

# Soutenance de thèse

4 juillet 2005

**Pierre COLIN**

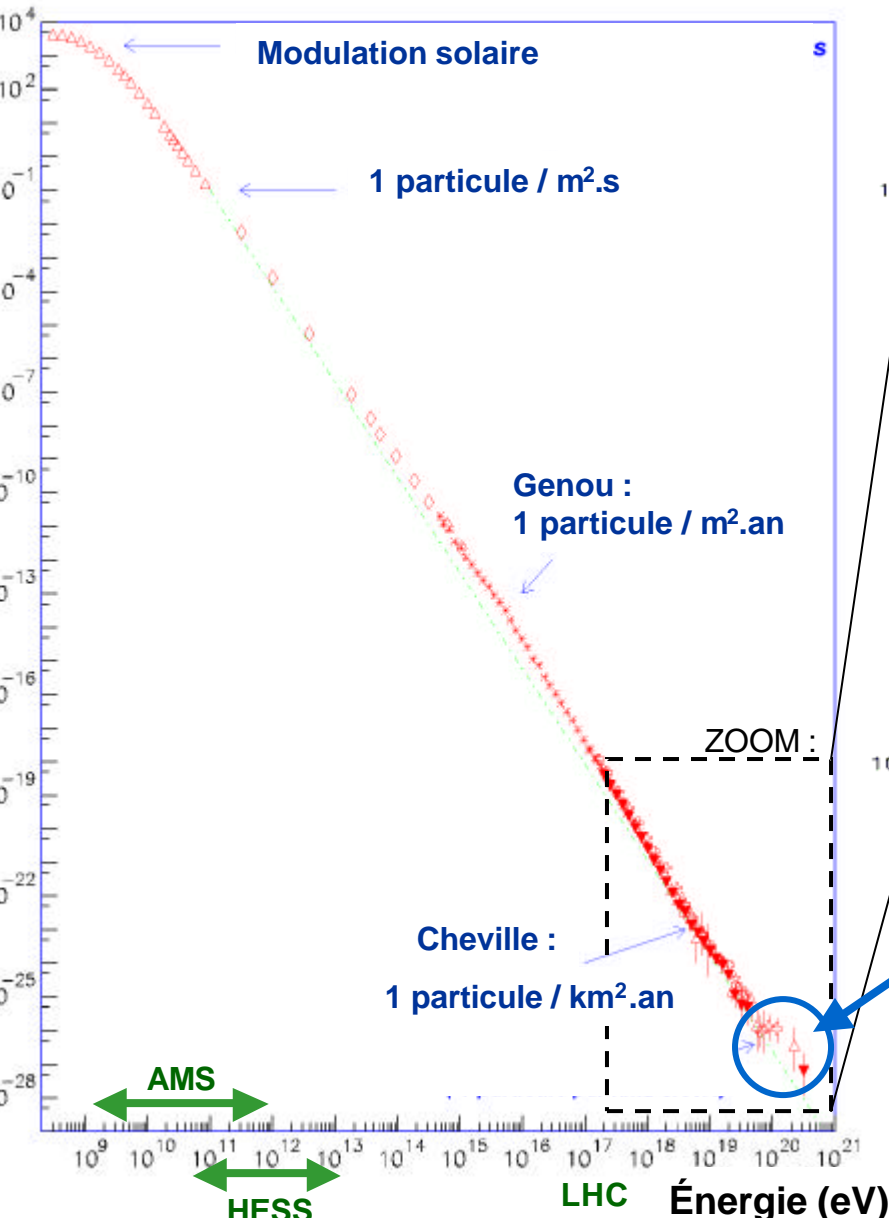
**Reconstruction des gerbes atmosphériques et  
mesure de la fluorescence de l'air pour l'étude  
des rayons cosmiques ultra énergétiques au  
sein du projet EUSO**



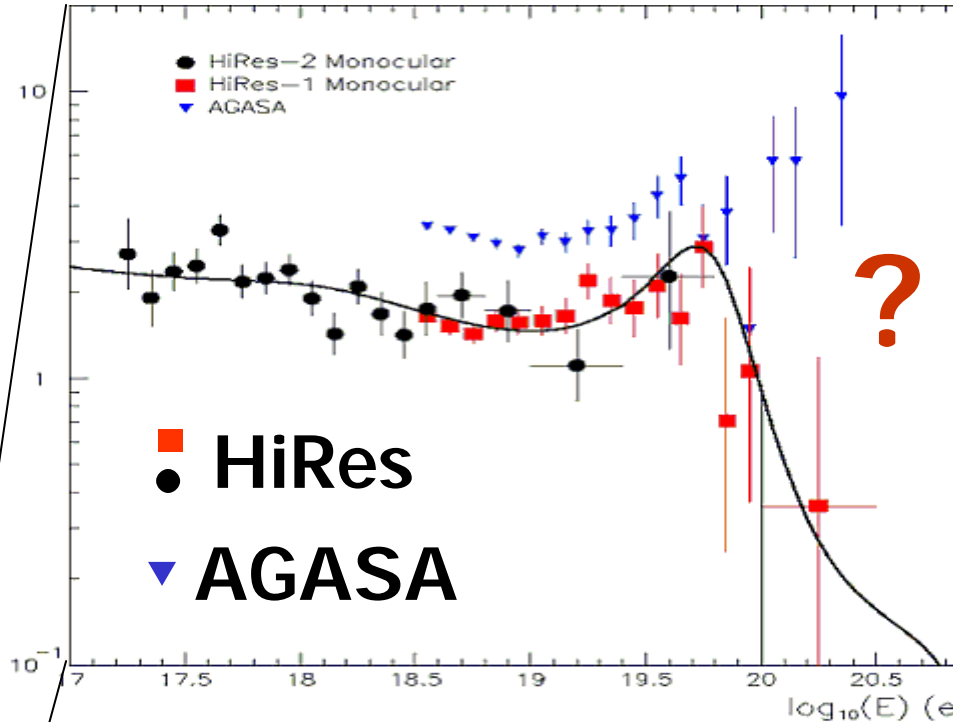
# Plan de l'exposé

- **Contexte scientifique**
- **Le projet EUSO**
- **La reconstruction des gerbes atmosphériques**
- **La fluorescence de l'air**
- **L'expérience MACFLY**
- **Conclusion**

# Les rayons cosmiques ultra énergétiques



ZOOM : flux \* E<sup>3</sup>



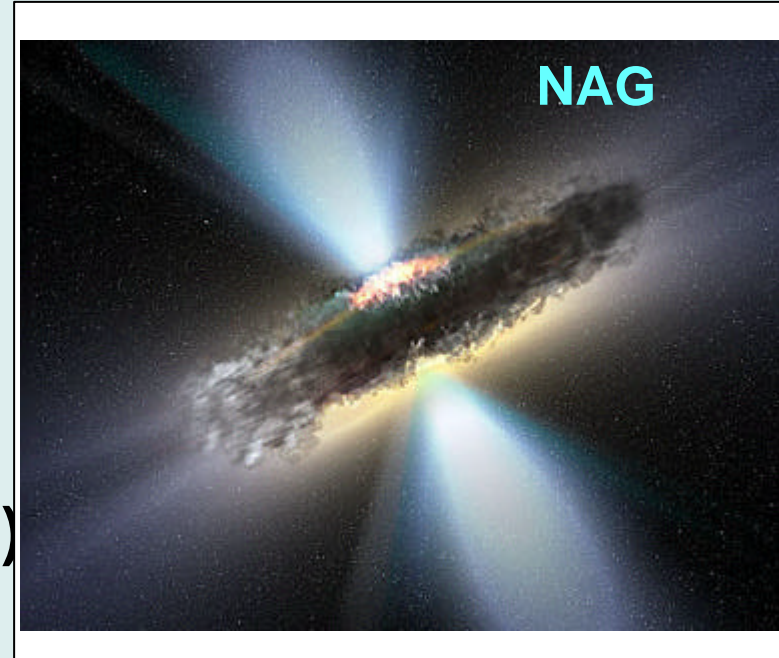
**RCUE : ~10<sup>20</sup> eV**  
**1 particule / km<sup>2</sup>.siècle**

- **Origine ?** (Bottom up ou top down)
- **Transmission ?** (coupure GZK)

# Origine des RCUE

## **Modèles astrophysiques (« bottom up »)**

- Noyau actif de galaxie
- Radio galaxie
- Sursaut gamma
- Étoile à neutron
- Trou noir chargé...

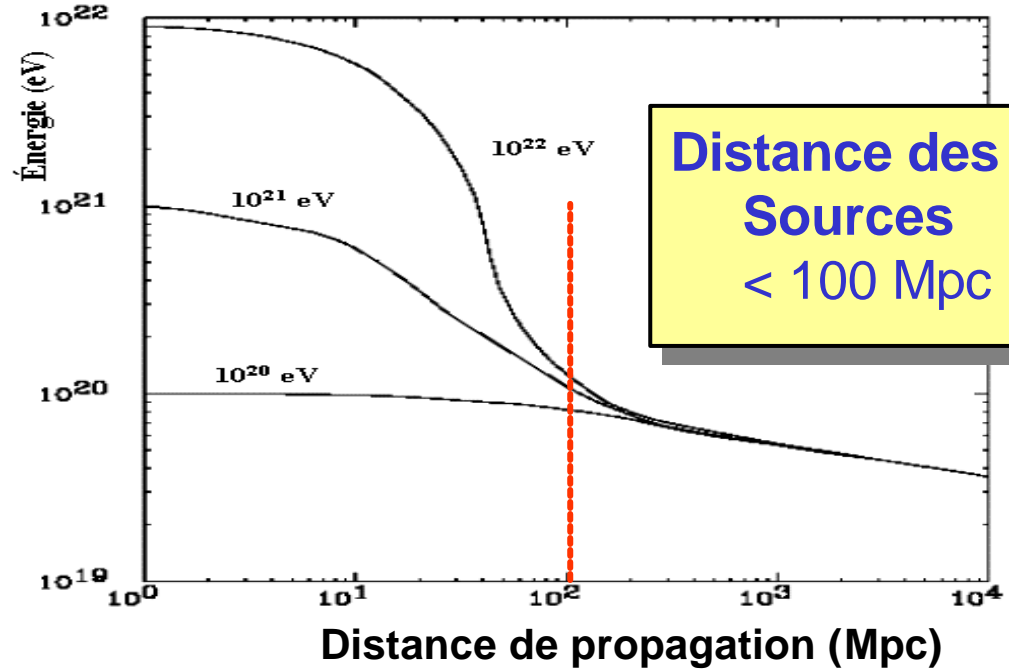
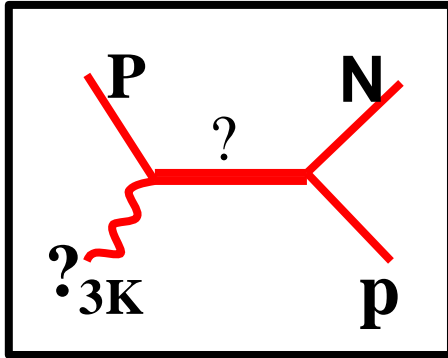


## **Nouvelles théories (« top down »)**

- particule super-massive
- Défaut topologique
- Violation de l'invariance de Lorentz
- Neutrinos

# La coupure GZK (Greisen Zatsepin Kusmin)

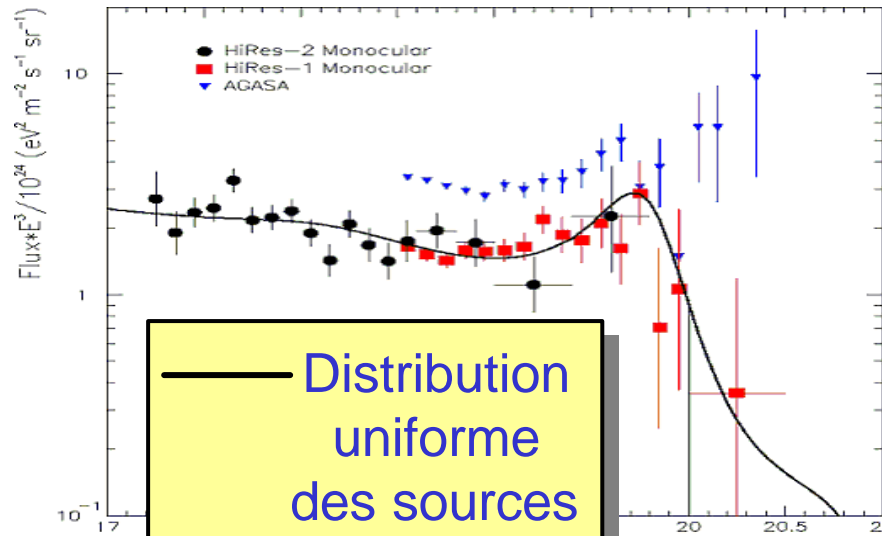
## Interaction RCUE-CMB



L'univers n'est plus transparent pour les RCUE

Distance max:  $\sim 100$  Mpc

Univers :  $\sim 4\,600$  Mpc



# Difficultés expérimentales

Évènement rare:  
1 RCUE/siècle/km<sup>2</sup>



Besoin de très  
grandes surfaces

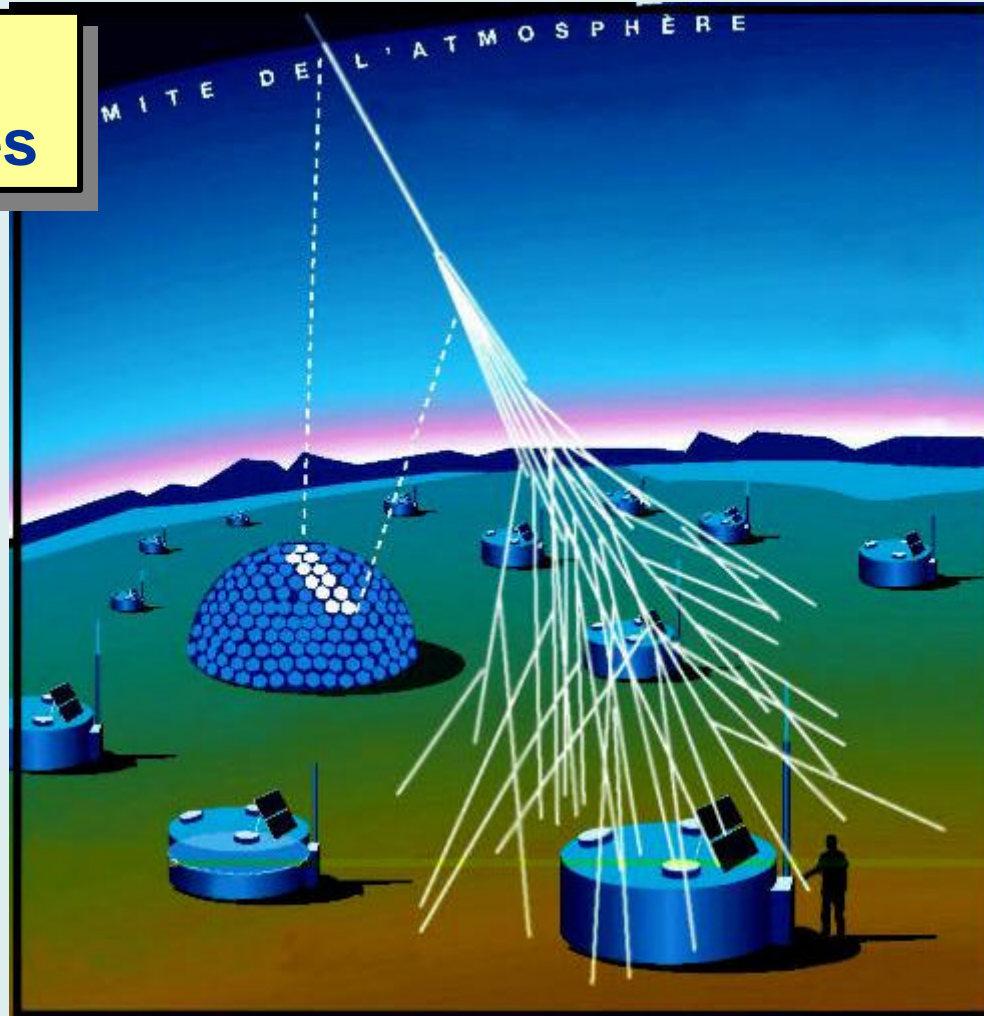
Détection indirecte grâce  
aux gerbes atmosphériques

Différentes techniques:

Fluorescence de l'air  
(**HiRes**, AUGER, EUSO, TA,...)

Chargées au sol  
(**AGASA**, AUGER, TA,...)

Radiodétection  
(CODALEMA, LOPES, AUGER?)



# Motivations

**Les RCUE existent ! Mais beaucoup d'inconnues :**  
Spectre? Coupure GZK ? Origine? Bottom up ou top down ?

**Besoin de statistique** →

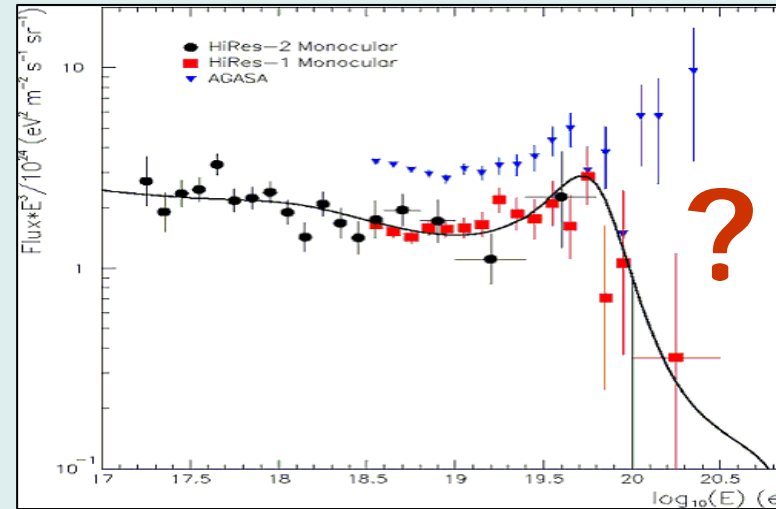
**Projet EUSO**

**Incertitude expérimentale :**

■ **HiRES**  
Fluorescence  
de l'air

?

