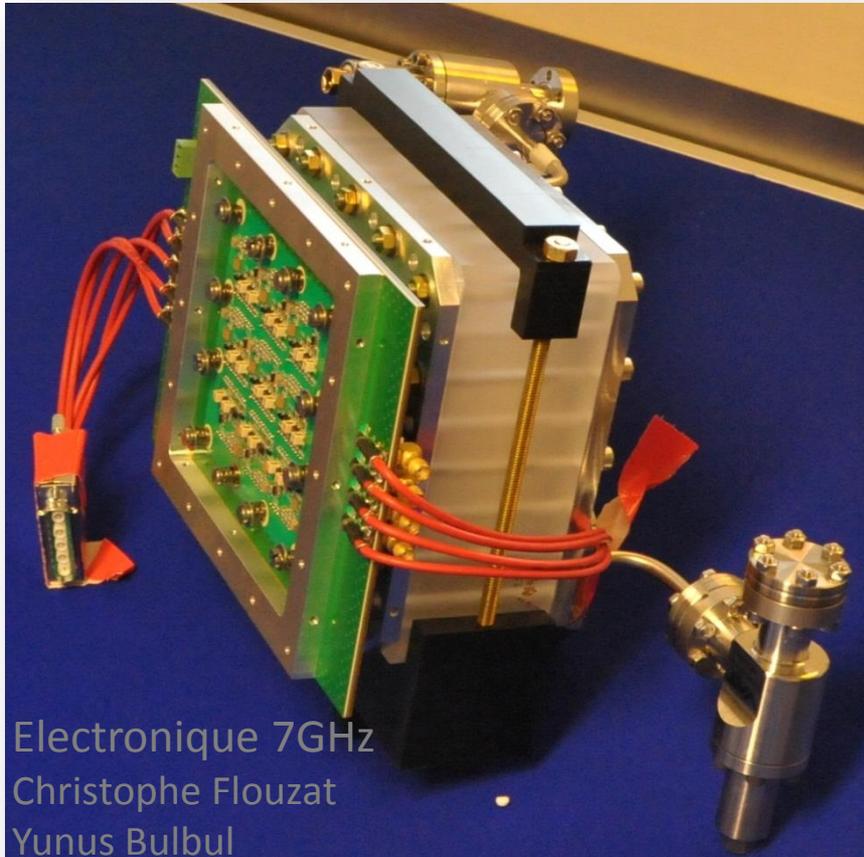


Pierre Starzynski
Emilie Ramos

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



CaLIPSO

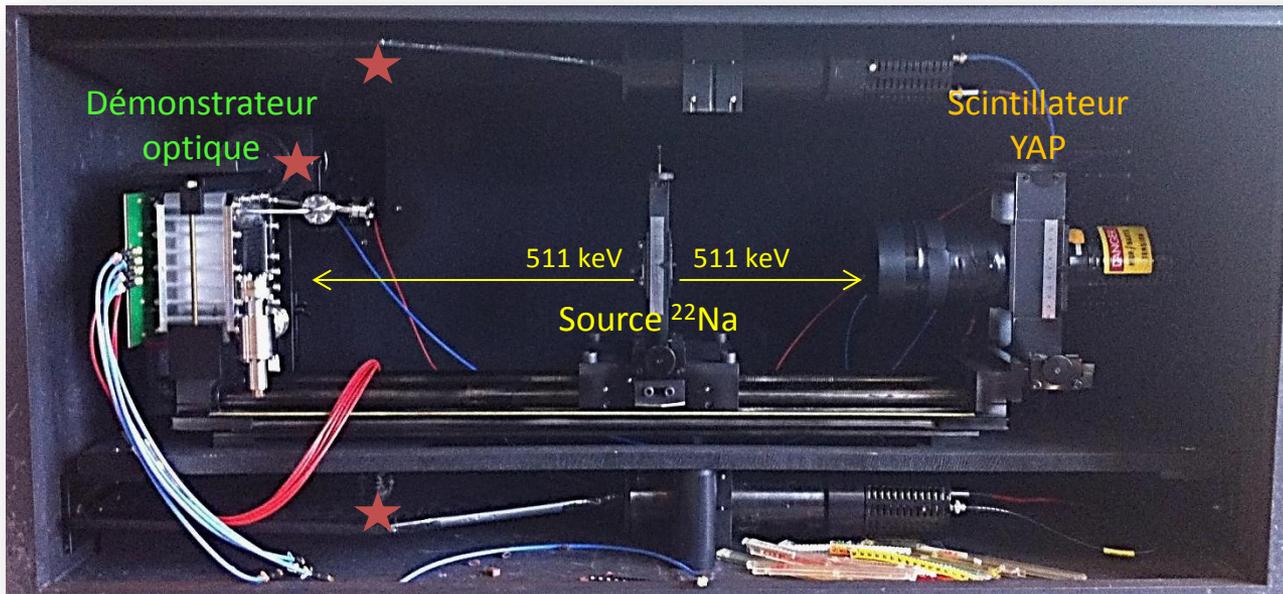
Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

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

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Démonstrateur intégré au banc de mesure



★ 3 raquettes PMTs
(tag cosmiques)