▼ **AGASA**  
Chargées  
au sol



**Compréhension des  
systématiques** →

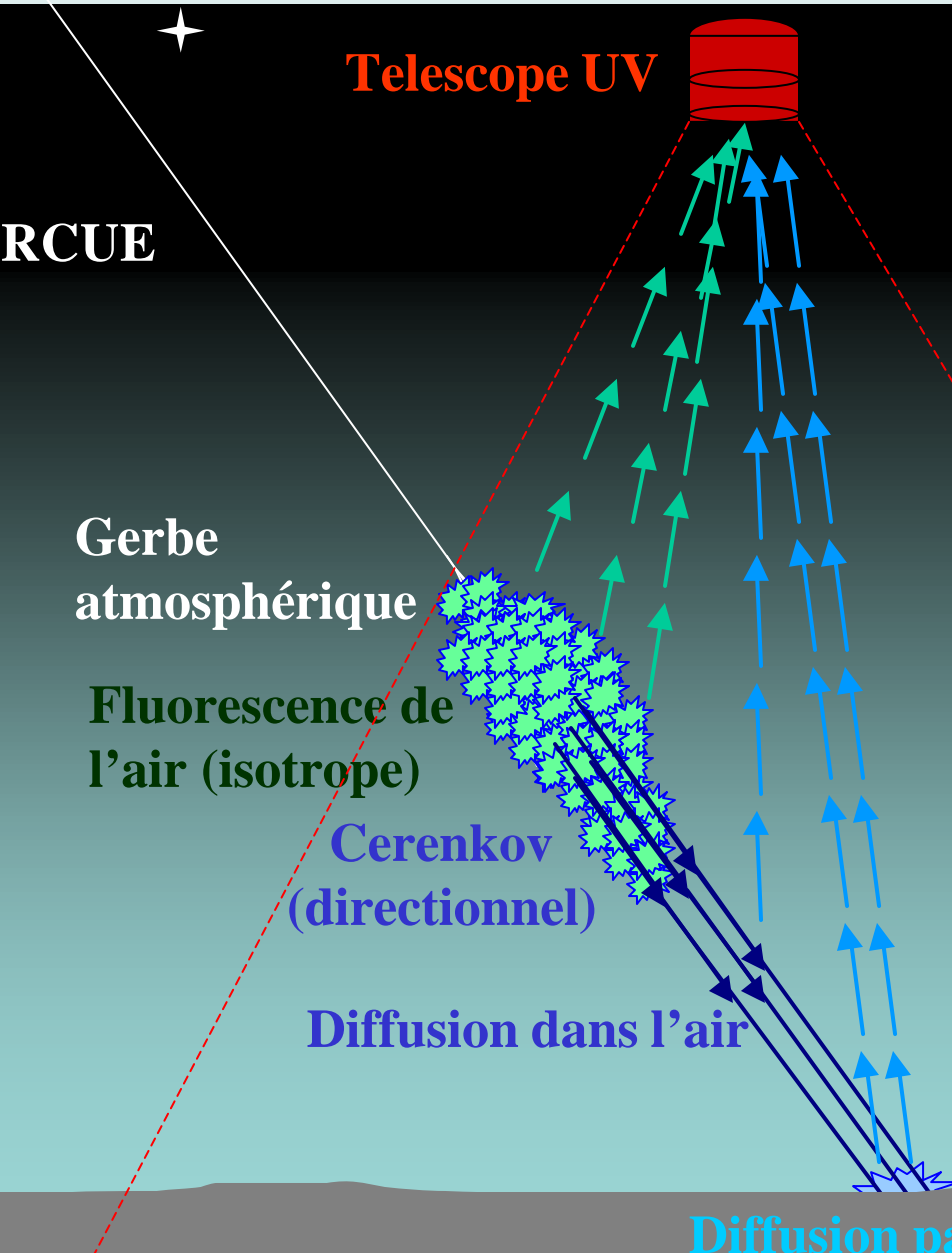
**Expérience  
MACFLY**

# Plan de l'exposé

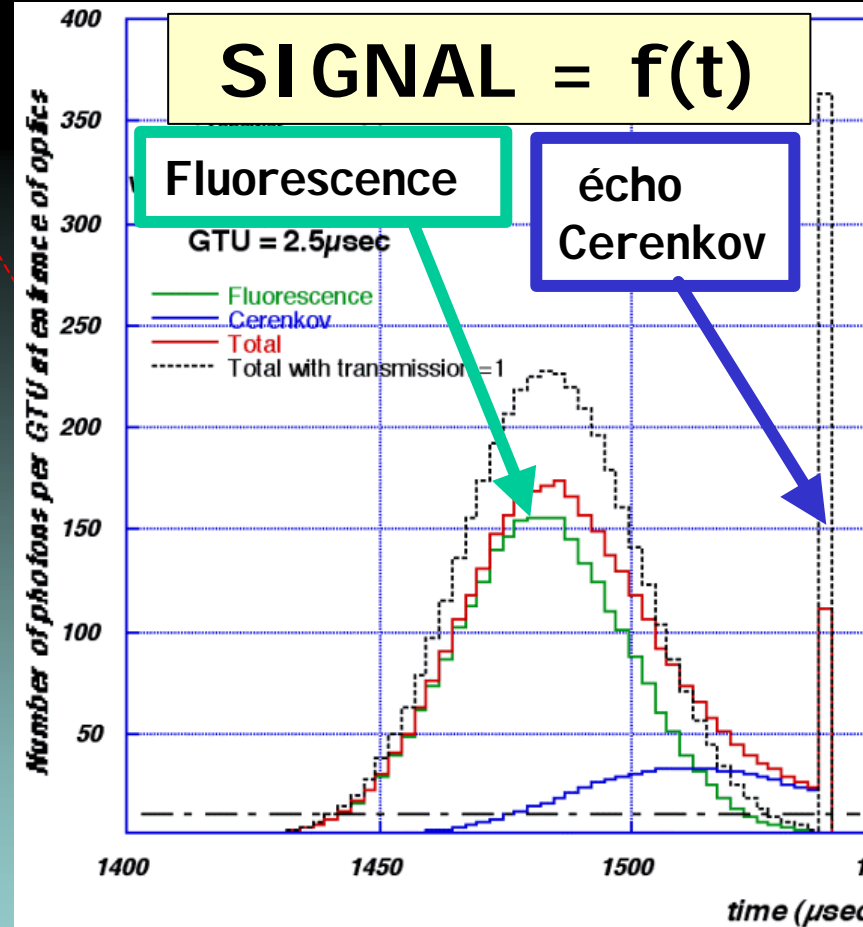
- **Contexte scientifique**
- **Le projet EUSO**
- **La reconstruction des gerbes atmosphériques**
- **La fluorescence de l'air**
- **L'expérience MACFLY**
- **Conclusion**



# Principe de l'expérience



## Simulation EUSO



# EUSO en quelques chiffres

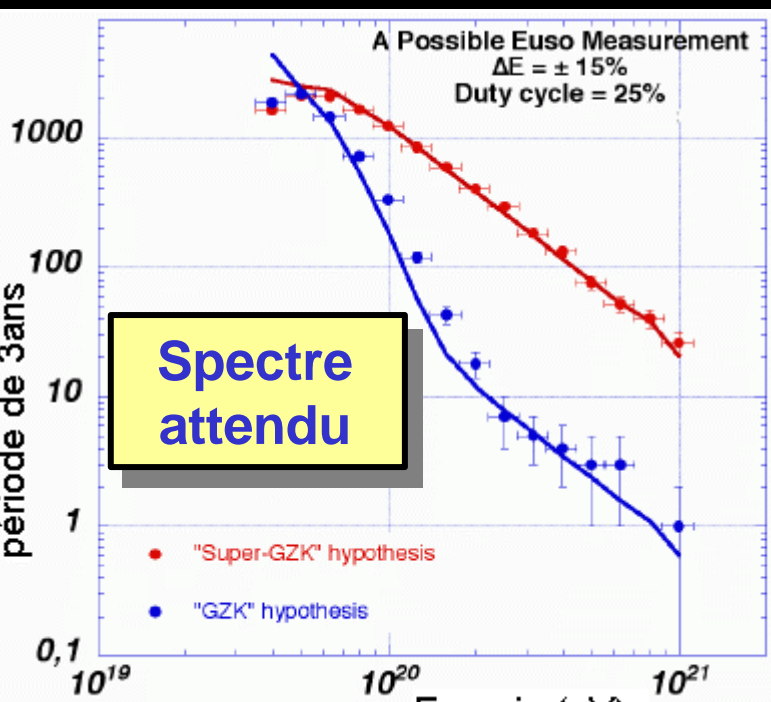
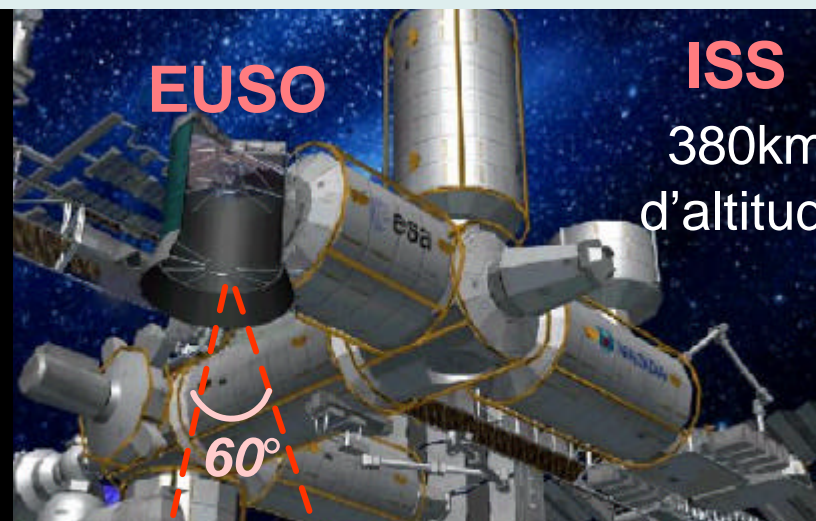
Surface effective : ~  $150\,000\text{ km}^2$

Cycle utile : 18-25%

Seuil de détection : ~  $4 \cdot 10^{19}\text{ eV}$

Nombre d'événements attendu :

~  $1000\text{ RCUE/an}$



# Plan de l'exposé

- **Contexte scientifique**
- **Le projet EUSO**
- **La reconstruction des gerbes atmosphériques**
- **La fluorescence de l'air**
- **L'expérience MACFLY**
- **Conclusion**

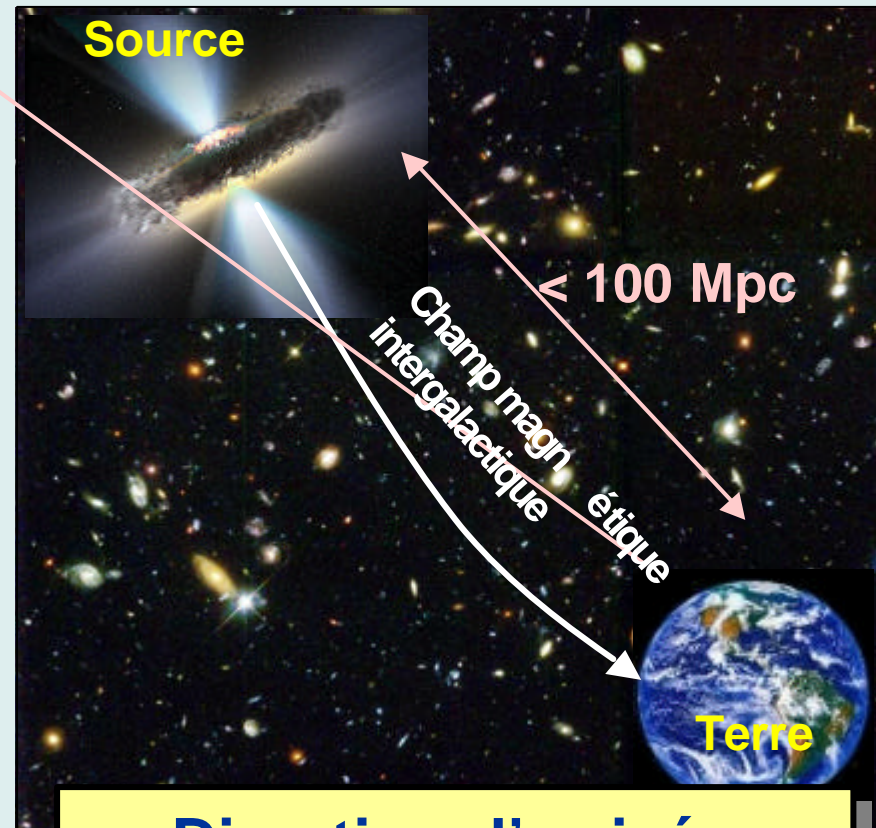
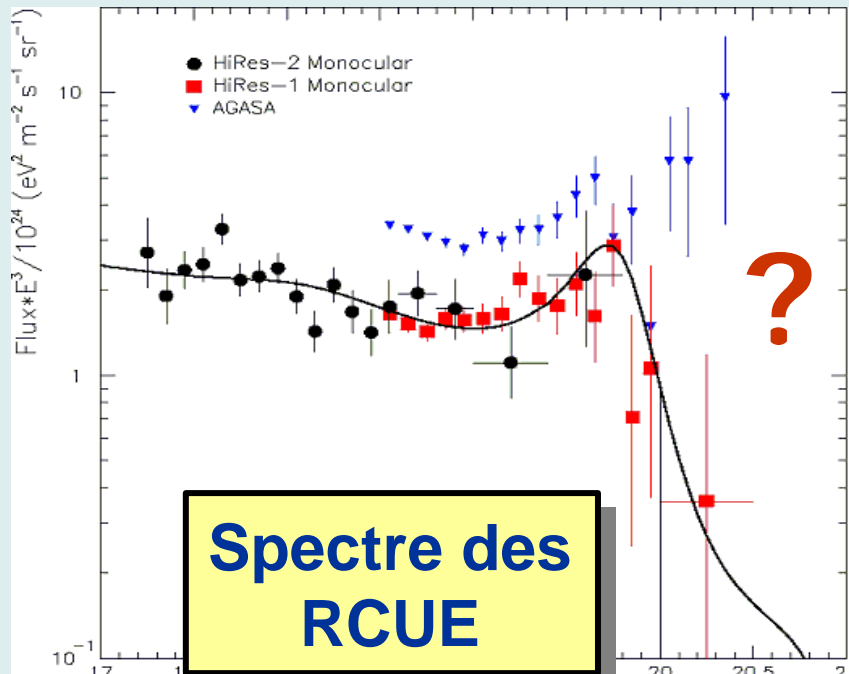
# Objectifs

Reconstruire les caractéristiques du RCUE incident

➡ Type de particule (P, Fe, gamma, neutrino)

➡ Énergie (spectre)

➡ Direction (source)

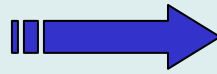


**Direction d'arrivée  
~ Position des sources**

# Paramètres d'une gerbe atmosphérique

## RCUE :

Direction



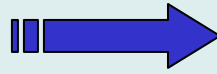
Angles (zénithal ? et azimutal  $f$  )

Type de particule



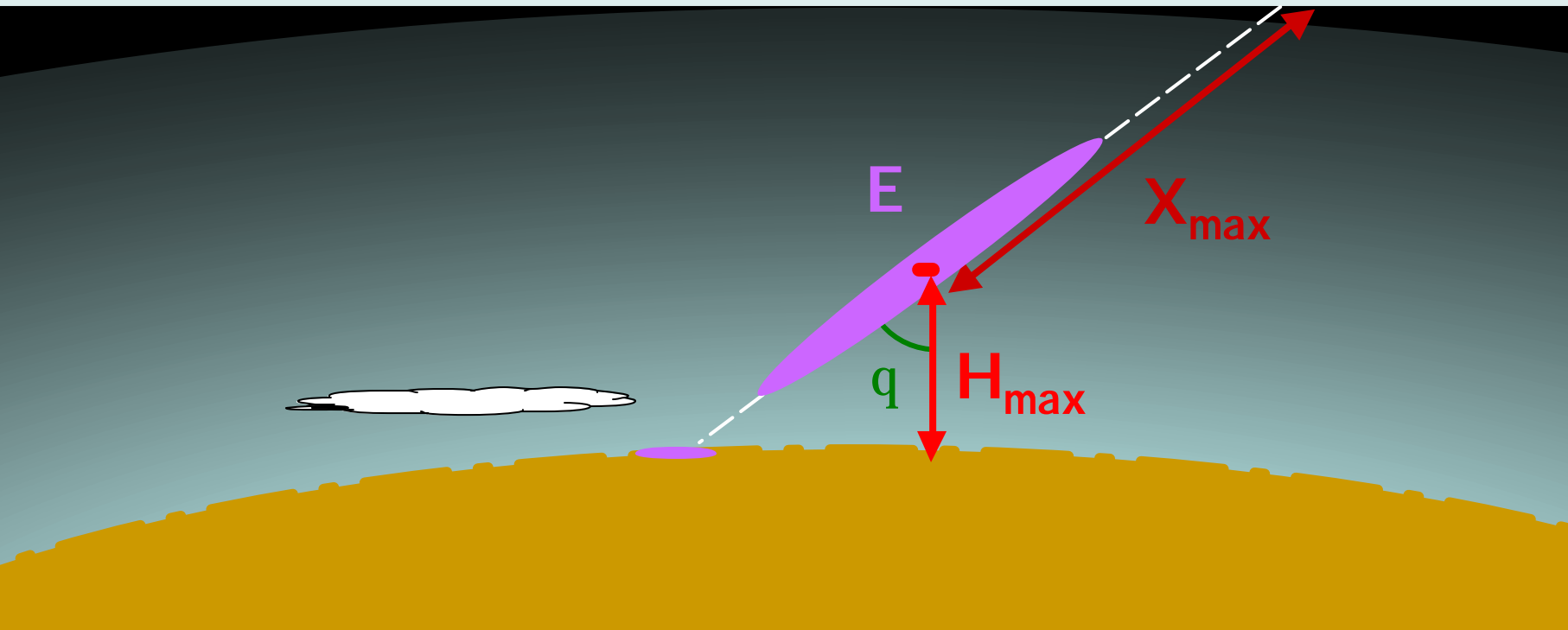
Altitude du max de la gerbe :  $H_{\max}$

Énergie



Grammage au max de la gerbe :  $X_{\max}$

Énergie totale déposée :  $E$





# Évènements détectés

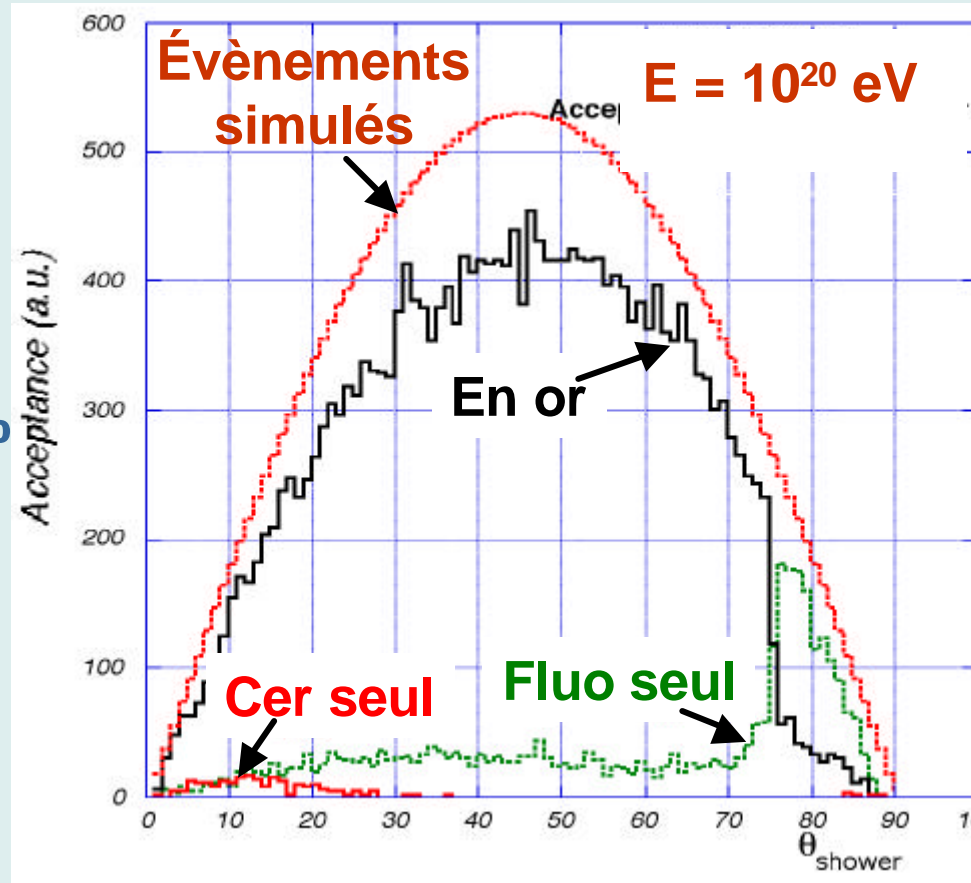
3 types d'événement :

- ➡ Fluorescence : **99%**
- ➡ Cerenkov : **88%**
- ➡ En or (Fluo+Cer) **87%**

Objectif :

Reconstruction des événements fluorescence sans information sur l'atmosphère (nuages...).