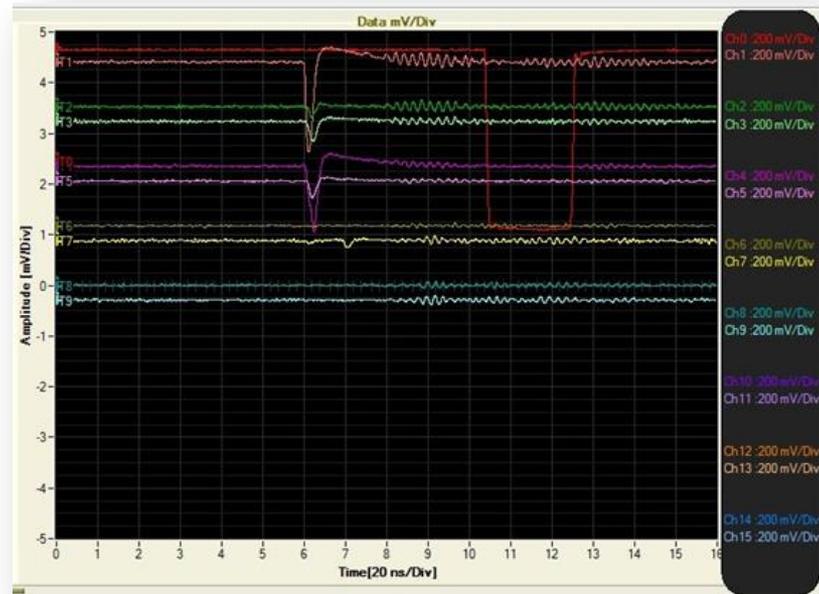
- Voir déclenchement de plusieurs cellules sur un signal fort (cosmiques)
- Évaluer efficacité de déclenchement du démonstrateur

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Démonstrateur intégré au banc de mesure

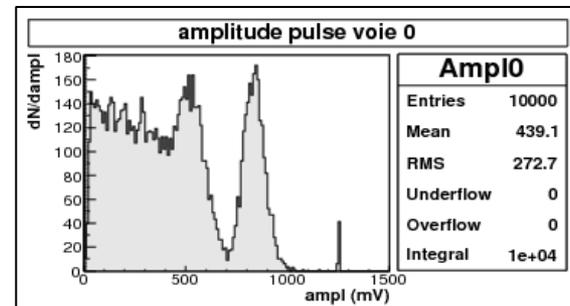
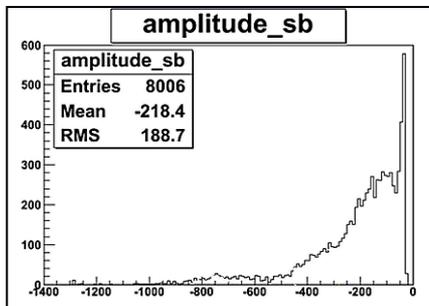
- Visualisation déclenchement de plusieurs cellules sur un signal fort (cosmiques) →
- Validation du principe de déclenchement sur un 511 keV Cerenkov (1^{ère} mondiale)
- Mesures préliminaires de l'efficacité de déclenchement et de la résolution en temps du démonstrateur



CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

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





CaLIPSO

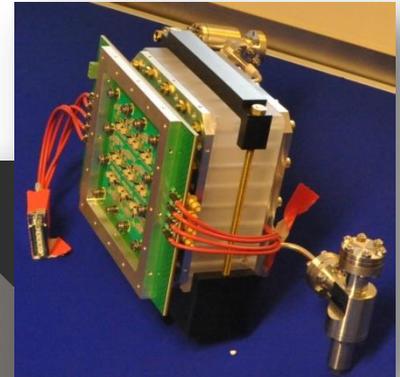
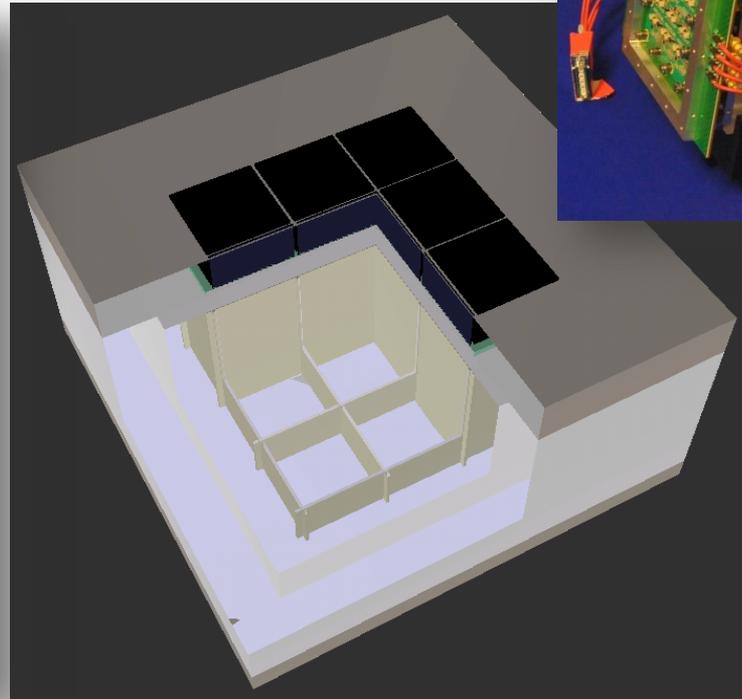
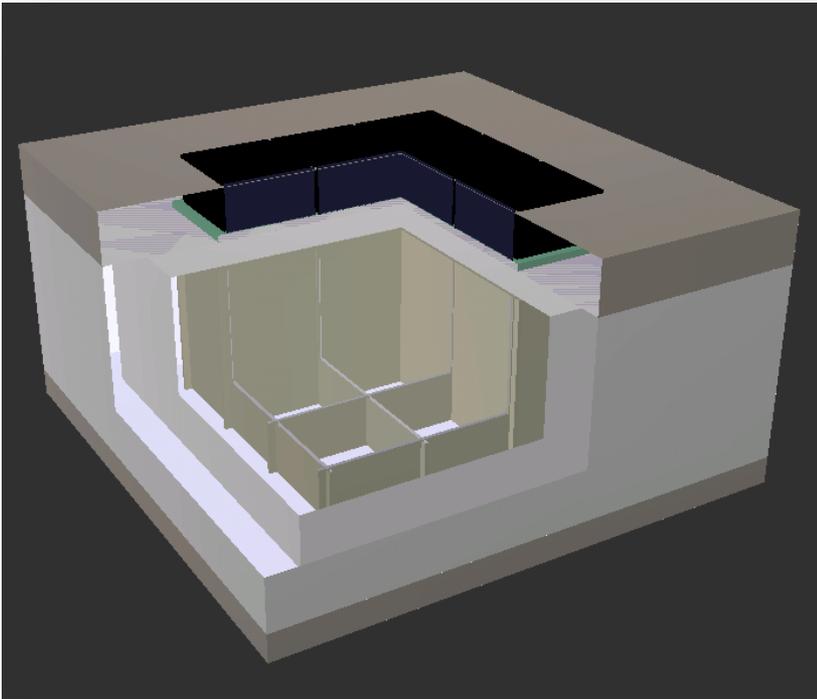
Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1^{er} 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

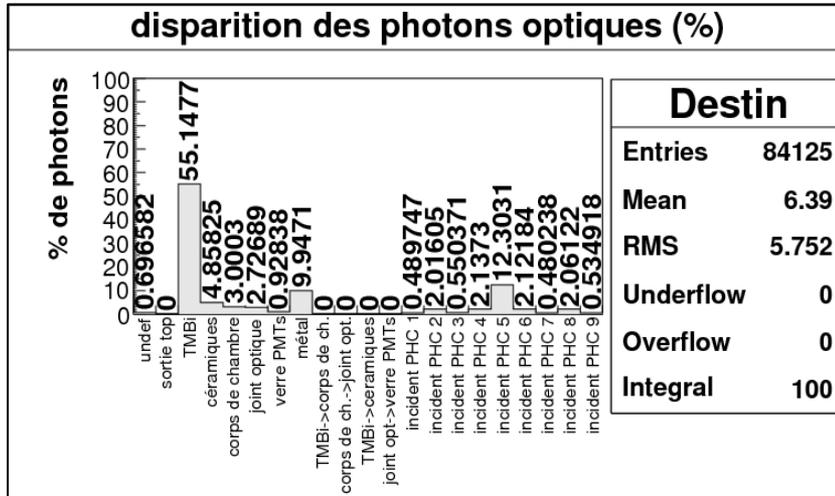
Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Géométrie du démonstrateur optique dans Geant4



CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique



Devenir des photons lumineux

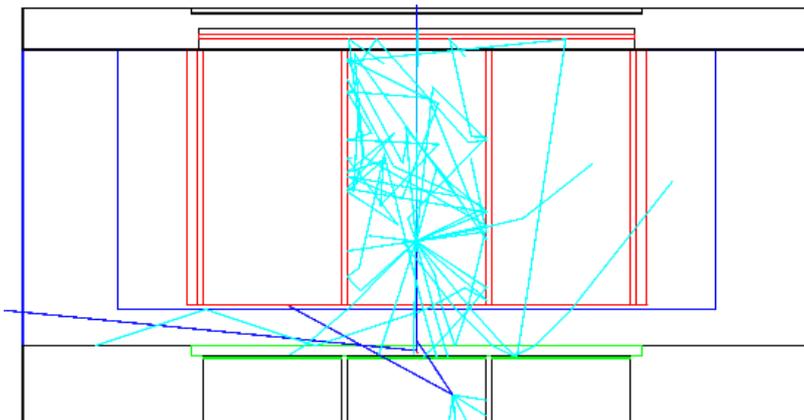
55% auto-absorption

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

Calorimètre **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^{er} 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

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

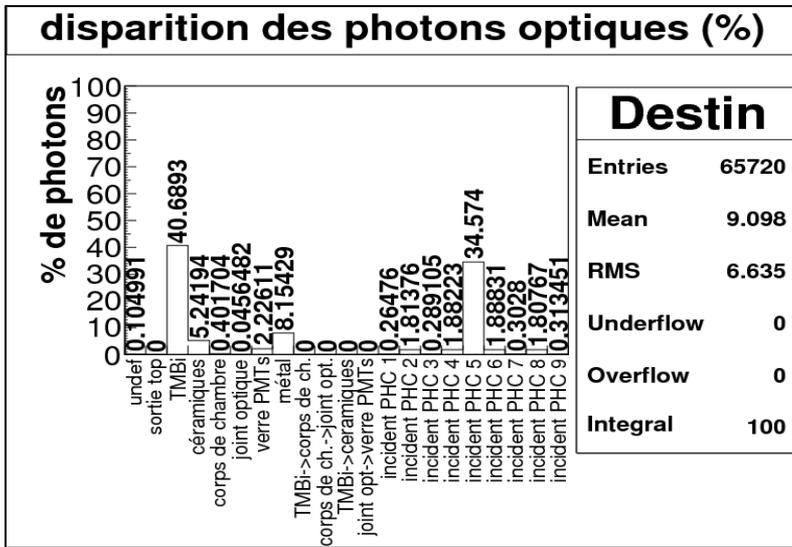
- Voies d'optimisation :

Modifications	DO version 1	DO version 2 optimisé
Joint optique	Épaisseur 2 mm $n = 1,41$	Épaisseur 10 μm $n = 1,55$
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

Calorimètre **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%**

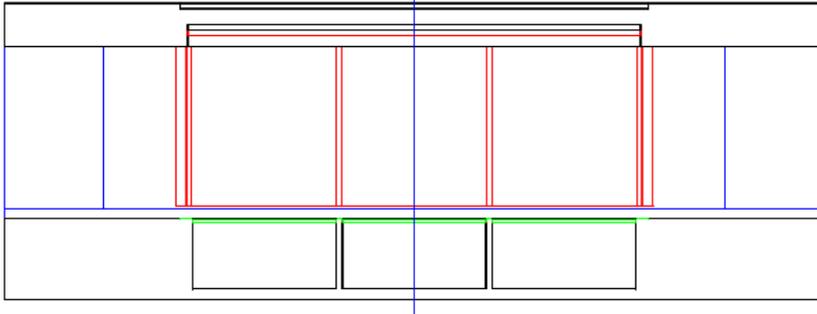
⇒ **Efficacité de collection de lumière x3**

Efficacité globale de détection des gamma

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

→ **25%**

⇒ **Efficacité globale x2**

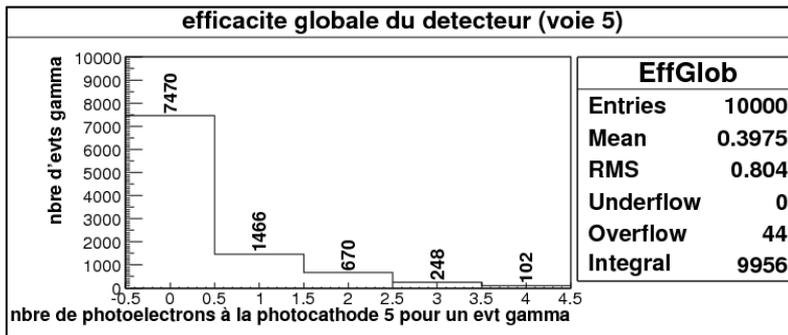


Géométrie optimisée 3cm du démonstrateur optique (v10)

CaLIPSO

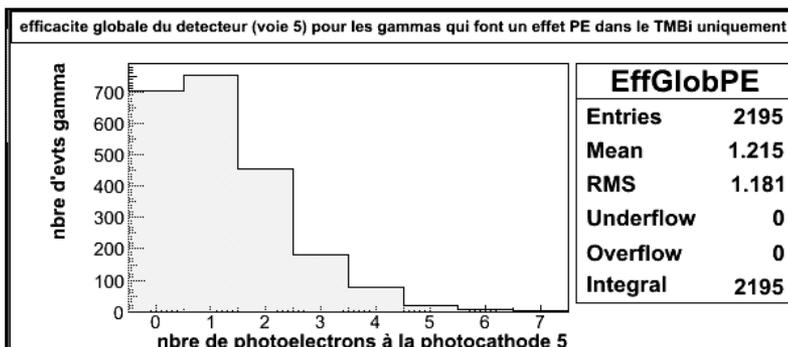
Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- Efficacité attendue :



Efficacité **globale** de détection des gamma
12,1% (seuil de détection 1^{er} photoélectron)

→ 25%



MAIS processus d'intérêt = effet photoélectrique

Efficacité de détection des gamma sur l'effet photoélectrique (seuil de détection 1^{er} photoélectron)