Paramètre clef : **Reconstruction de  $H_{\max}$**



Évènement en or



avec l'écho Cerenkov

Évènement fluorescence



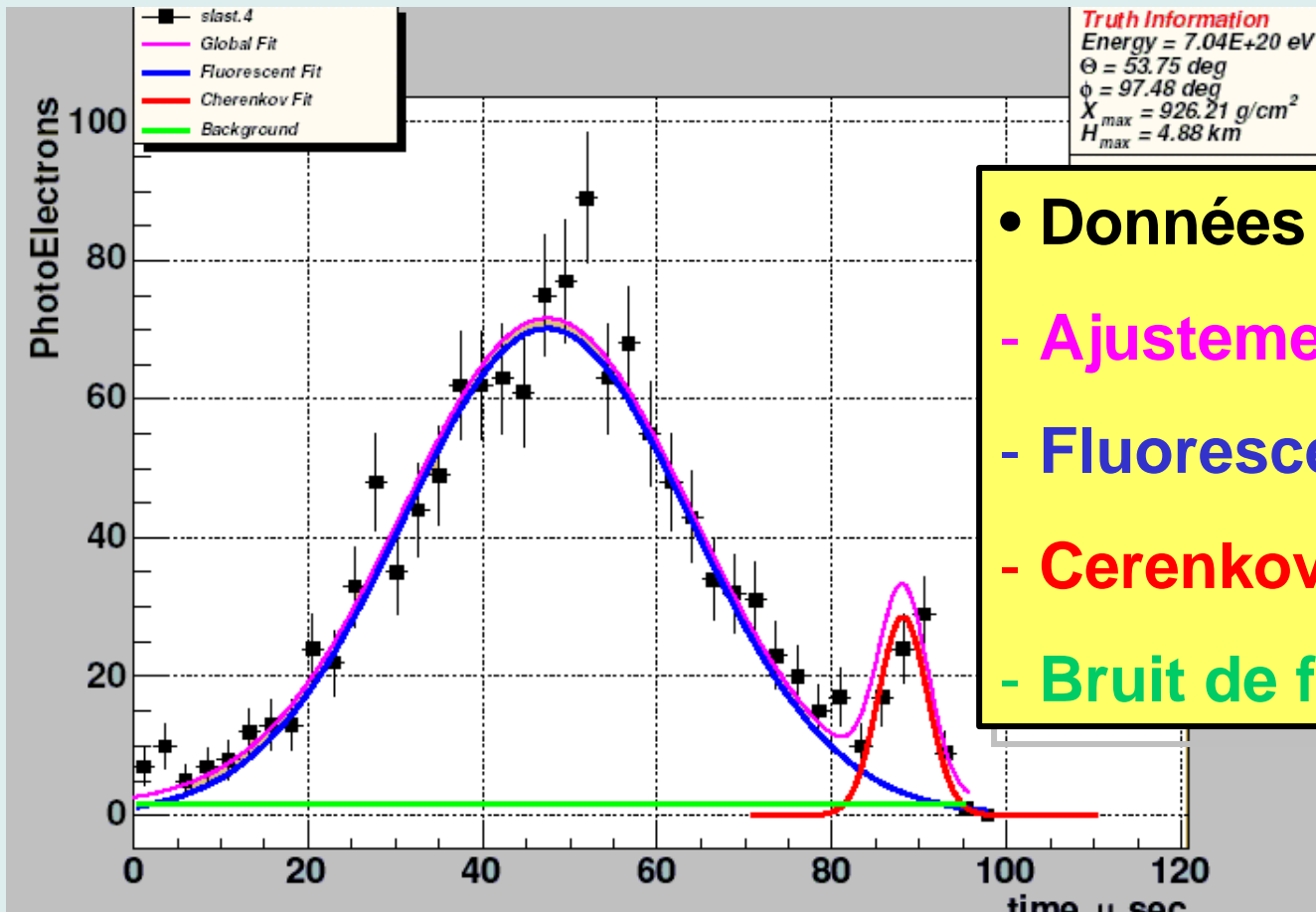
avec la forme du signal

# Données simulées

Info de base : Nombre de photons détectés par GTU : **Ni**

(GTU = Gate Time Unit  $\sim 2,5 \mu\text{s}$ )

Ajustement : 2 Gaussiennes : **Fluorescence** + **Cerenkov**  
+ 1 constante : **Bruit de fond**

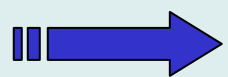


- **Données Monte-Carlo**
  - **Ajustement global**
  - **Fluorescence**
  - **Cerenkov**
  - **Bruit de fond**

# Reconstruction de $H_{\max}$ : méthode Cerenkov

(méthode classique)

Pour les évènements en or :



Utilisation de l'écho Cerenkov

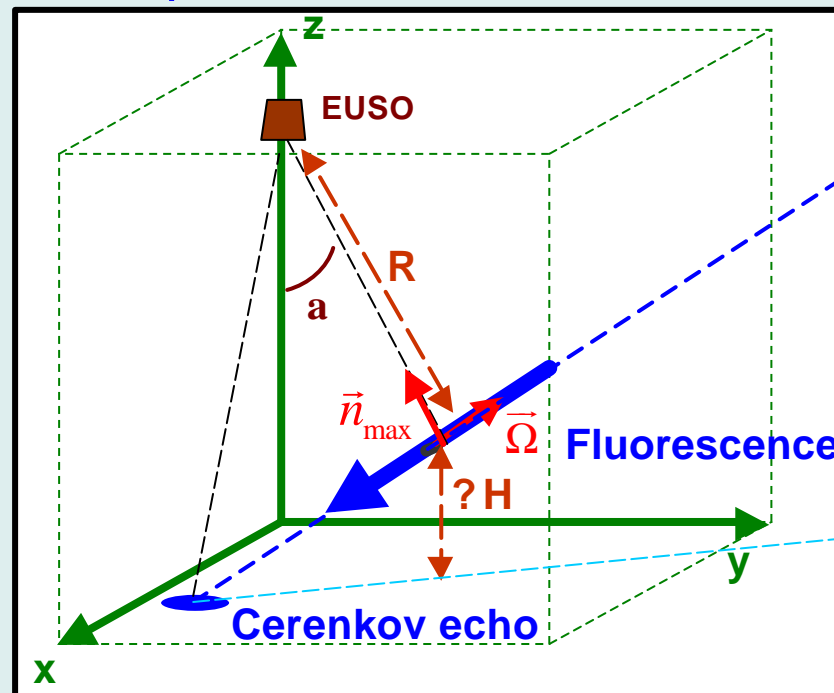
$\Delta t$  : Écart de Temps entre l'écho Cerenkov et le maximum de la fluorescence

$$? H = H_{\max} - H_{\text{cer}}$$

$$\frac{\Delta H}{\cos \mathbf{q}} = \frac{c\Delta t}{2} \frac{c\Delta t + 2R}{c\Delta t + R(1 + \vec{n}_{\max} \cdot \vec{\Omega})}$$

$$? H$$

$$H_{\max} = ? H + H_{\text{cer}}$$



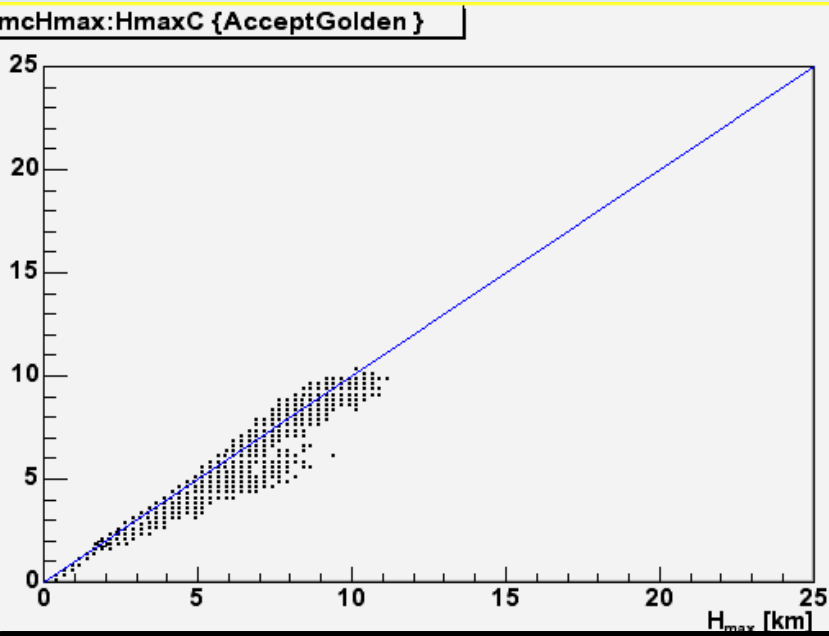
**Inconvénient :**

**Besoin de connaître l'altitude de l'écho :  $H_{\text{cer}}$**

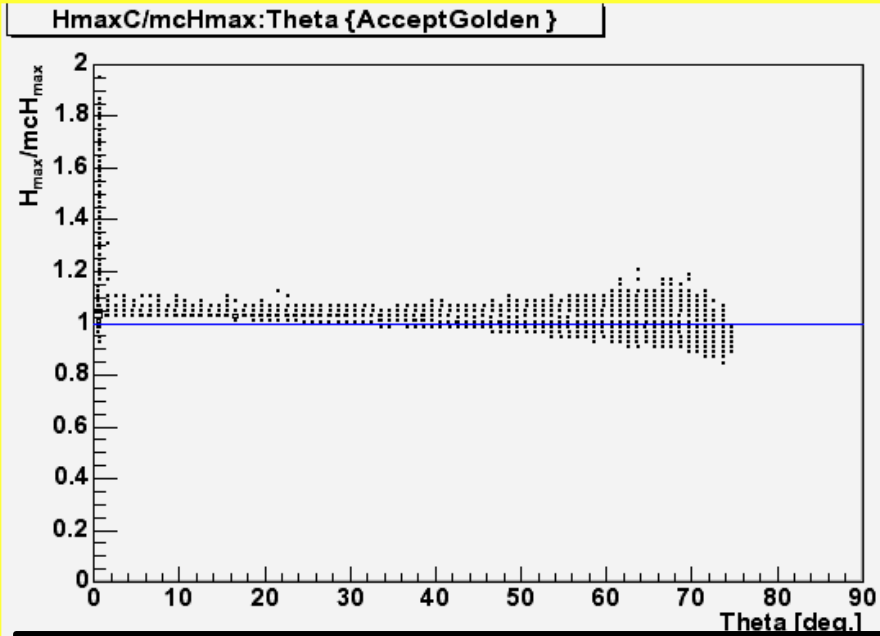


# Reconstruction de $H_{\max}$ : méthode Cerenkov

## Test de la méthode:



$H_{\max}$  reconstruit vs  $H_{\max}$  simulé



$H_{\max}$  reco /  $H_{\max}$  simu ( $q$ )


**Erreur relative  $< 10\%$  for  $q < 60^\circ$**

**Méthode performante pour les petits angles  $q$   
(inadaptée aux Gerbes horizontales)**

# Reconstruction de $H_{\max}$ : Forme du signal

(méthode originale)

Pour les évènements Fluorescence :

**Signal de Fluo.**   **$N_i = \#$  photons détectés par GTU**

$$N_i = e_{EUSO} \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot Y \cdot h \cdot N_{e^-} \cdot \Delta L_{GTU}$$

efficacité  
d'EUSO

angle  
solide

production de  
lumière par Fluo.  
**# photons par mètre  
de trace chargée**

transmission

# particules chargées dans  
la tranche de gerbe  $\Delta L$

longueur parcourue  
par la gerbe par GTU

# Reconstruction de $H_{\max}$ : Forme du signal

(méthode originale)

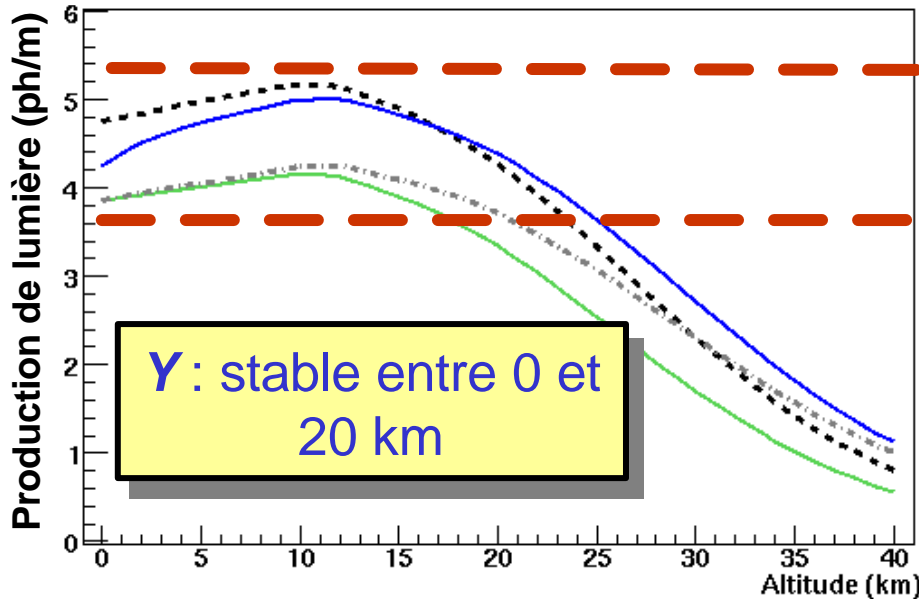
Pour les évènements Fluorescence :

Signal de Fluo.  $\Rightarrow$   $N_i = \#$  photons détectés par GTU

$$N_i = \underbrace{e_{EUSO} \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot Y \cdot h}_{\text{varie peu avec l'altitude}} \cdot N_{e^-} \cdot \Delta L_{GTU}$$

varie peu avec l'altitude  $\Rightarrow$   $N_i \propto N_e$

$Y$  : # photons de Fluo. par mètre de trace chargée



Au max de la gerbe :

$N_e = N_e^{\max} = \text{constante}$

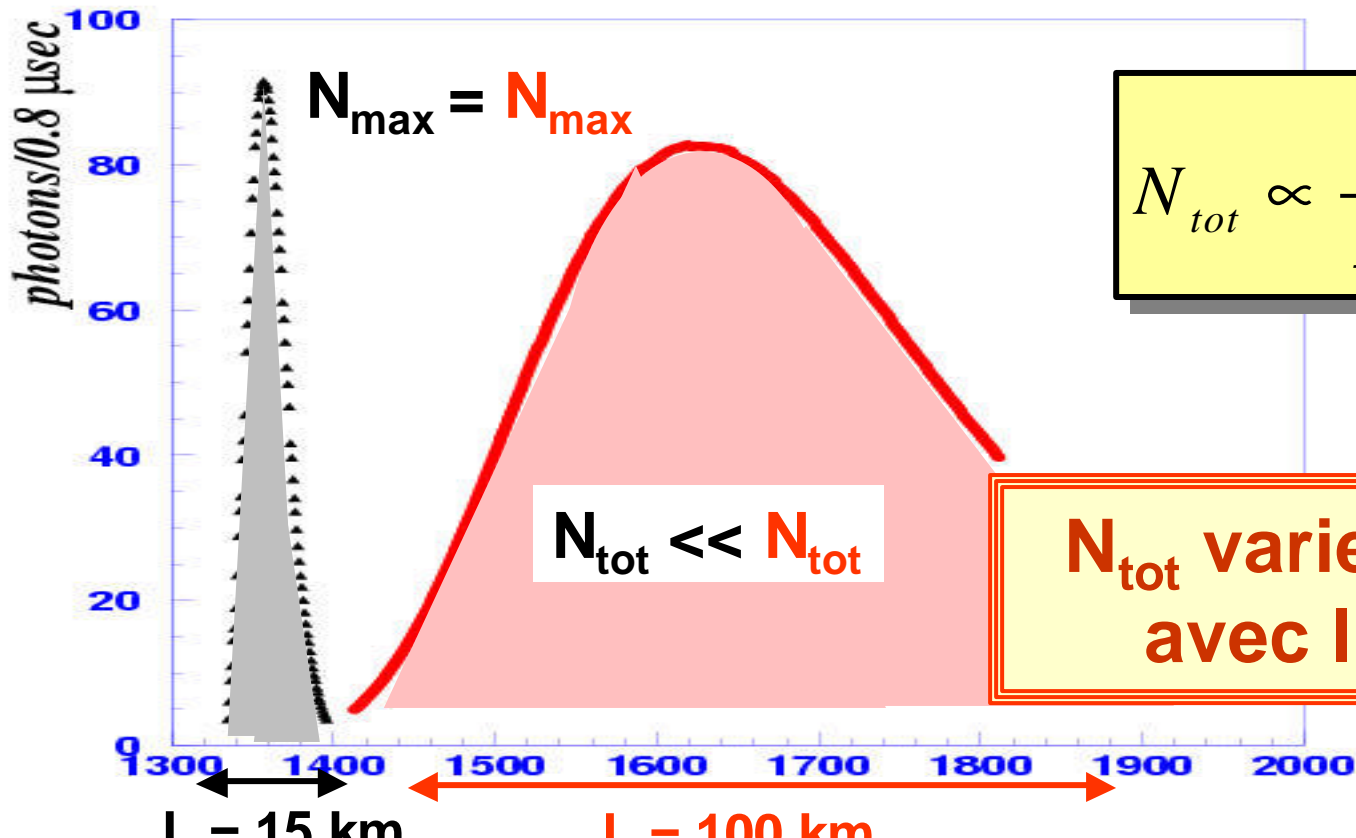
$N_{\max}$  est indépendant de l'altitude !

# Reconstruction de $H_{\max}$ : Forme du signal

$N_{\text{tot}}$  = # total de photons détectés :  $N_{\text{tot}} \propto N_i$

$N_{\text{tot}} \propto \mu$  longueur de la gerbe  $\propto \mu$  durée du signal

Exemple : gerbes horizontales d'altitude 5 km et 20 km

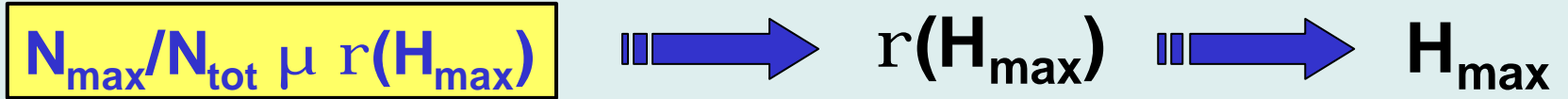


$$N_{\text{tot}} \propto \frac{1}{r(h)} \propto e^{\frac{h}{H_0}}$$

( $H_0 = \sim 8$  km)

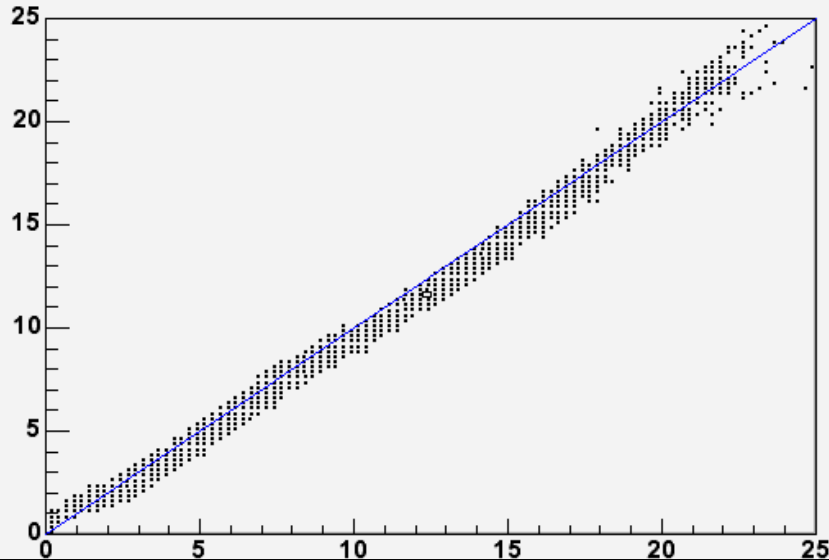
$N_{\text{tot}}$  varie fortement avec l'altitude!

# Reconstruction de $H_{\max}$ : Forme du signal



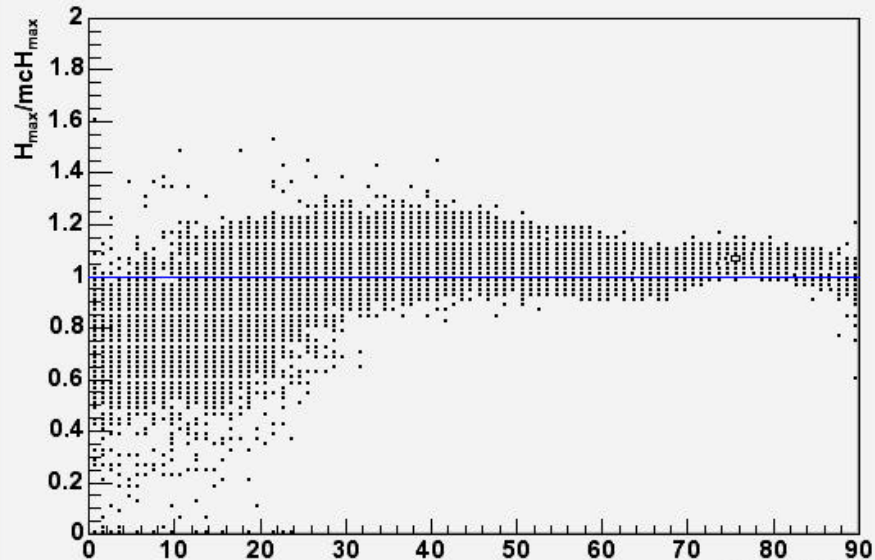
## Test de la méthode:

mcHmax:Hmax {AcceptFluorescence\*Aweight\*Eweight}



$H_{\max}$  reconstruit vs  $H_{\max}$  simulé

Hmax/mcHmax:Theta {AcceptFluorescence\*Aweight\*Eweight}



$H_{\max}$  reco /  $H_{\max}$  simu ( $q$ )

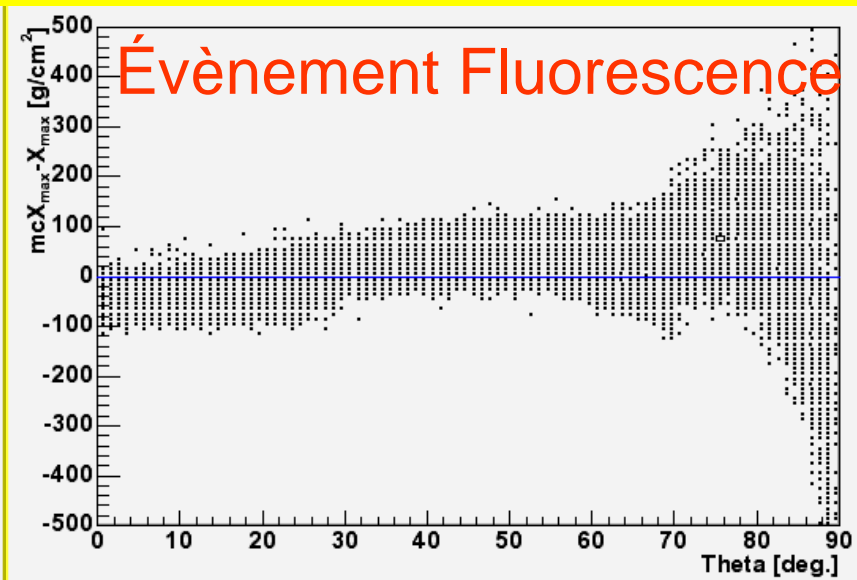
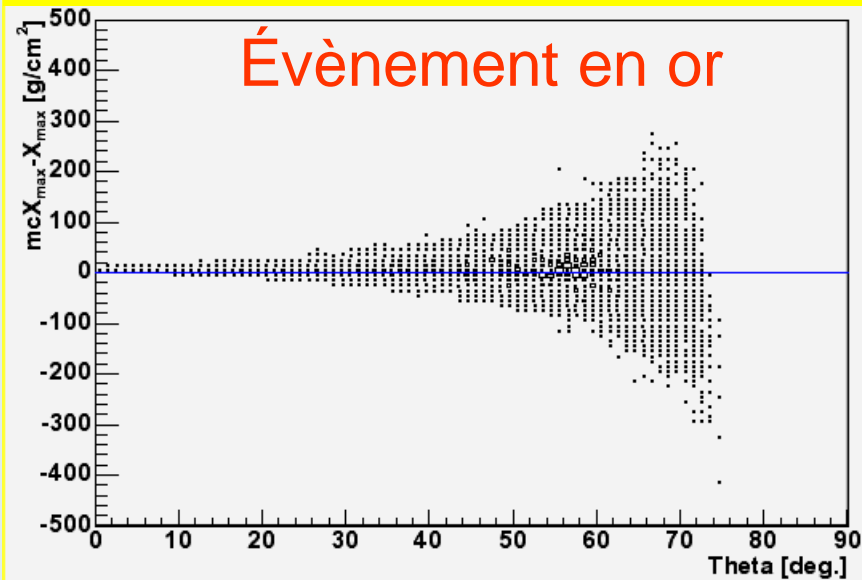
Erreur relative  $<10\%$  for  $q > 60^\circ$

Méthode performante pour les grands angles  $q$ .  
Mesure des Gerbes horizontales possible

# Reconstruction de $X_{\max}$

$$X_{\max} = \int_{H_{\max}}^{\infty} \rho(h) \left( 1 - \sin^2 \theta \left( \frac{R_{\oplus} + H_{\max}}{R_{\oplus} + h} \right)^2 \right)^{-1/2} dh$$

$(X_{\max}$  reconstruit –  $X_{\max}$  simulé) (T) en g/cm<sup>2</sup>



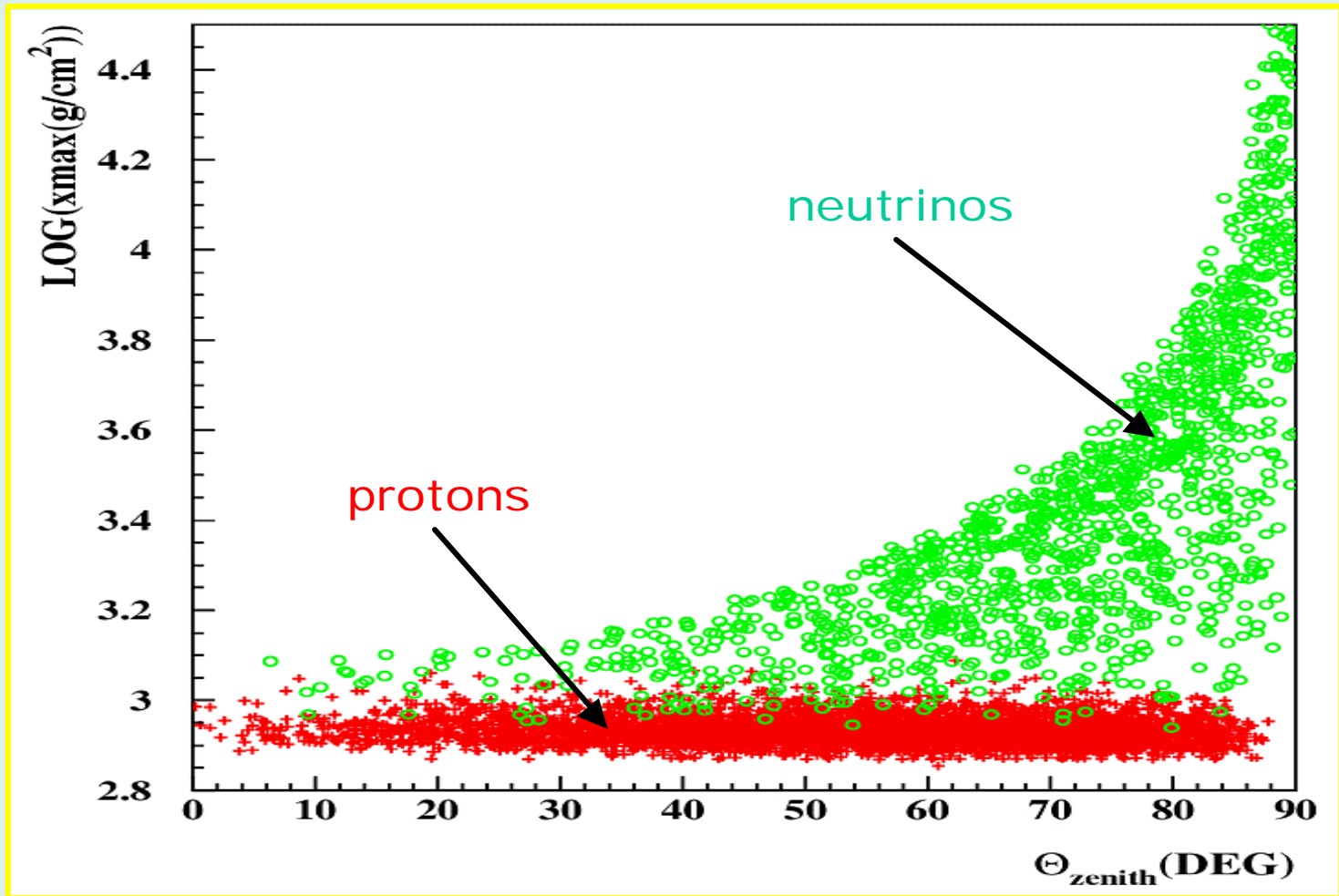
$H_{\max}$  reconstruit grâce à l'écho Cerenkov

Erreur < 5% for  $q < 50^\circ$

$H_{\max}$  reconstruit grâce à la forme du signal de Fluo.

Erreur ~ 10 %

# X<sub>max</sub> des neutrinos ultra énergétiques



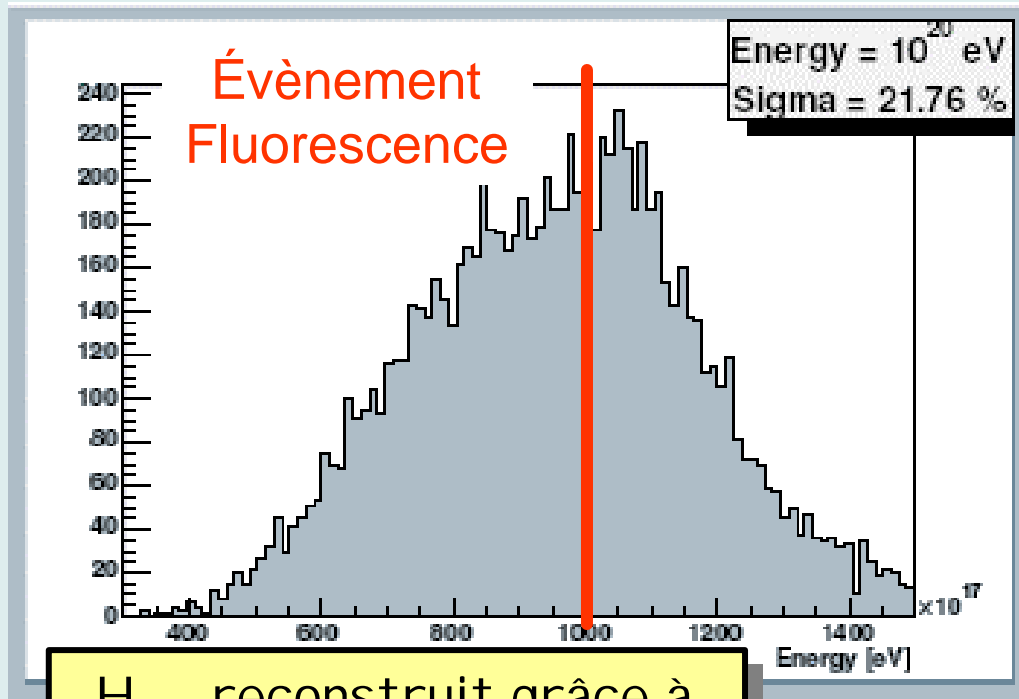
**Les neutrinos observables produisent des gerbes horizontales sans écho Cerenkov**

# Reconstruction de l' énergie

$$N_{\max} = \left( \mathbf{e}_{EUSO} \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot Y \cdot \mathbf{h} \right)_{i_{\max}} \cdot N_{e^-}^{\max} \cdot \Delta L_{GTU}$$

$$\text{Modèle de GIL : } N_{e^-}^{\max} = \frac{E}{1,45 \text{ GeV}}$$

## Test de la méthode:



$H_{\max}$  reconstruit grâce à la forme du signal de Fluo.

Pour des protons de  $10^{20}$  eV :

$$s E_{\text{reco}} / E_{\text{simu}} = 22\%$$




# Conclusion

**Reconstruction des gerbes depuis l'espace possible !**

**Deux méthodes complémentaires :**

- **Utilisant l' écho Cerenkov ( $q < 50^\circ$ )**
  - Besoin d'info complémentaires (nuages, relief...)
- **Utilisant seulement la forme du signal ( $q > 50^\circ$ )**
  - Performante pour les gerbes horizontales
  - Permet la mesure des neutrinos ultra énergétiques.

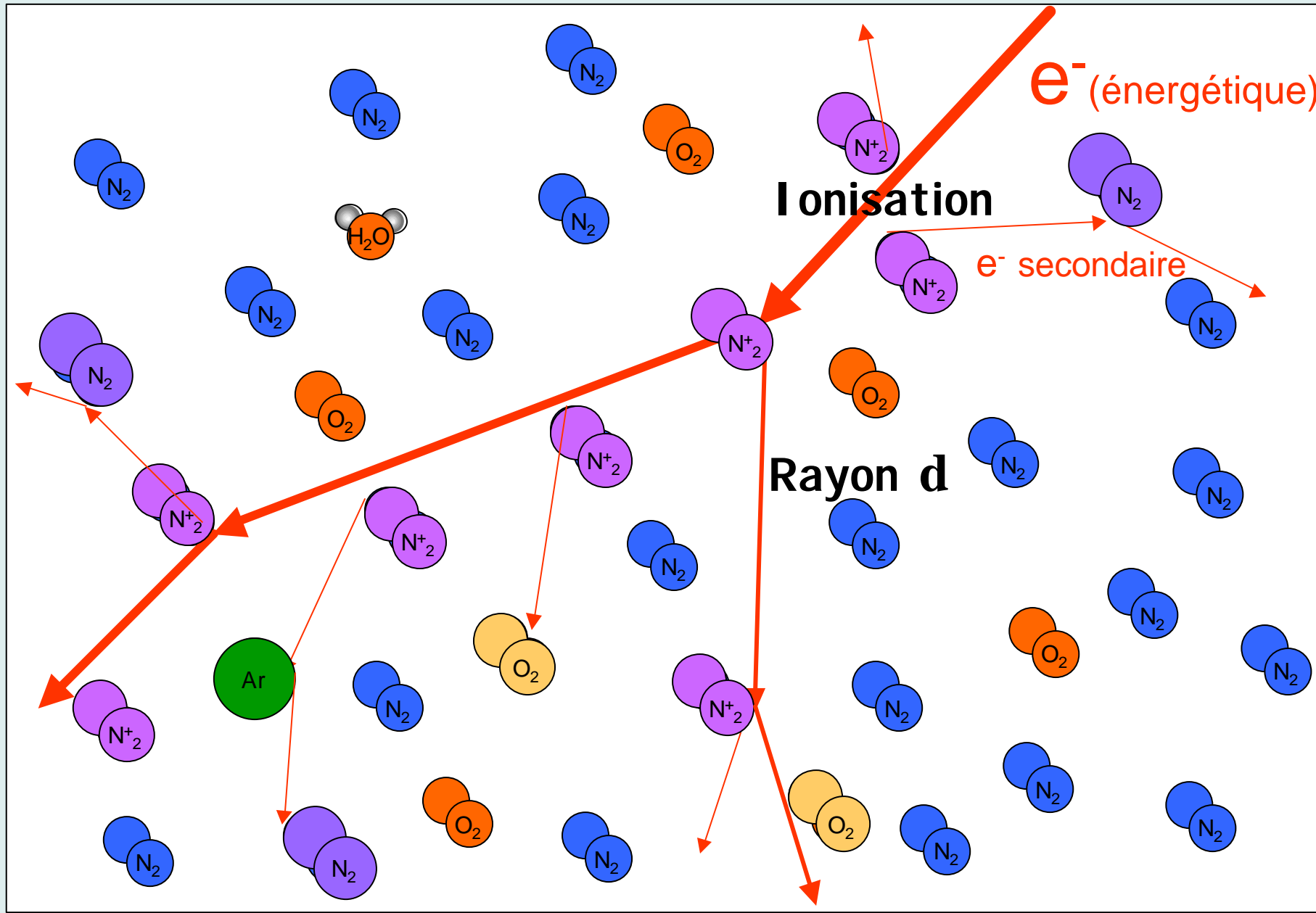
**Pendant ma thèse  1<sup>er</sup> test de la méthode (programme indépendant)**

**Notre méthode est maintenant implémentée dans la reconstruction officielle d'EUSO (ESAF)**

# Plan de l'exposé

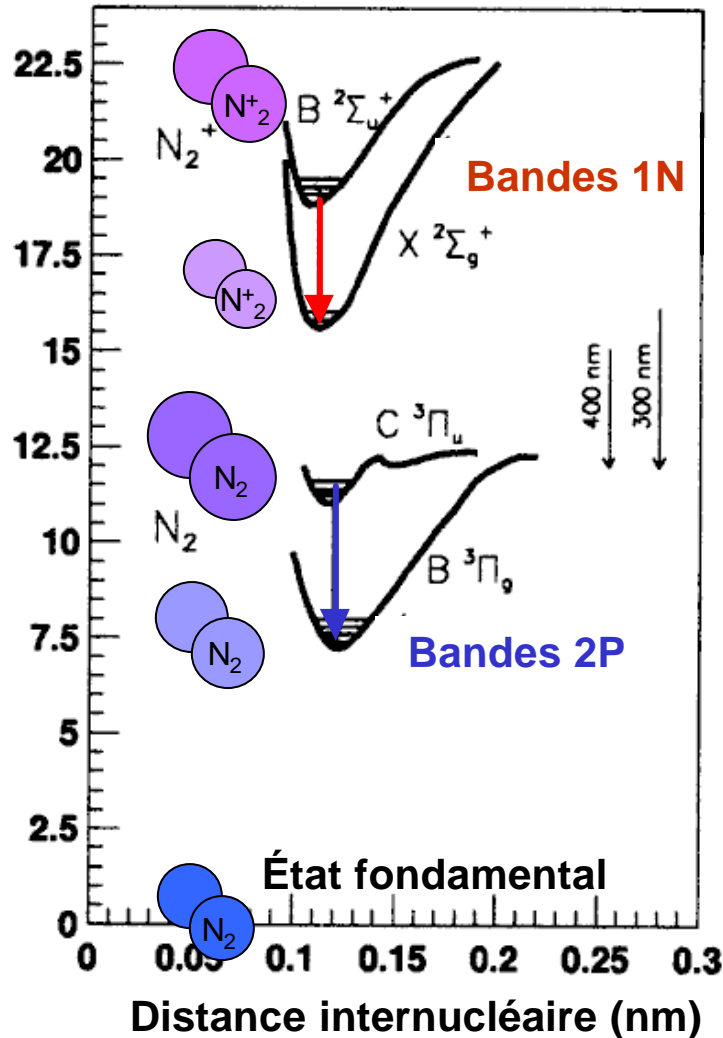
- **Contexte scientifique**
- **Le projet EUSO**
- **La reconstruction des gerbes atmosphériques**
- **La fluorescence de l'air**
- **L'expérience MACFLY**
- **Conclusion**

# Excitation de l'air par un électron



# Fluorescence du diazote

## Spectre de bandes entre 290 et 440 nm

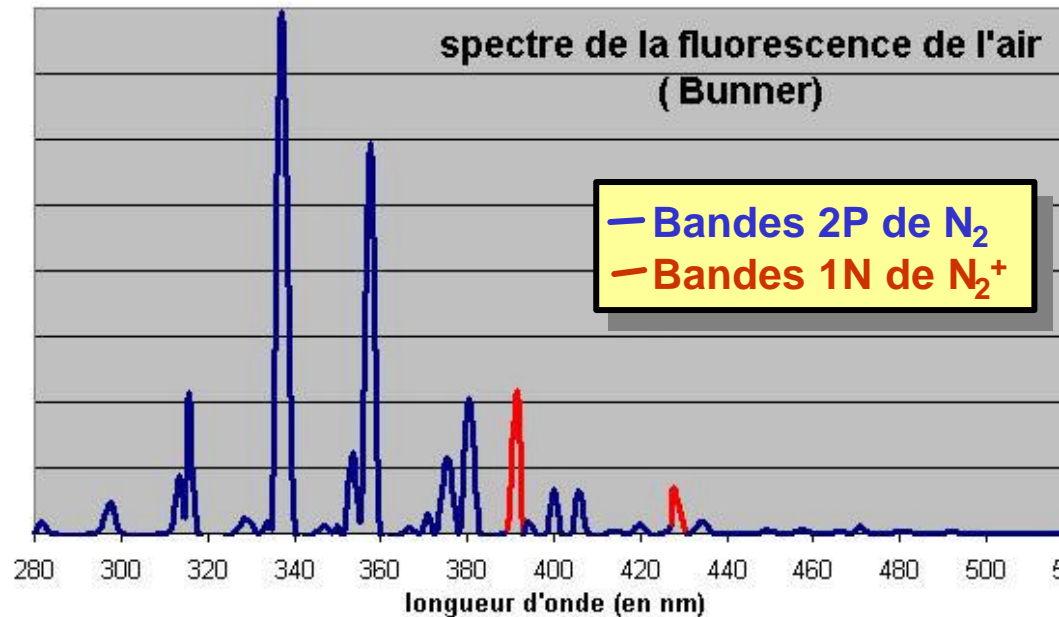


➡ Systèmes 1N de  $N_2^+$  et 2P de  $N_2$

Raies principales

- 2P(1-0) à 315,9 nm
- 2P(0-0) à 337,1 nm
- 2P(0-1) à 357,7 nm
- 2P(0-2) à 380,5 nm
- 1N(0-0) à 391,4 nm

(?-' ) : états de vibration



# Production de lumière

Énergie lumineuse :  $h \cdot E_{déposée}$  ( ? rendement de la Fluo.)