→ 68%



CaLIPSO

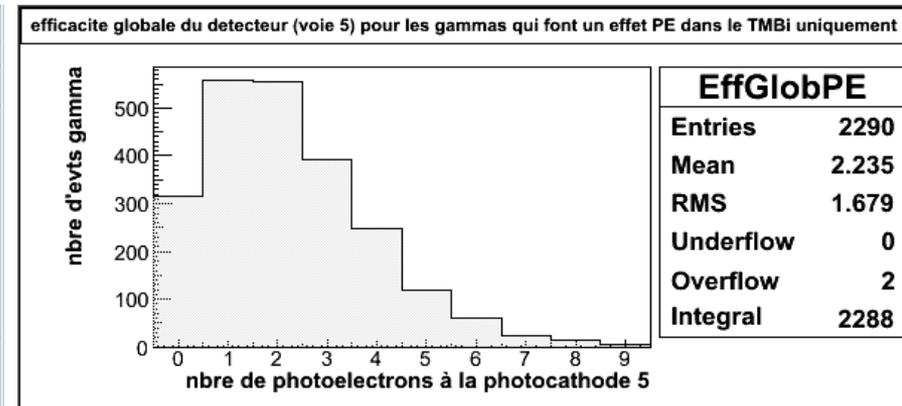
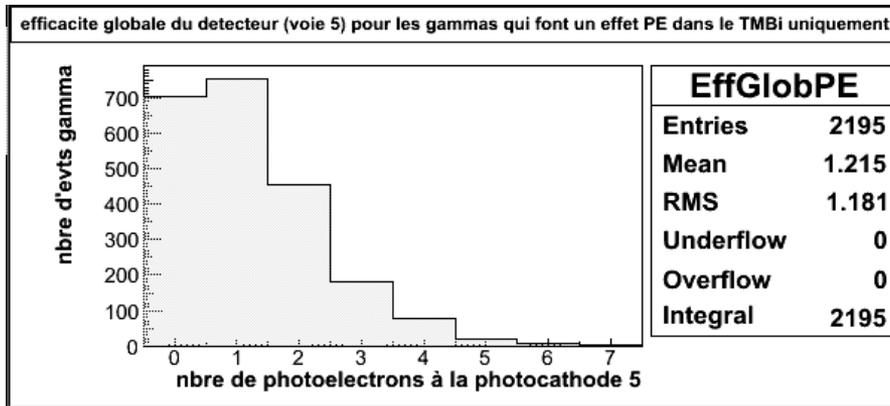
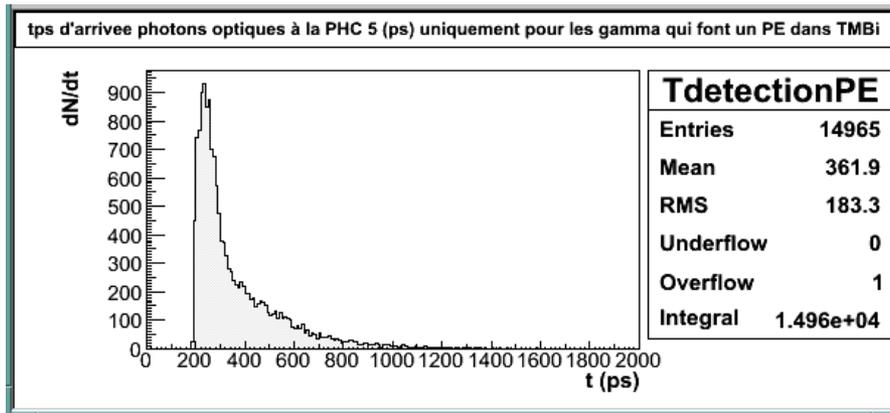
Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

- I. Fonctionnement et atouts de CaLIPSO
- II. Propriétés optiques du TMBi
- III. Conception du 1^{er} 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%

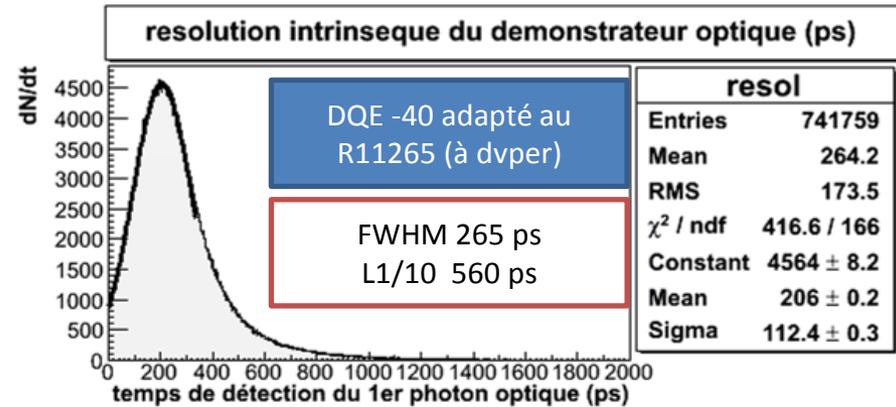
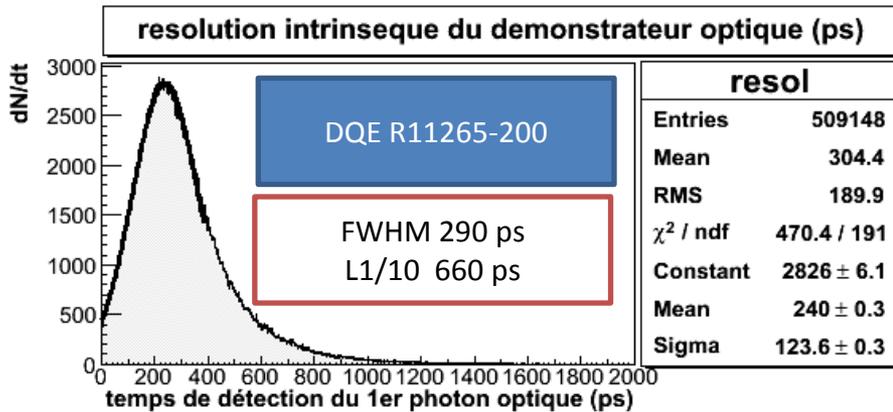
DQE -40 adapté au
R11265 (à dvper)