**FLY** : Production de lumière par fluorescence en photon

$$FLY_1 = \frac{h_1 \cdot E_{déposée}}{E_1}$$

**FLY/l** : Production de lumière par unité de longueur

$$FLY_1 / l = \frac{h_1}{E_1} \cdot \frac{dE}{dX} \cdot \text{densité}$$

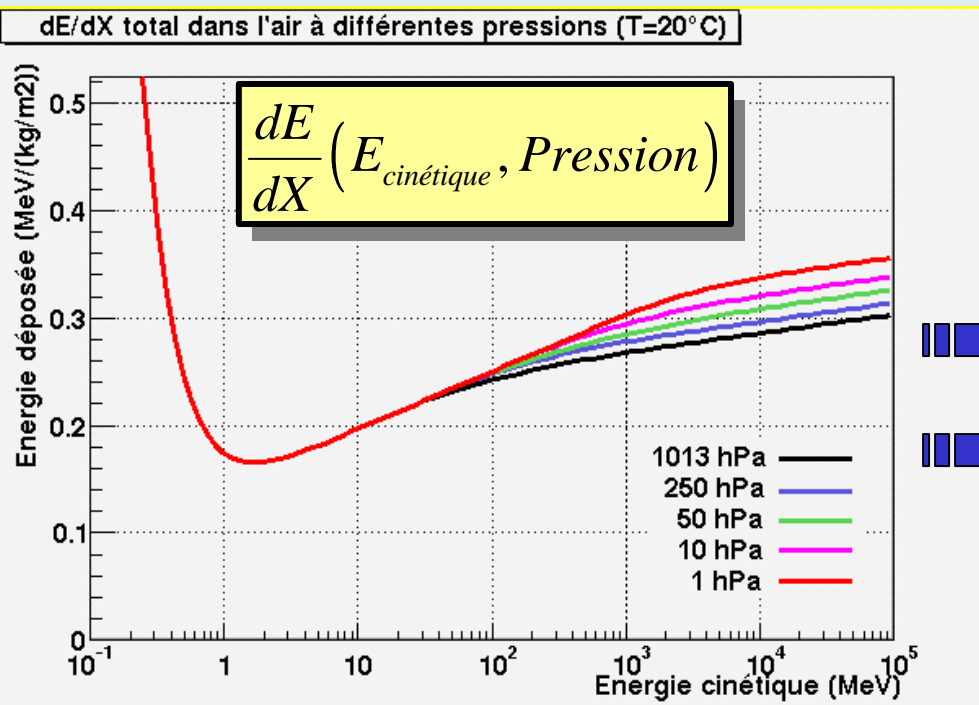
**FLY/E** : Prod. de lumière par unité d'énergie déposée

$$FLY_1 / E = \frac{h_1}{E_1}$$

# Excitation de l'air

Hypothèse : # molécules excitées  $\propto$  énergie déposée

- Énergie perdue par la particule =  $\frac{dE}{dX} \cdot \text{densité}$



Varie en fonction de :

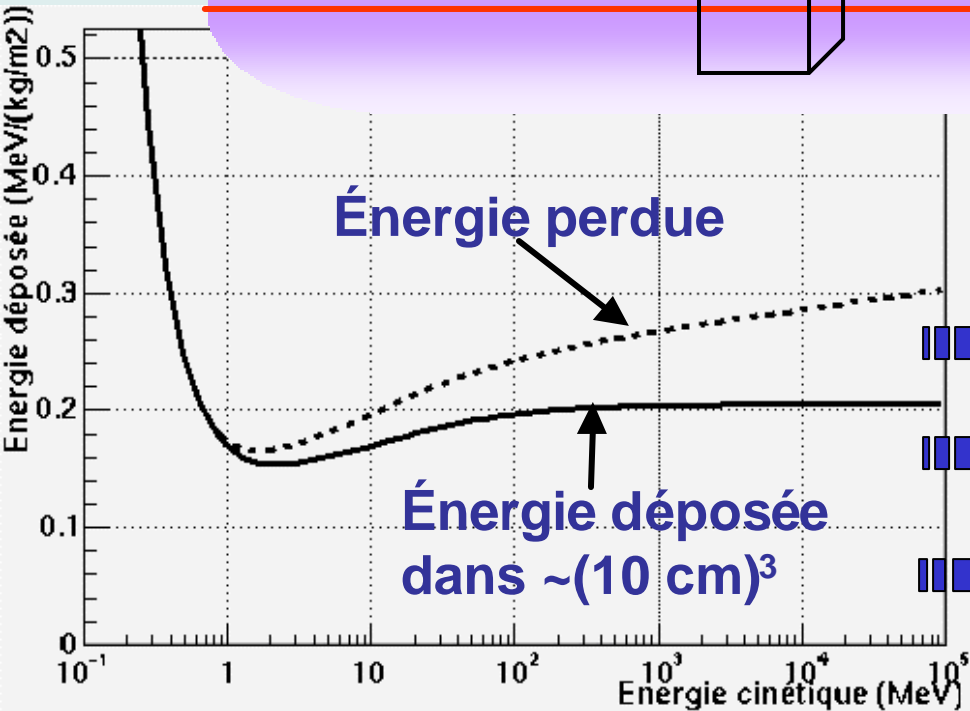
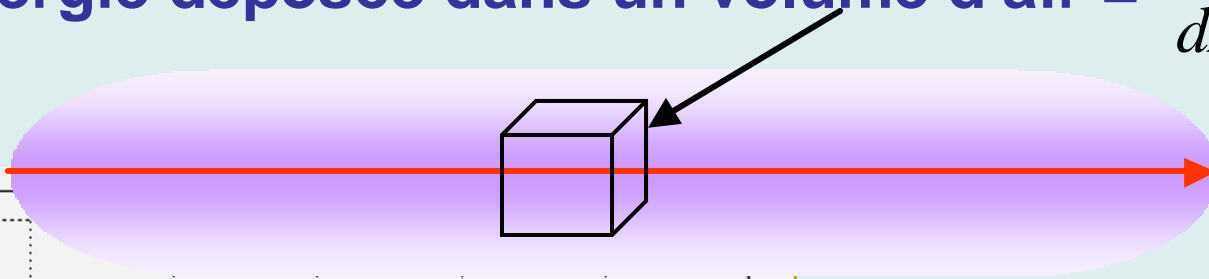
➡ Particules excitatrices

➡ Conditions atmosphérique

# Excitation de l'air

Hypothèse : # molécules excitées  $\propto$  énergie déposée

- Énergie perdue par la particule =  $\frac{dE}{dX} \cdot \text{densité}$
- Énergie déposée dans un volume d'air =  $\left. \frac{dE}{dX} \right|_{E_T < E_{\text{seuil}}} \cdot \text{densité}$

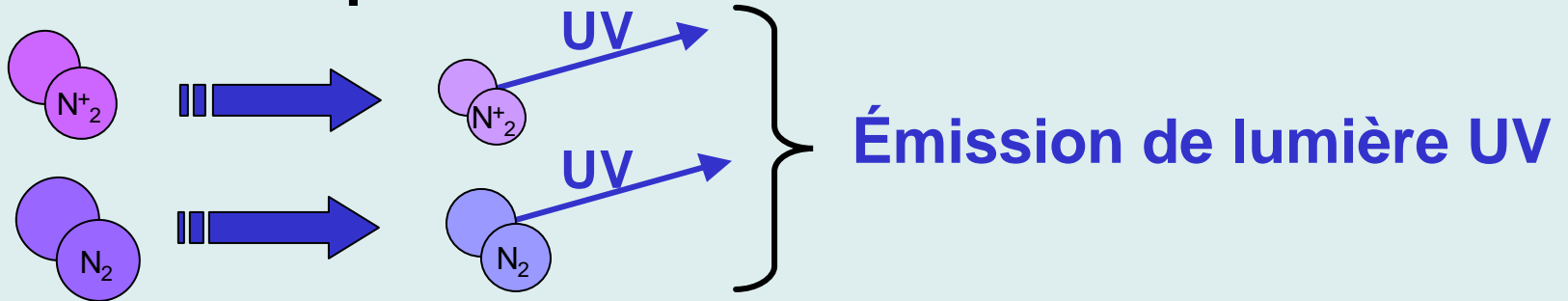


Varie en fonction de :

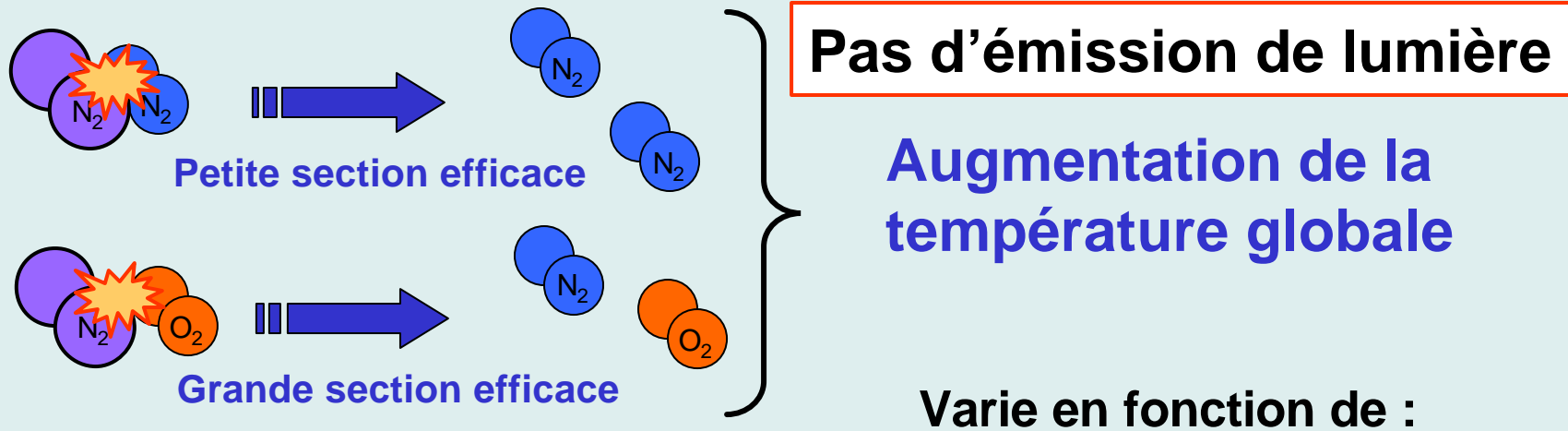
- ▶ Particules excitatrices
- ▶ Conditions atmosphériques
- ▶ Volume considéré

# Désexcitation de l'air

## Désexcitation par fluorescence:



## Désexcitation par collision:



**Compétition entre les différents processus:**

Varie en fonction de :

- Pression et température
- Composition (humidité)
- États excités (longueur d'onde)



# Dépendances

## > Condition atmosphérique :

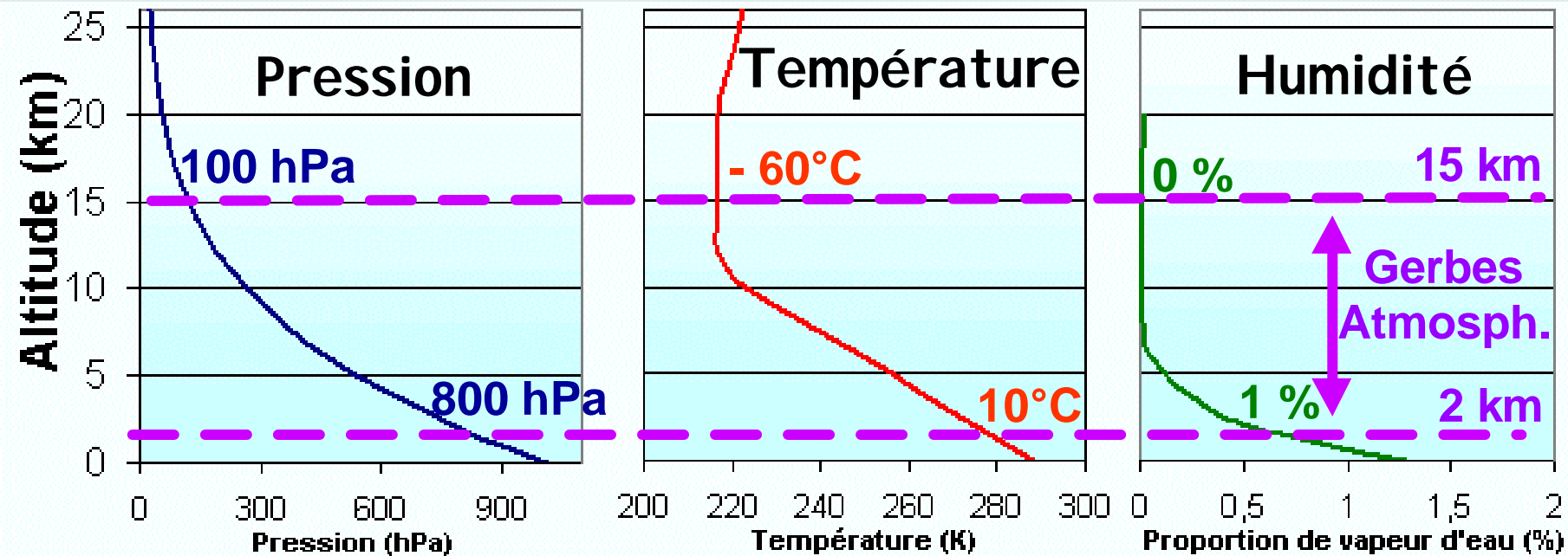
- La pression ( 0 à 1 atm )
- La température
- La composition de l'air ( $O_2$ , Ar, humidité...)

## > Source d'excitation :

- L'énergie des particules
- La densité des particules
- La nature des particules ( $e^-$ , ?,  $\pi$ ,  $p$ ...)
- L'âge de la gerbe
- La présence de rayonnement Cerenkov.

- bien mesurée
- qq mesures
- aucune mesure

# Modèle de la fluorescence de l'air



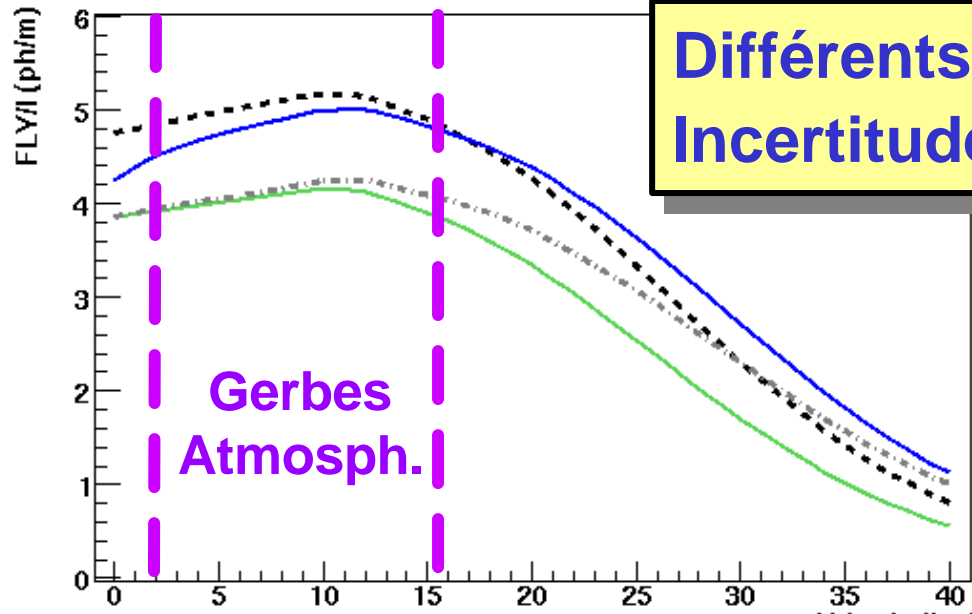
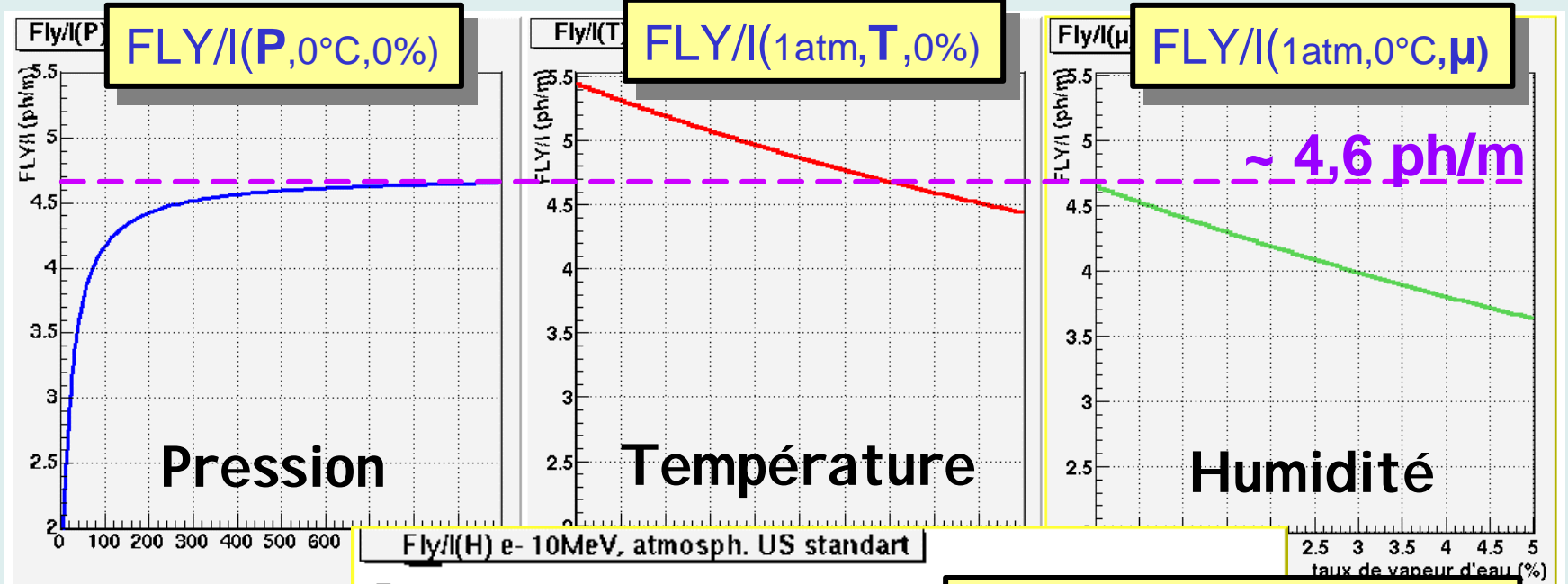
## Nouveau Modèle :

Extension du modèle de Bunner pour tout mélange  $N_2/O_2/H_2O$

➡ Modélise la variation de la FLY avec l'humidité

$$\text{Rendement : } h_1(P, T, \mu) = \frac{h_{01}^{airsec} \left(1 - \frac{18}{29} \mu\right)}{1 + P \left( \frac{(1 - \mu)}{P_{e(20^\circ C)}^{airsec}} + \frac{\mu}{P_{e(20^\circ C)}^{H_2O}} \right) \sqrt{\frac{293,15}{T}}}$$

# Modèle de la fluorescence de l'air



**Différents modèles**  
**Incertitude :  $\sim 20\%$**

# Nouvelles Mesures

## Workshop sur la fluorescence de l'air :

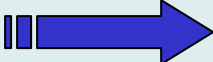
- FIWAF02(USA), AirLight03(Allemagne), **IWFM05**(France).

## Expériences intéressées :

- HiRes, AGASA,
- Auger, TA,
- EUSO, OWL, TUS...