Efficacité sur effet
PE = 86%

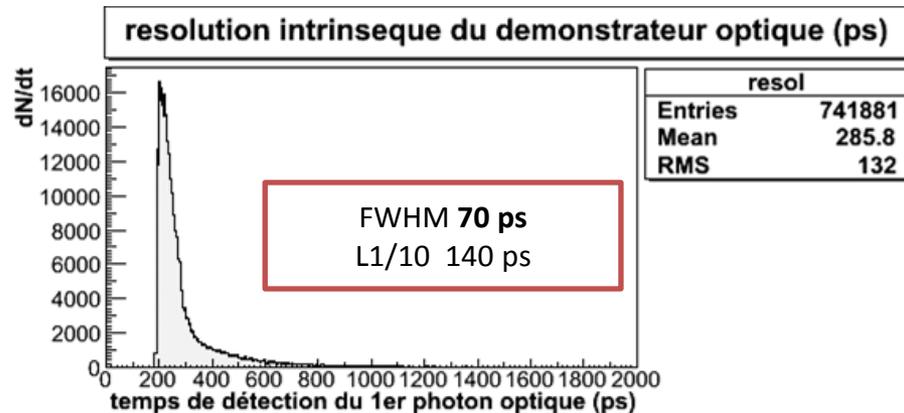
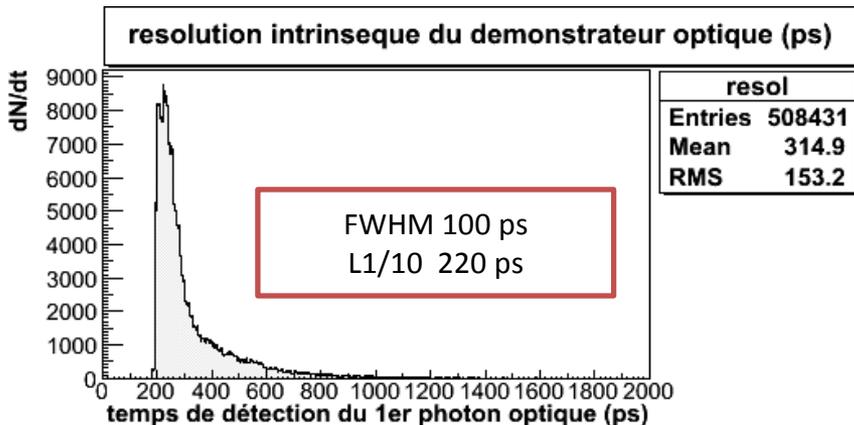
CaLIPSO

Calorimètre Liquide Ionisation Position Scintillation Organométallique

- Résultats:



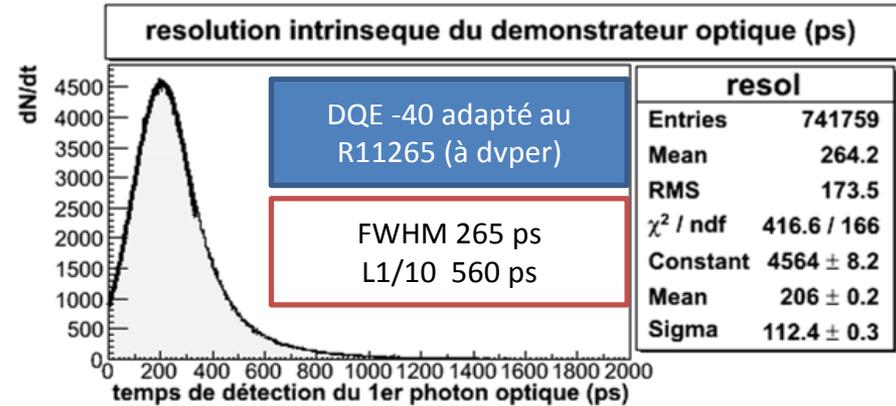
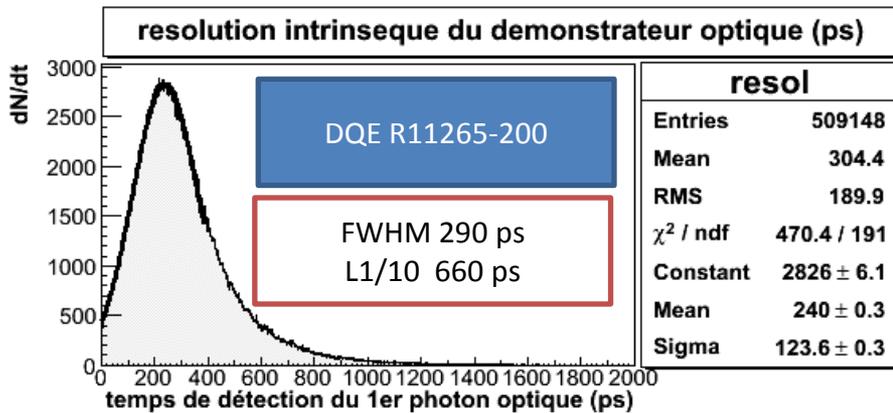
- En retirant le TTS des PMTs:



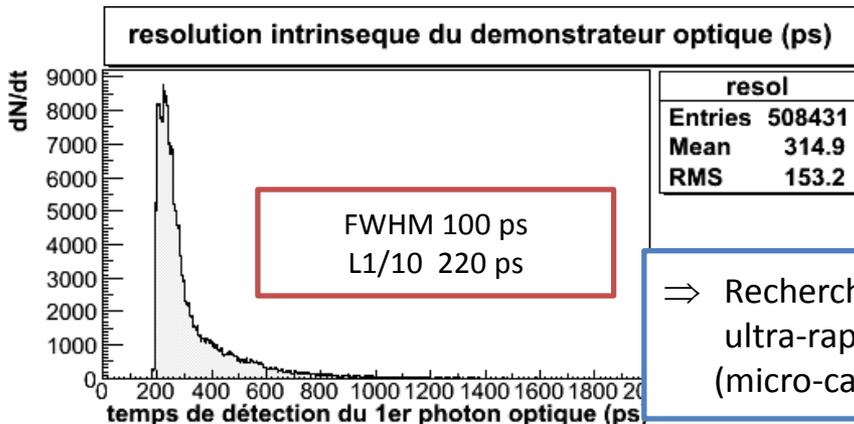
CaLIPSO

Calorimètre Liquide Ionisation Position Scintillation Organométallique

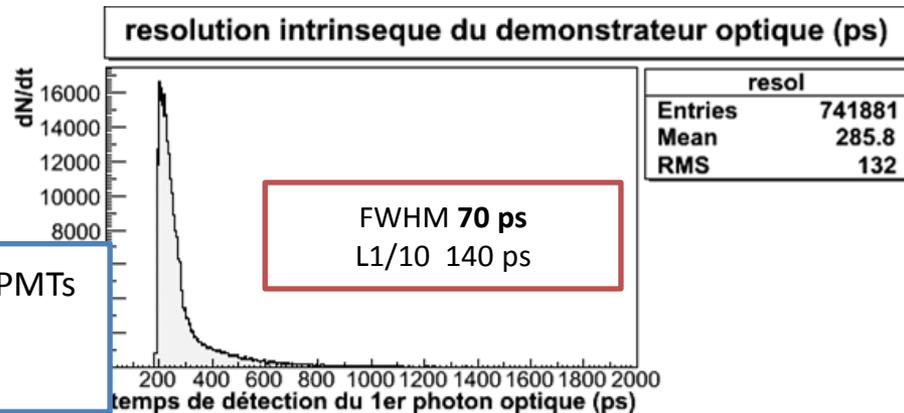
- Résultats:



- En retirant le TTS des PMTs:



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





CaLIPSO

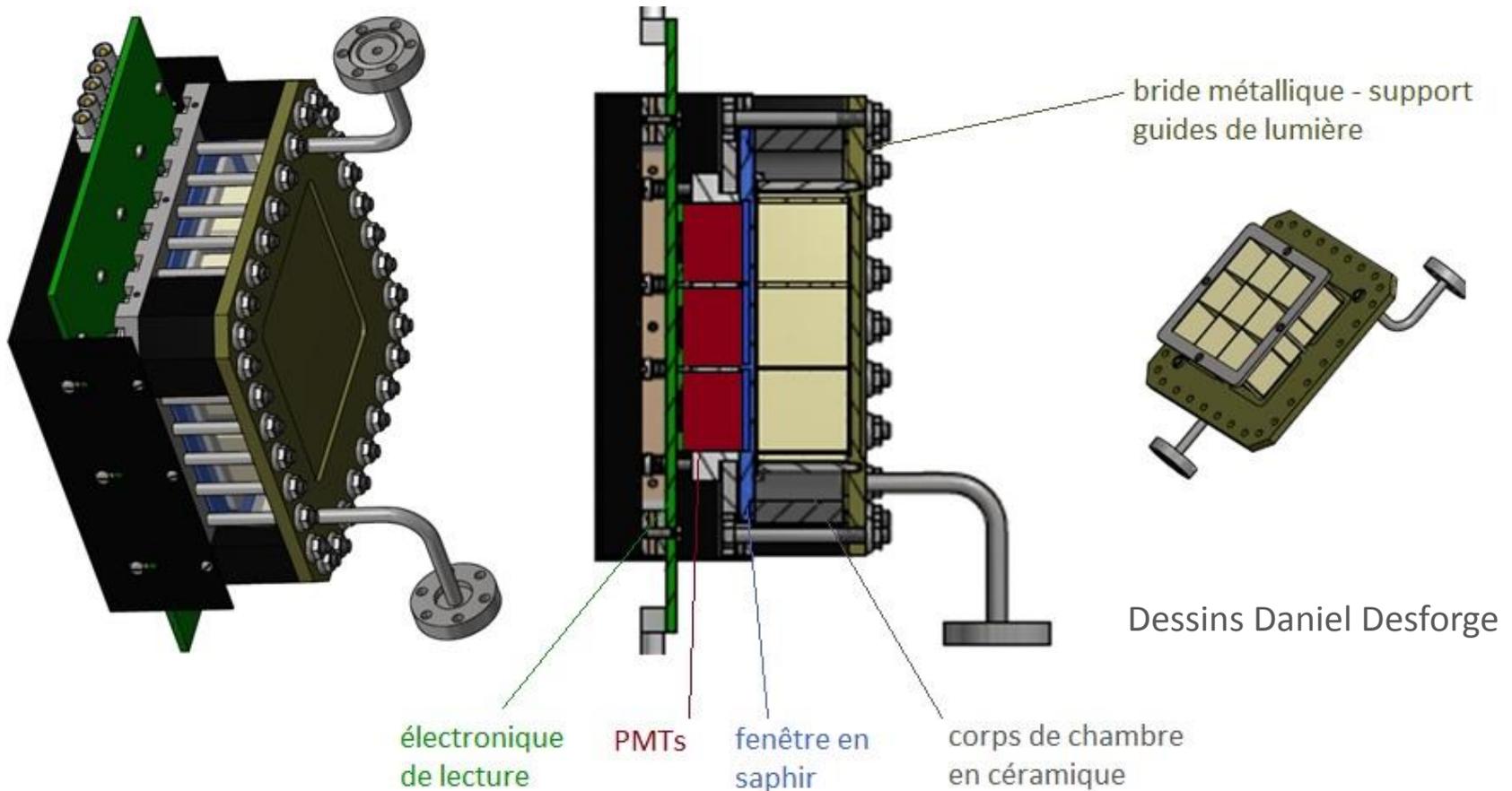
Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