## Motivations :

- Incompatibilité HiRes/AGASA
- Mesurer les dépendances inconnues
- Comprendre les systématiques  **Objectif : <10%**

# Plan de l'exposé

- **Contexte scientifique**
- **Le projet EUSO**
- **La reconstruction des gerbes atmosphériques**
- **La fluorescence de l'air**
- **L'expérience MACFLY**
- **Conclusion**



# Measurement of Air Cerenkov and Fluorescence Light Yield

<http://www.lapp.in2p3.fr/MACFLY/>

## Collaboration :

LAPP (France) : Patrick NEDELEC, Pierre COLIN;

LIP (Portugal) : Antonio ONOFRE;

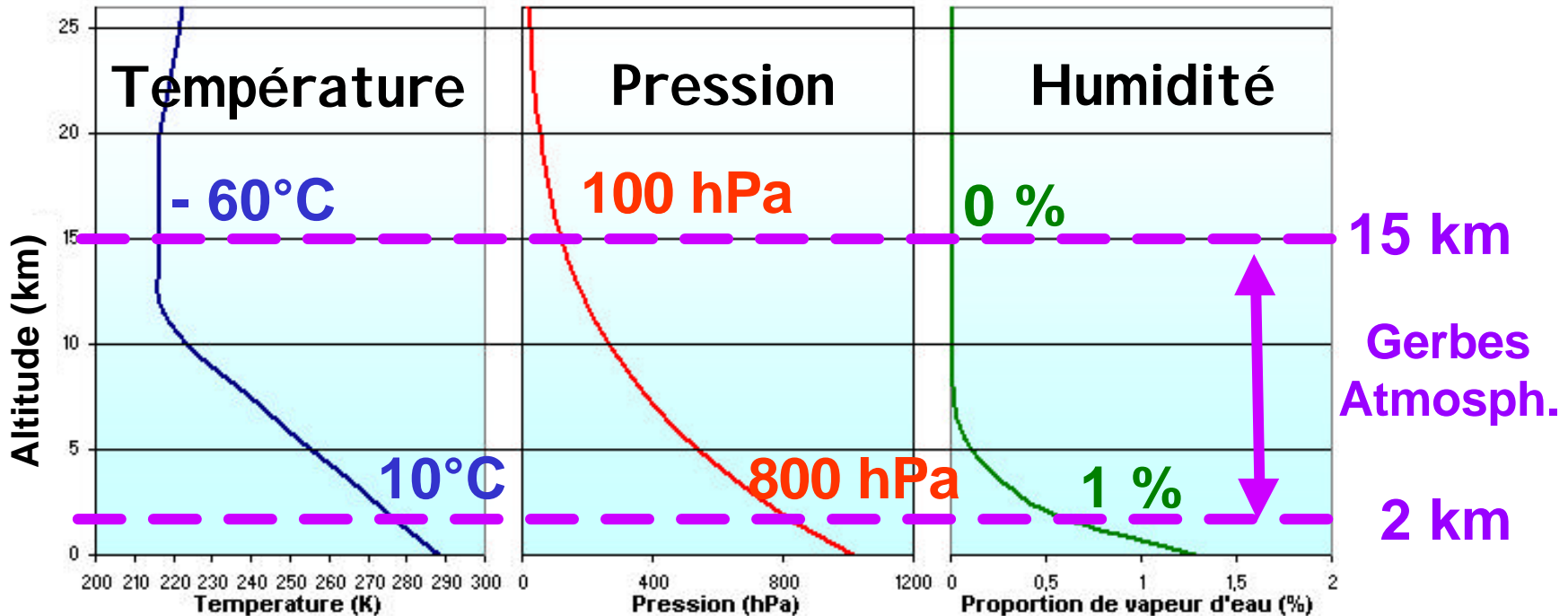
JINR (Russie) : Lenonid TKATCHEV, Artem CHUKANOV,  
Basar SABIROV, Yuri NEFEDOV, Sergei POROKHOVOI.



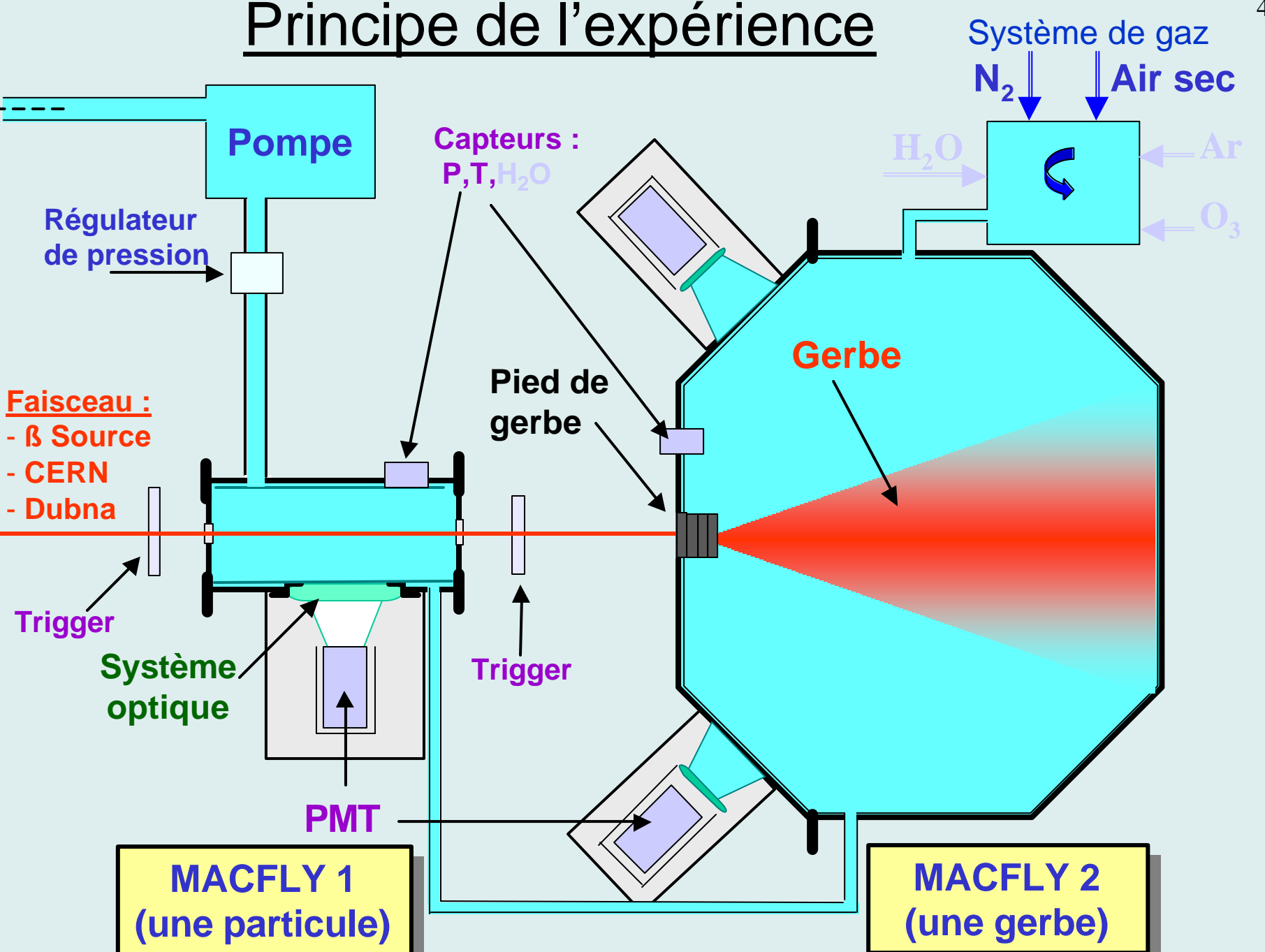
# Objectif de l'expérience

Reproduire et étudier en laboratoire la lumière produite par une gerbe atmosphérique

Mesurer les variations de la fluorescence de l'air en fonction des conditions atmosphériques :

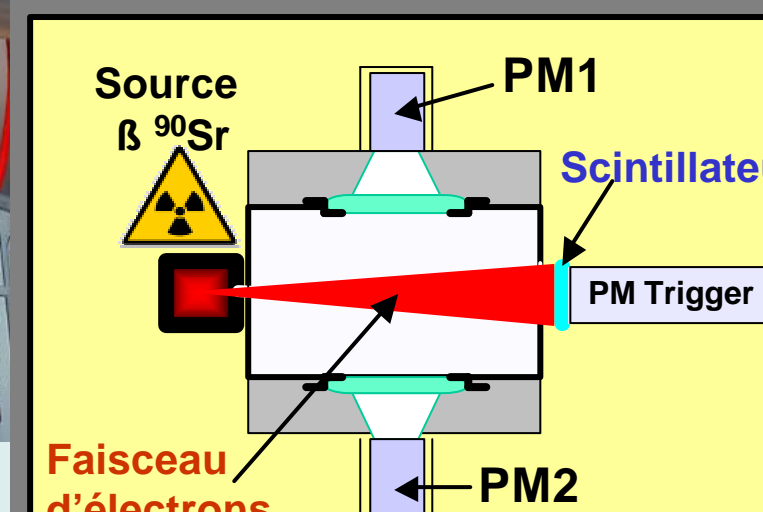
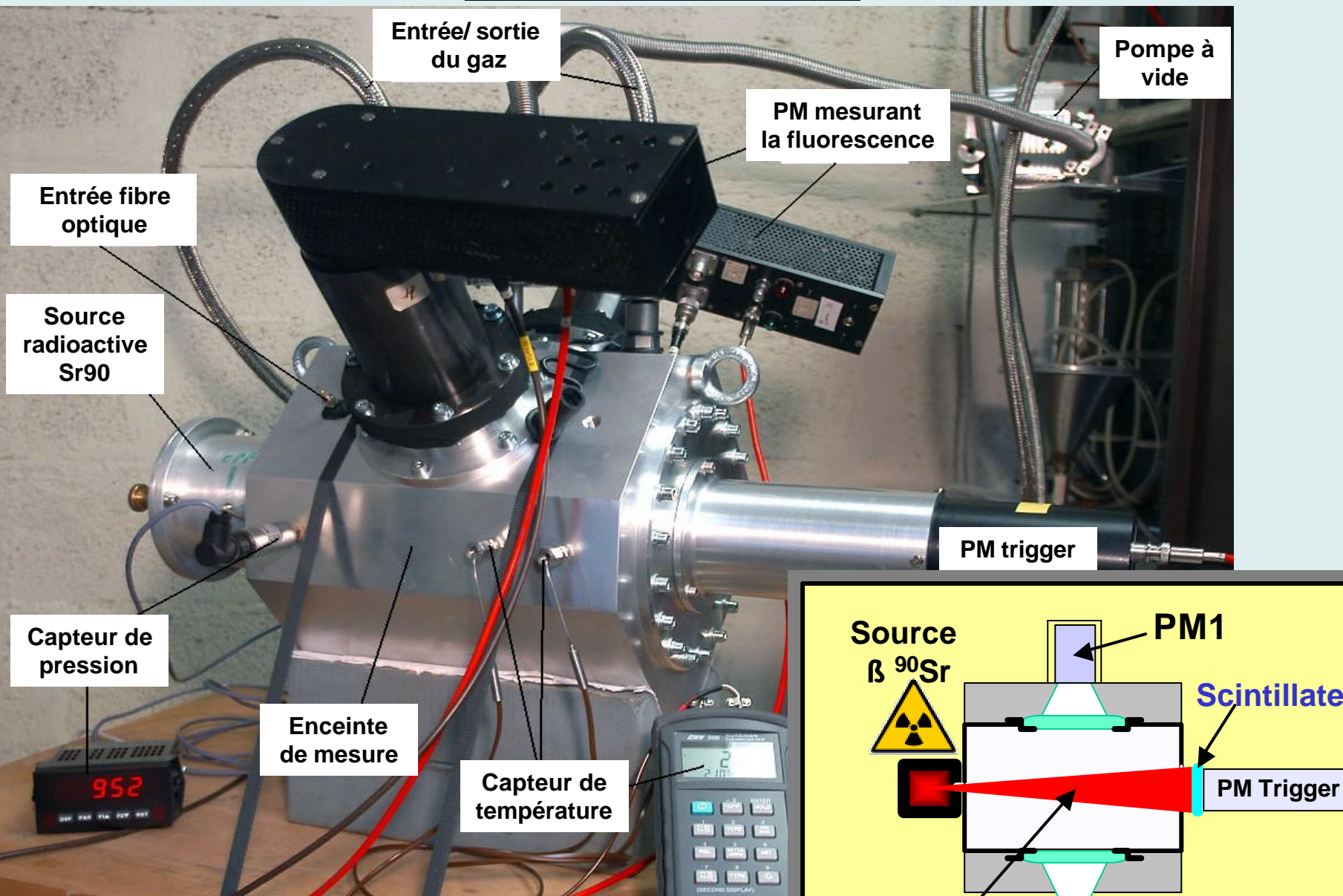


# Principe de l'expérience

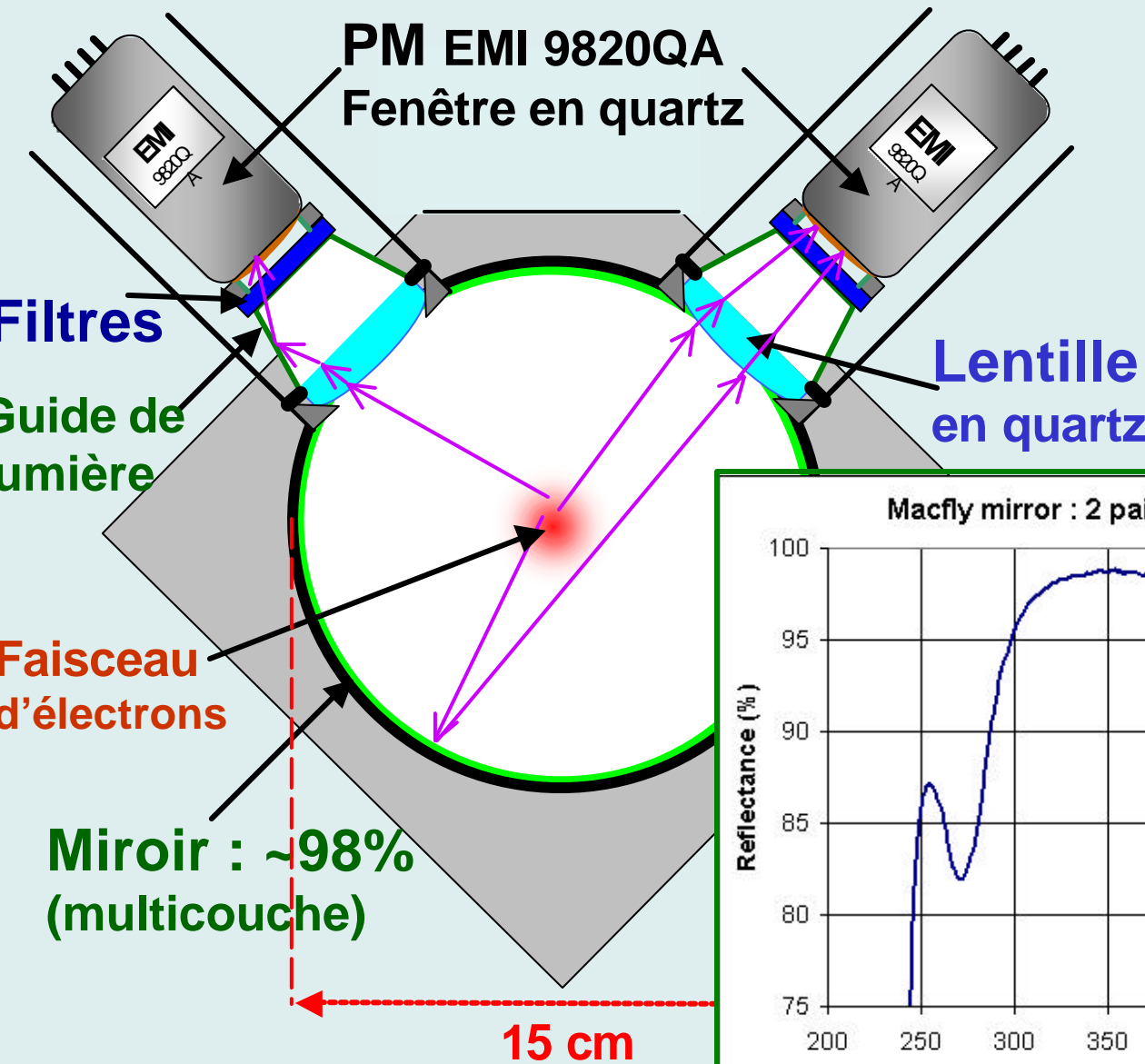




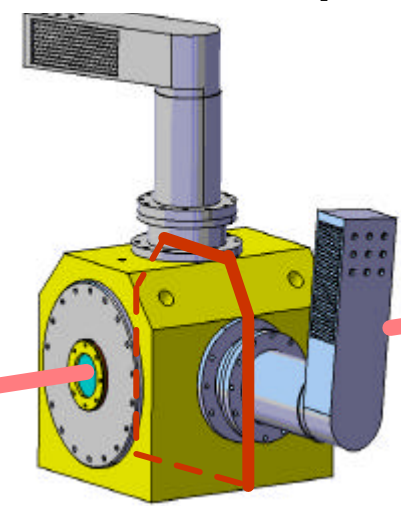
# MF1 au LAPP



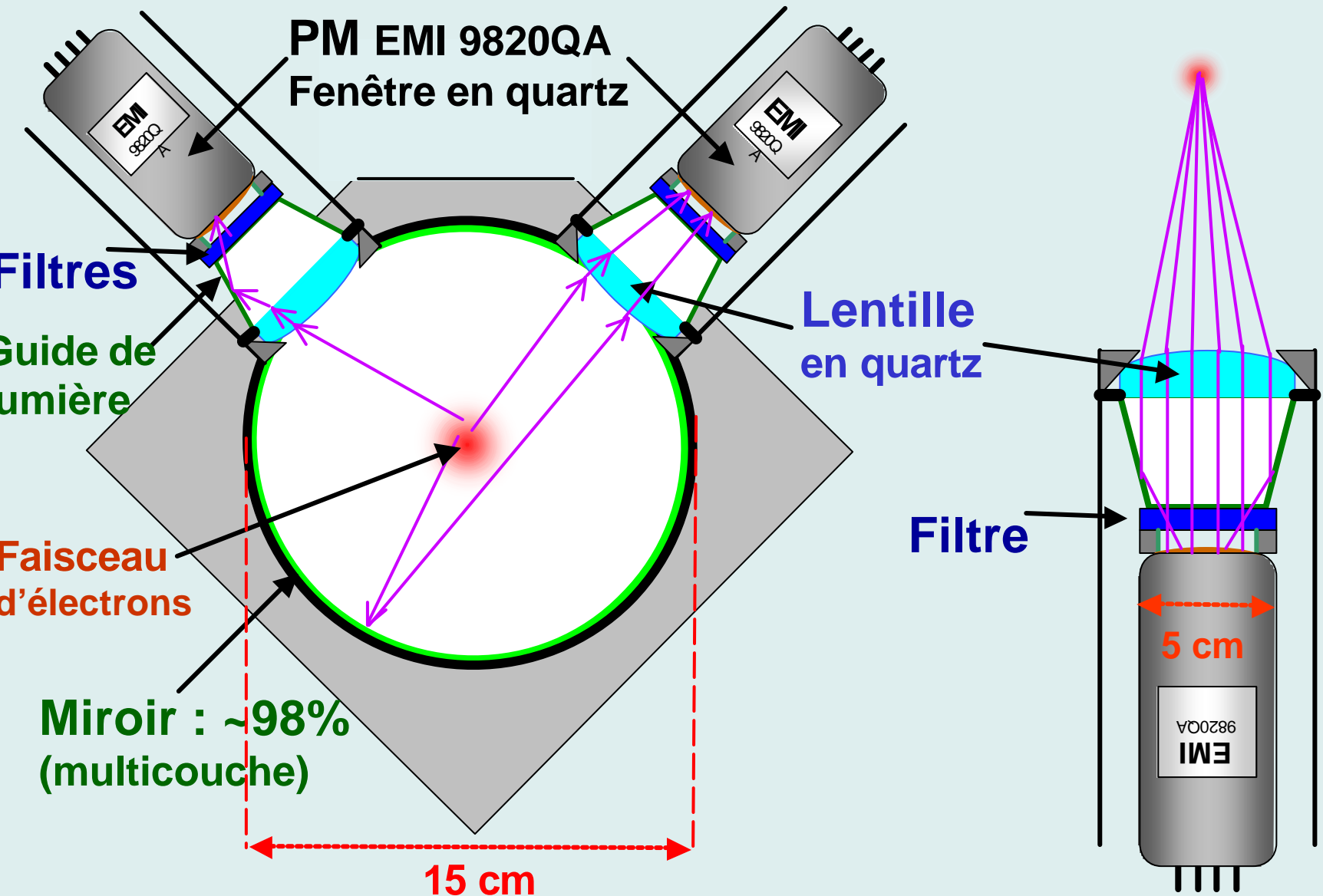
# Systeme optique de MF1



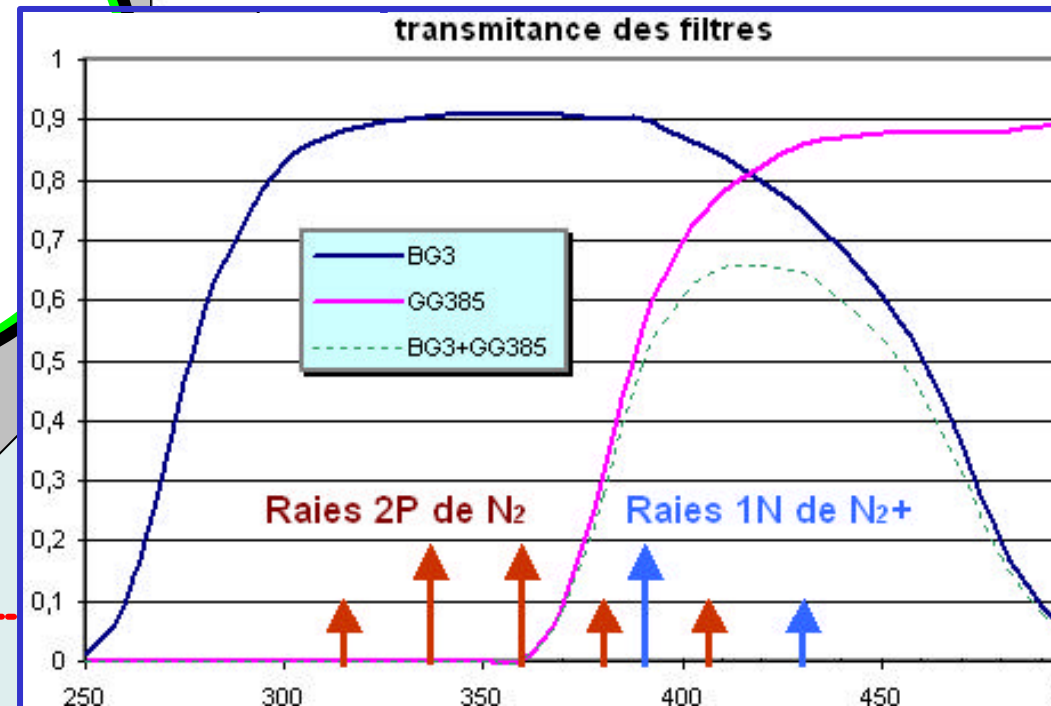
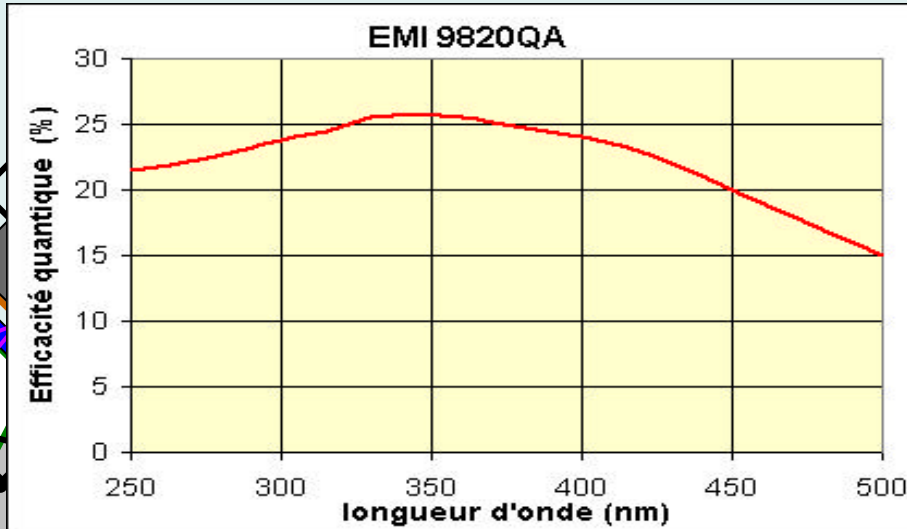
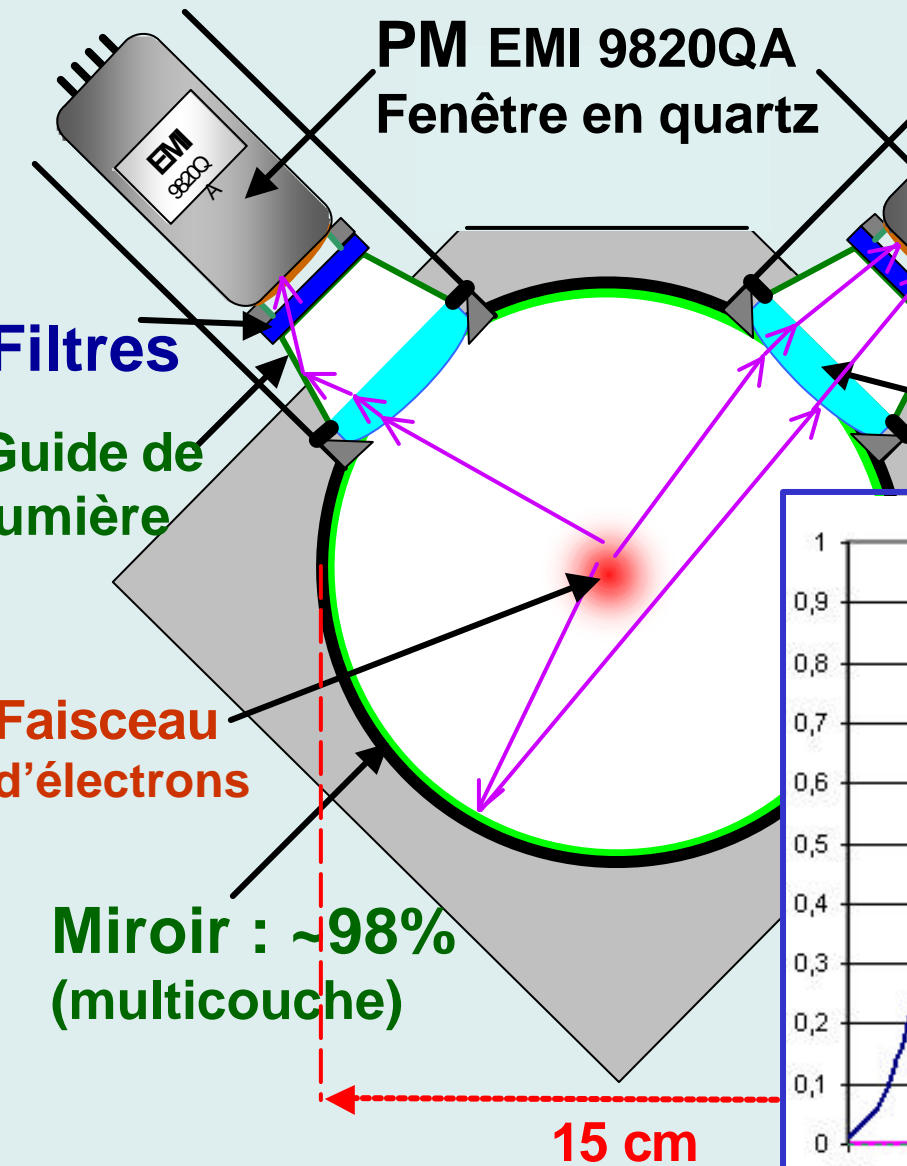
Vue en coupe



# Système optique de MF1

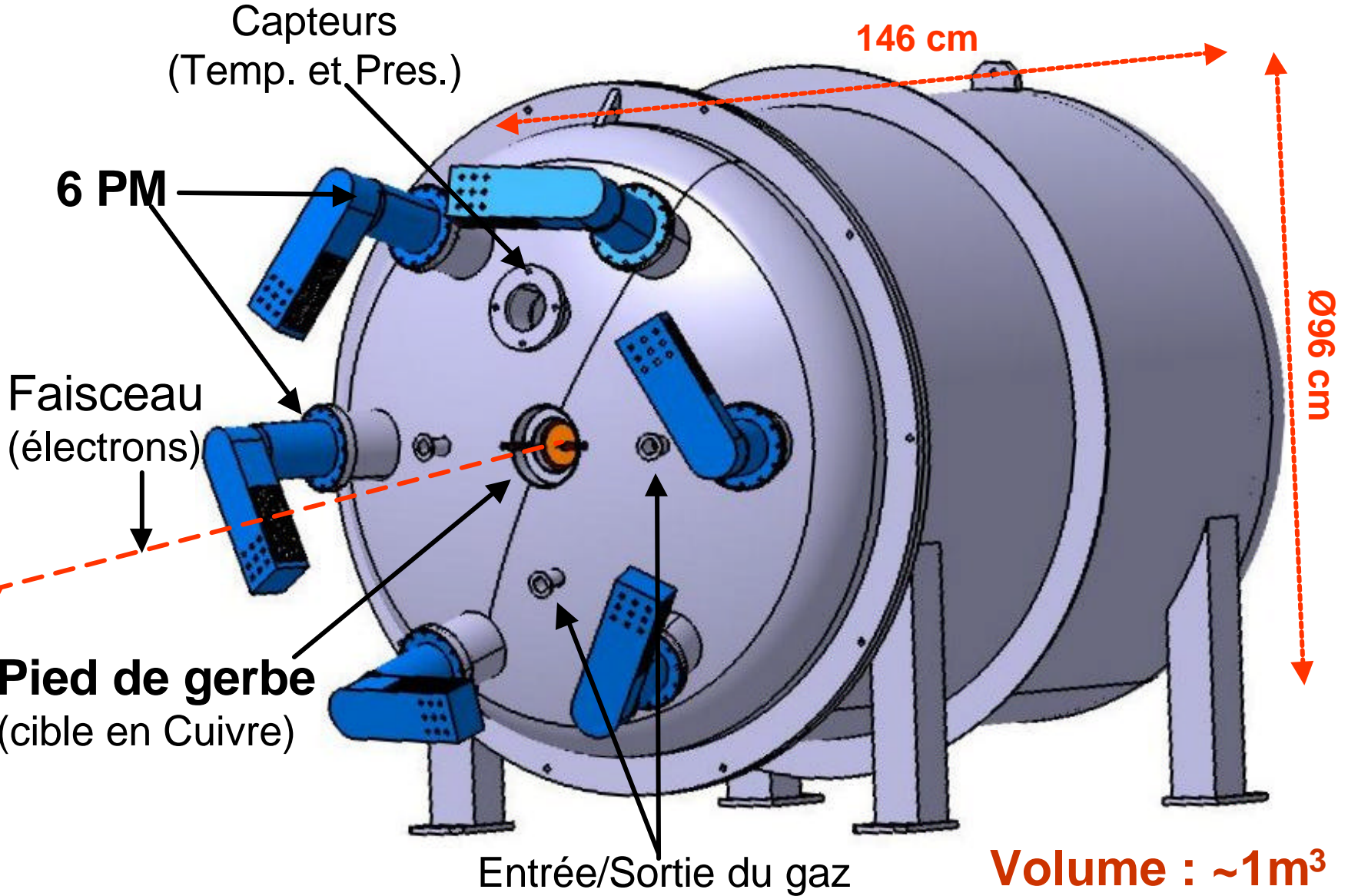


# Systeme optique de MF1

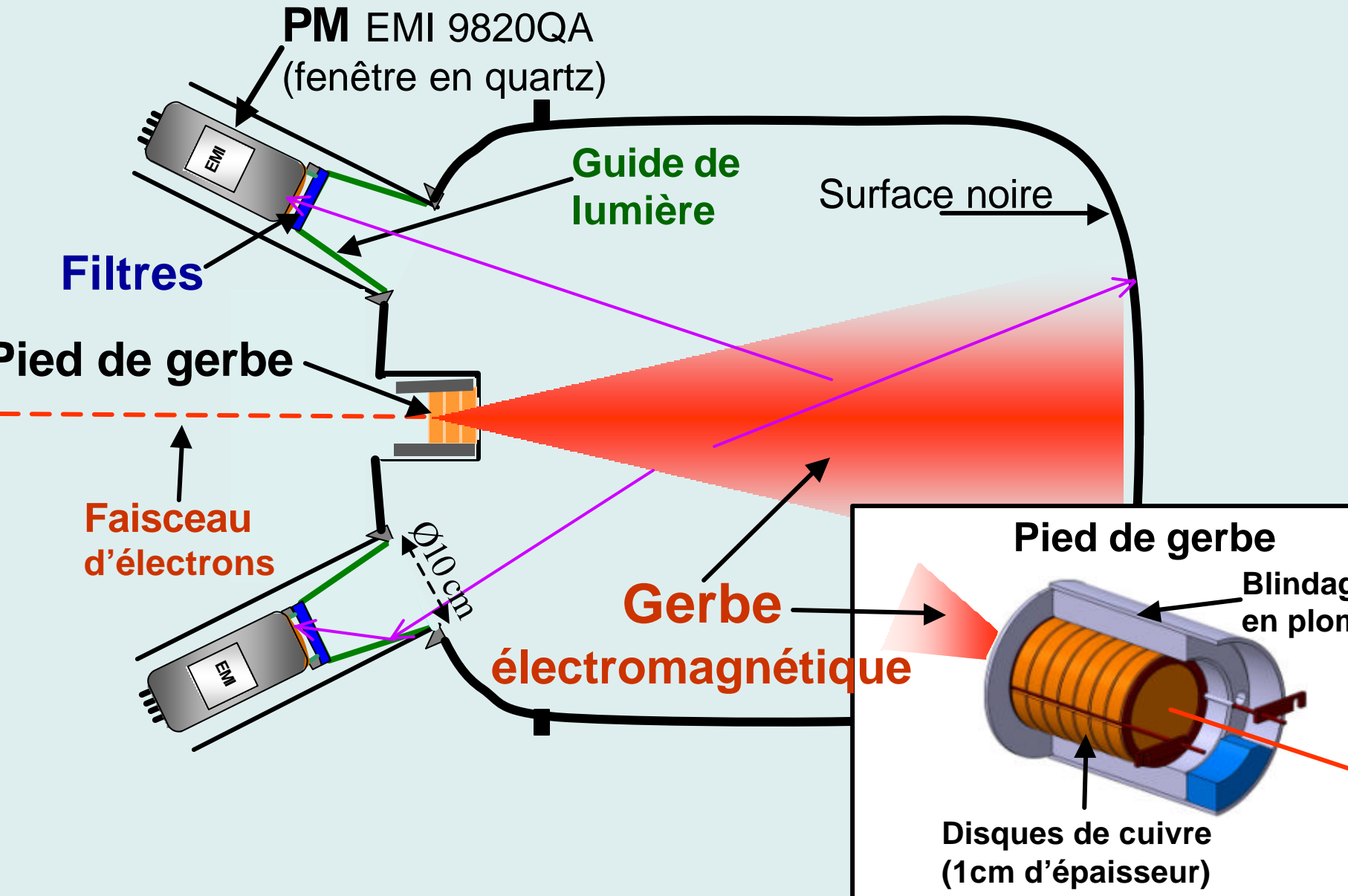




# Macfly 2 (MF2)



# Principe de fonctionnement de MF2



# Campagnes de mesure

- > **Au LAPP : (MF1)**
  - Avec une source radioactive (1.5 MeV)
  
- > **AU CERN : (MF1+MF2)**
  - Faisceau test SPS (5-100 GeV)
  - Dépendance en pression
  - Dépendance avec l'âge de la gerbe (MF2)

SPS Operation

Period 2A 2004 Jul 28 to Aug 18

SPS240

Schedule issue date: 29-Oct-2004

Version 3.3

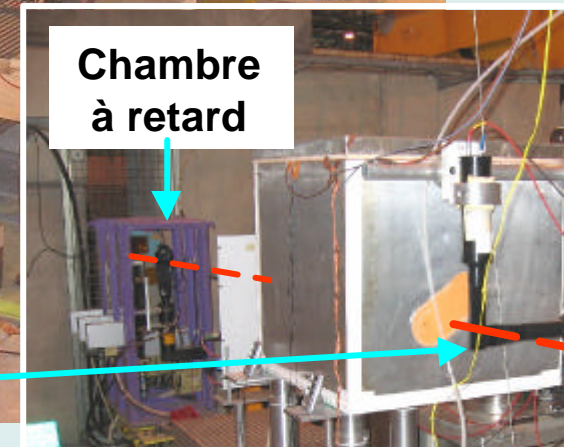
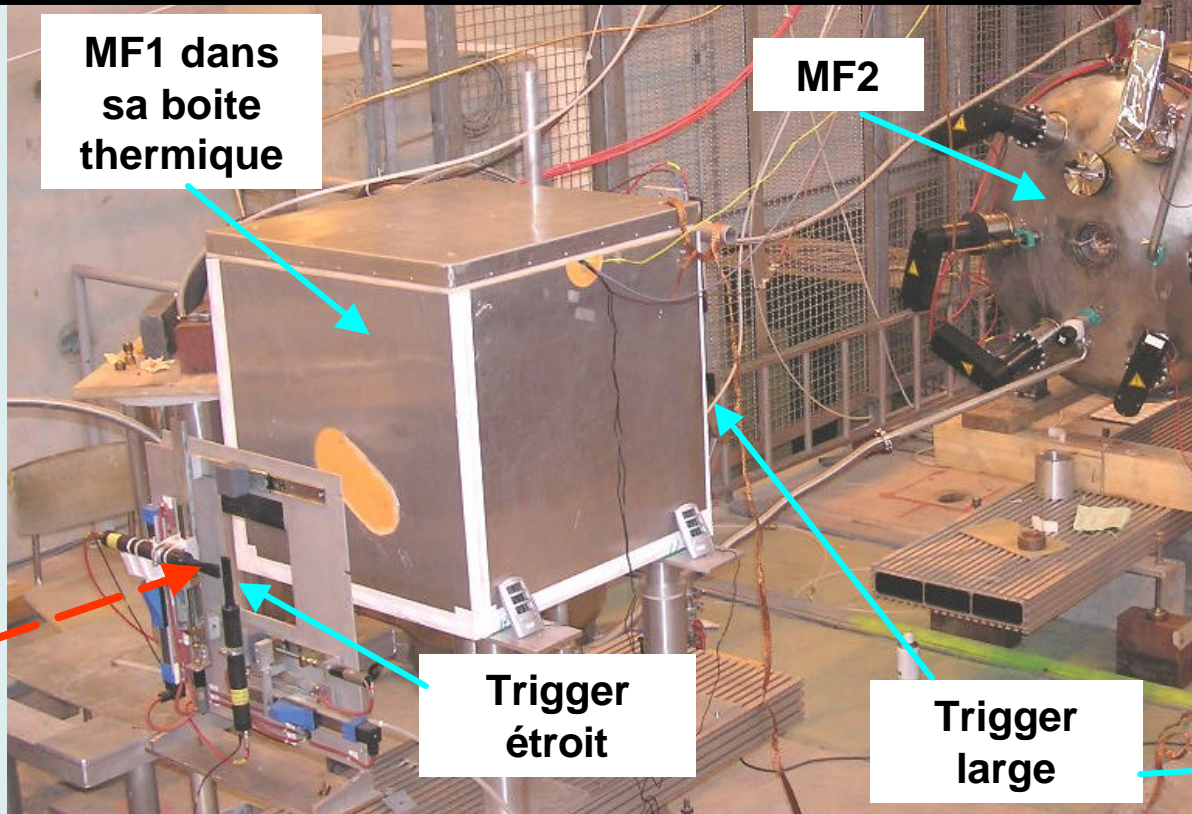
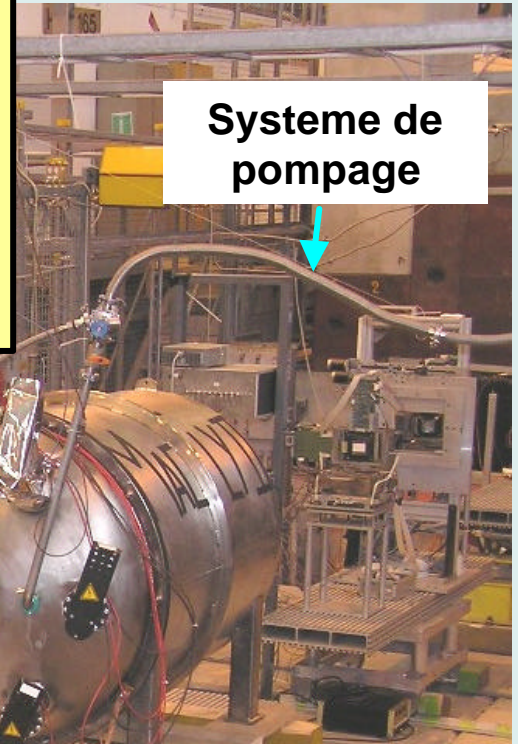
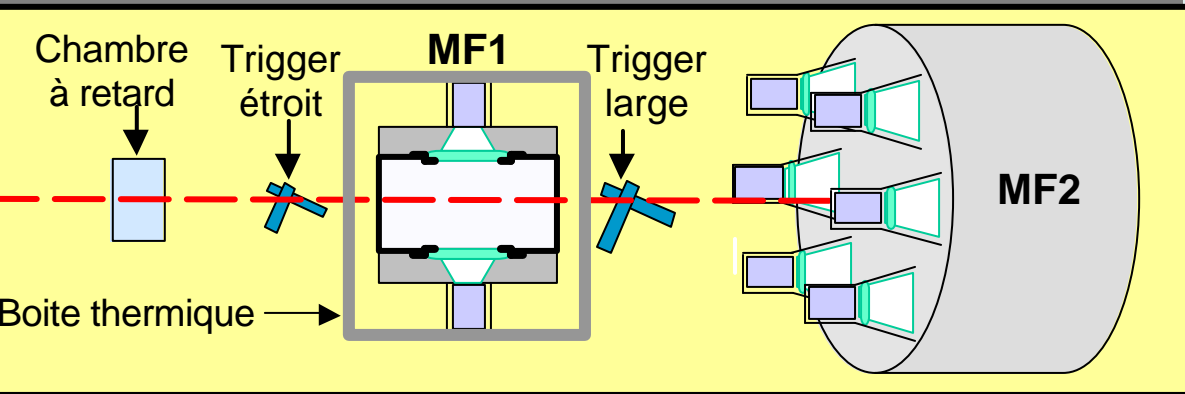
(colour code: purple (dark) = scheduling meeting , light green (light) = weekend or holiday)