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

CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

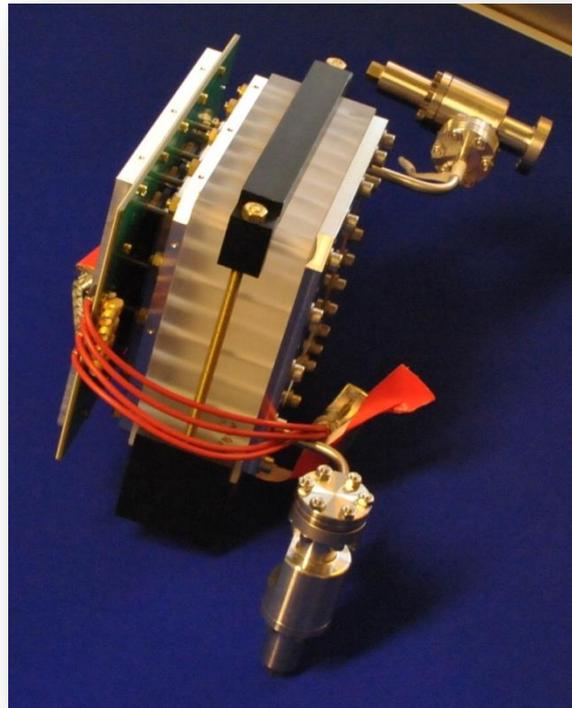
- Plans du démonstrateur optique v2



CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

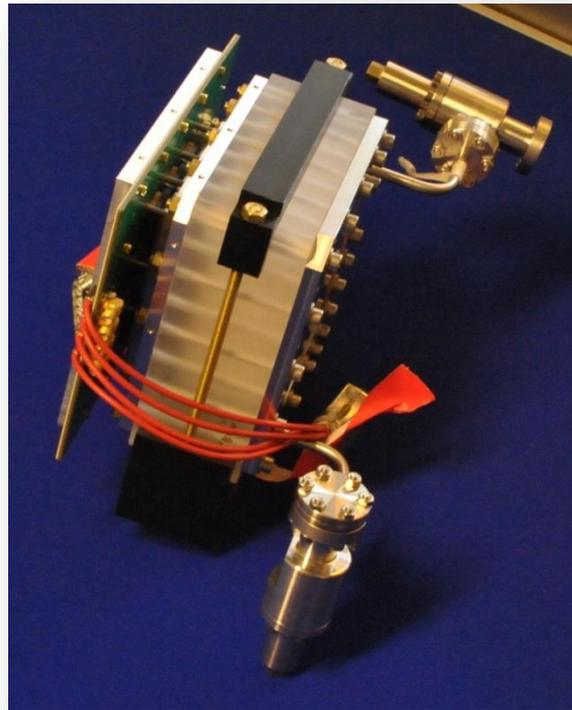
Montage cet été
Résultats à venir . . .



CaLIPSO

Calorimètre **L**iquide **I**onisation **P**osition **S**cintillation **O**rganométallique

Merci de votre attention





CaLIPSO

Calorimètre **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^{er} photoélectron donc on retient le T le plus petit (**Tmin**) parmi tous les photons optiques détectés
 - ⇒ **Histogramme de tous les Tmin calculés pour chacun des 100 000 évènements**