	Wed 28 Jul	Thu 29 Jul	Fri 30 Jul	Sat 31 Jul	Sun 1 Aug	Mon 2 Aug Wk32	Tue 3 Aug	Wed 4 Aug	Thu 5 Aug	Fri 6 Aug	Sat 7 Aug	Sun 8 Aug	Mon 9 Aug Wk33	Tue 10 Aug	Wed 11 Aug	Thu 12 Aug	Fri 13 Aug	Sat 14 Aug	Sun 15 Aug	Mon 16 Aug Wk34	Tue 17 Aug	Wed 18 Aug
Machine								816 SPS MD							10 Long MD	10						8 CPS + S
REA	T1 -X5	8h P. Martinengo 105 X5A	ALICE-HMPID												10h P. Martinengo 105 X5A	ALICE-SDD						



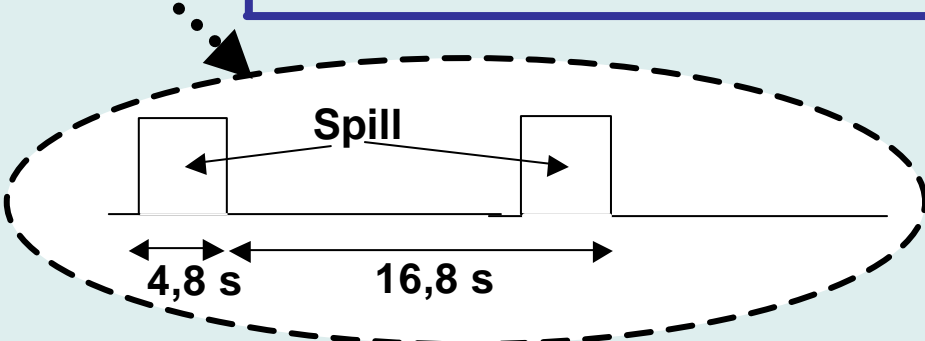
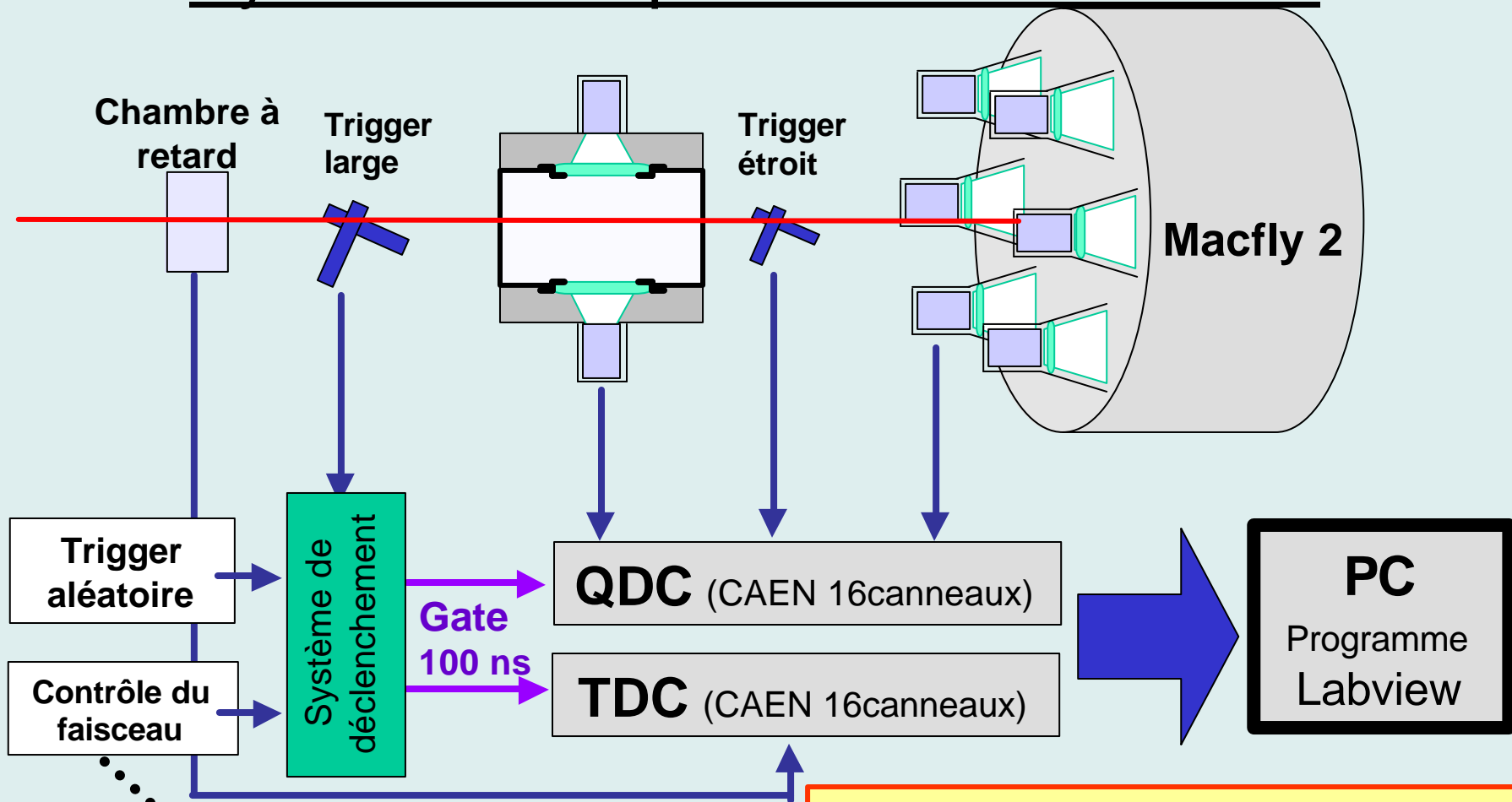


# Dispositif expérimental au CERN





# Système d'acquisition des données



**1 run ? 1 000 000 évènements**

- 500 000 bons évènements

(~10 000/spill)

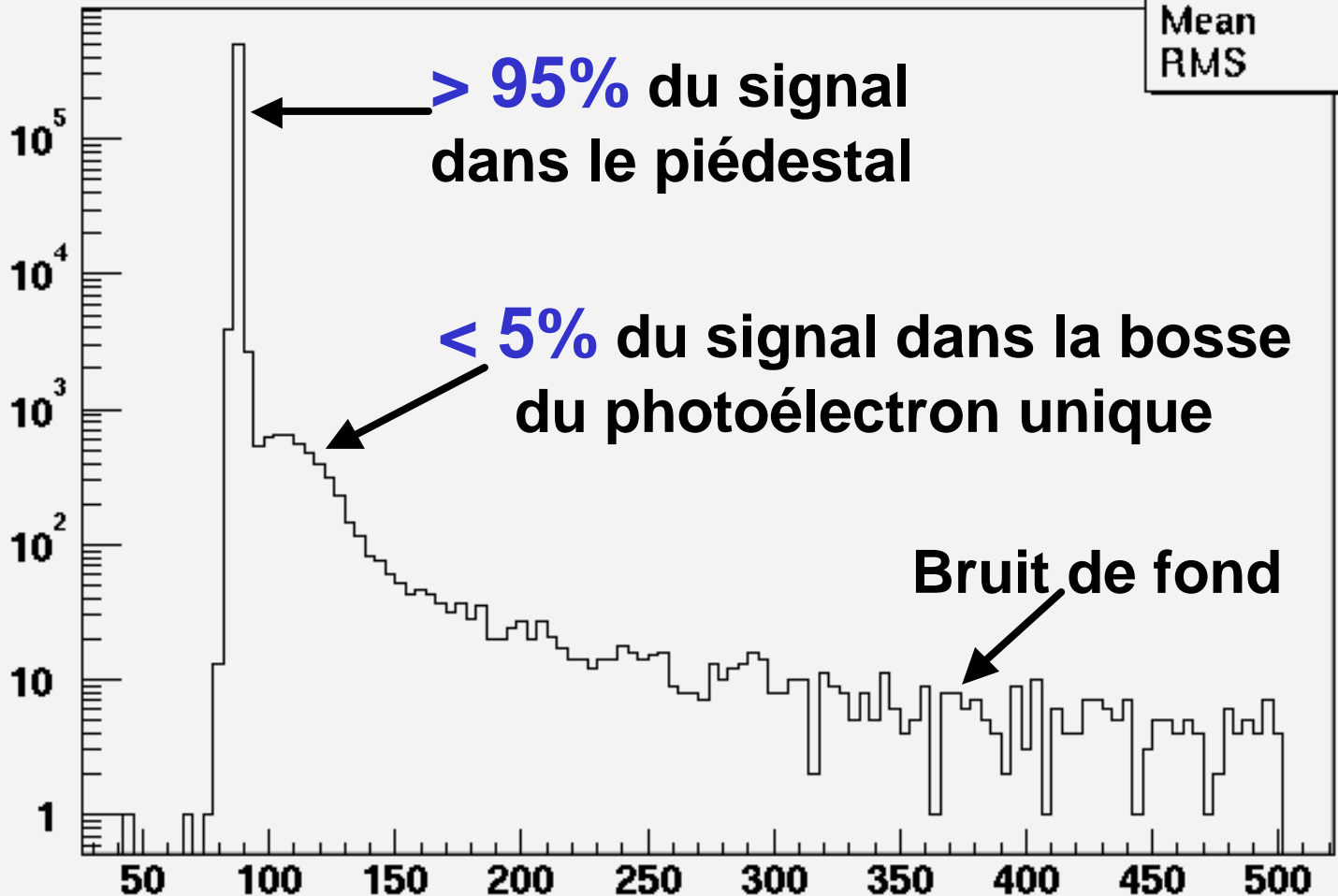
- 500 000 évènements aléatoire

(entre les spills)

# Spectre de PM (données Brutes)

ADC3 {trigger==0 & ADC3<500}

htemp	
Entries	507047
Mean	87.97
RMS	9.172



**Lumière détectée : DL ? 10 mPe (milli-photoélectron)**

# Extraire le signal de Fluo.

Lumière détectée  
par les PM

Lumière Cerenkov  
détectée (simulation)

Bruit de fond  
(mesure dans  
le vide)

$$DL = FLY \times e_{MF} + CDL + Bgd$$

Lumière produite  
par fluorescence  
(en photons)

Efficacité du détecteur  
(étalonnage)

$$FLY/E = FLY / E_{dep}$$

Energie déposée  
(Simulation)

# Reconstruction du DL (lumière détectée)

⇒ **Ajustement du spectre de PM**

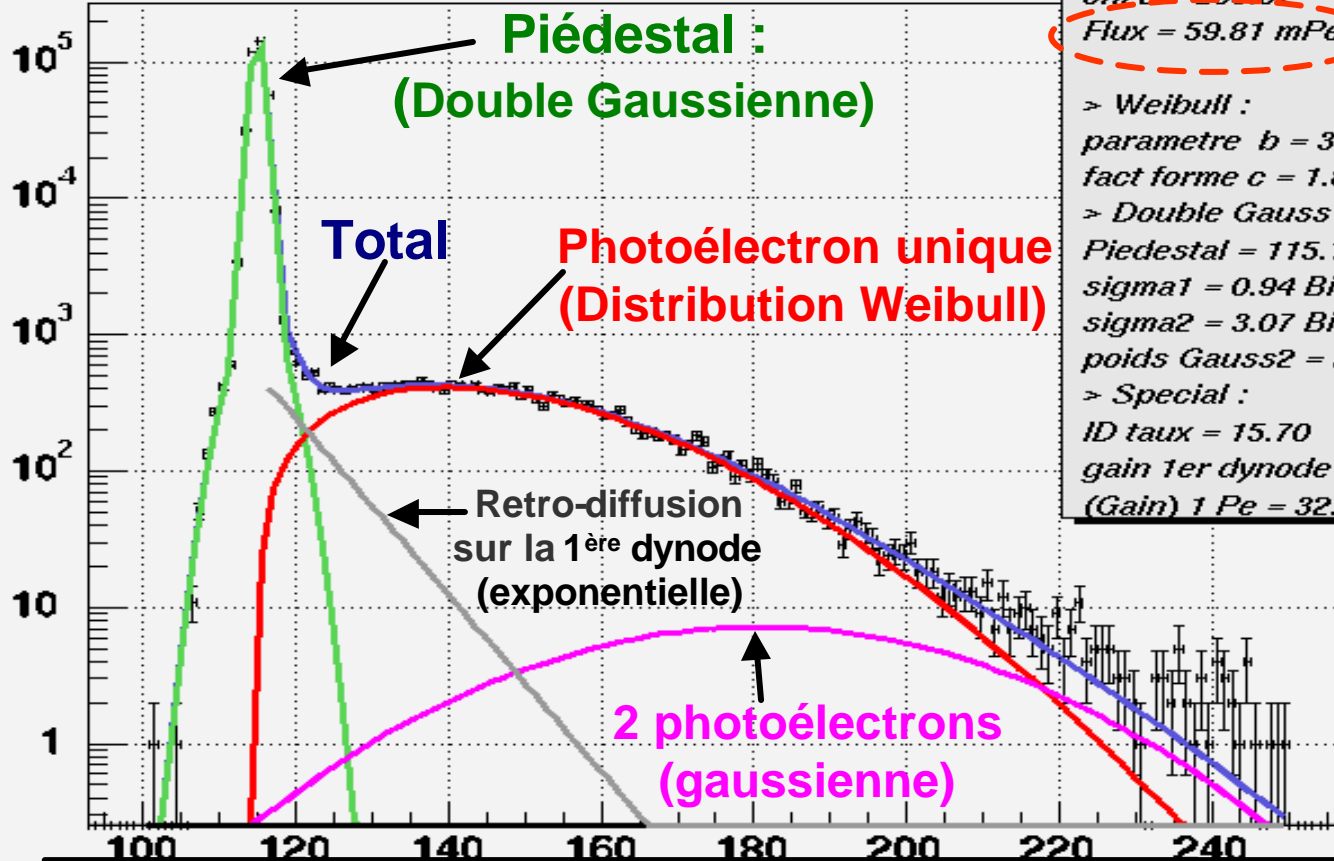
**Fonct. d'ajustement : somme de 0, 1, 2... photons**

**Photo-statistique : ⇒ Loi de Poisson**  
**de valeur moyenne : DL**

# Reconstruction du DL (lumière détectée)

## Ajustement du spectre de PM

ADC7 : Small Trigger



*Fit Information*  
NB events = 383712  
~~chi 2 = 206.67~~  
Flux = 59.81 mPe

> Weibull :  
parametre  $b = 36.94$   
fact forme  $c = 1.88$

> Double Gauss :  
Piedestal = 115.17 Bin  
 $\sigma_1 = 0.94$  Bin  
 $\sigma_2 = 3.07$  Bin  
poids Gauss2 = 2.42

> Special :  
ID taux = 15.70  
gain 1er dynode = 4.90  
(Gain) 1 Pe = 32.80 Bin

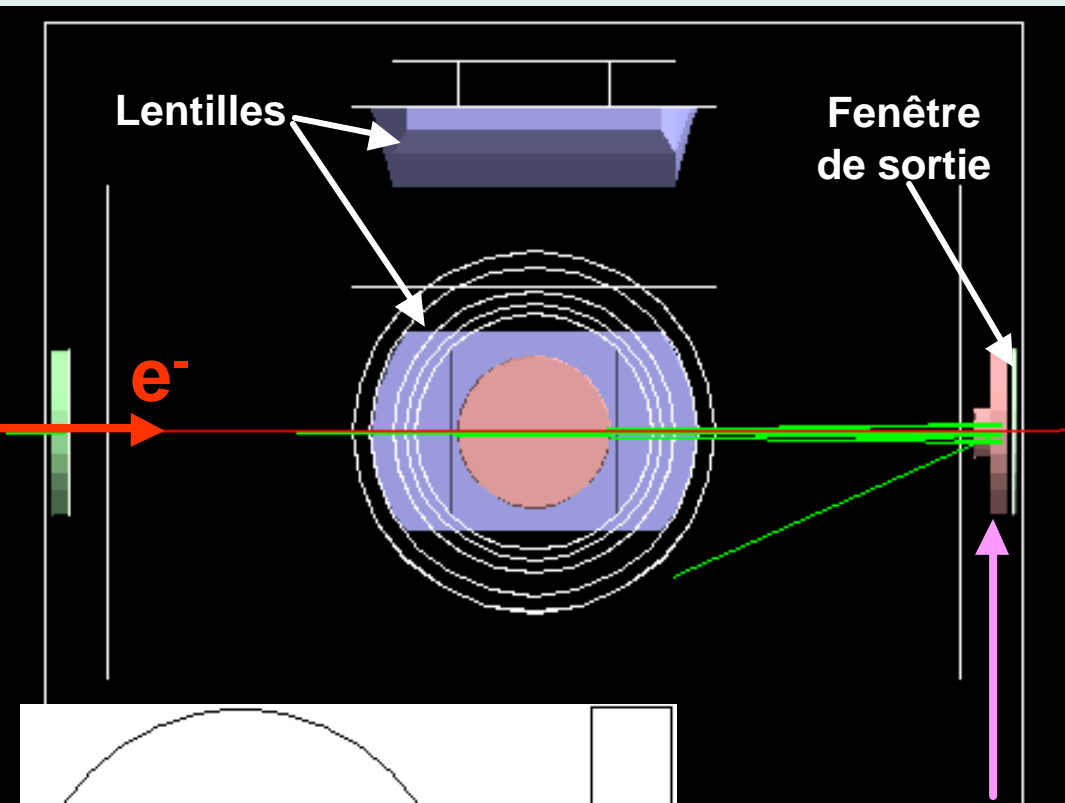
?? = 206/140 = 1,5

Photons

7 paramètres ajustables

Gamme dynamique : de 0,0002 à qq photoélectrons  
Erreur de reconstruction : ~4% à 0,01 photoélectron

# Simulation du CDL (Signal Cerenkov)



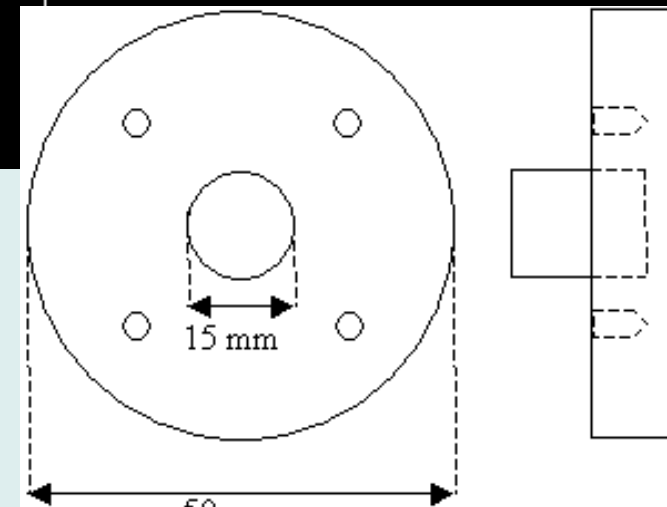
**MF1 :  $e^-$  50 GeV**  
**Energie  $\gg$  Seuil Cerenkov**

**Modèle :  $CDL = a P/P_{atm}$**

**Simulation Geant4 :**

Sans absorbeur de Cerenkov  
 **$a = 12,5$  mPe**

Avec absorbeur de Cerenkov :  
 **$a = 0,6$  mPe**



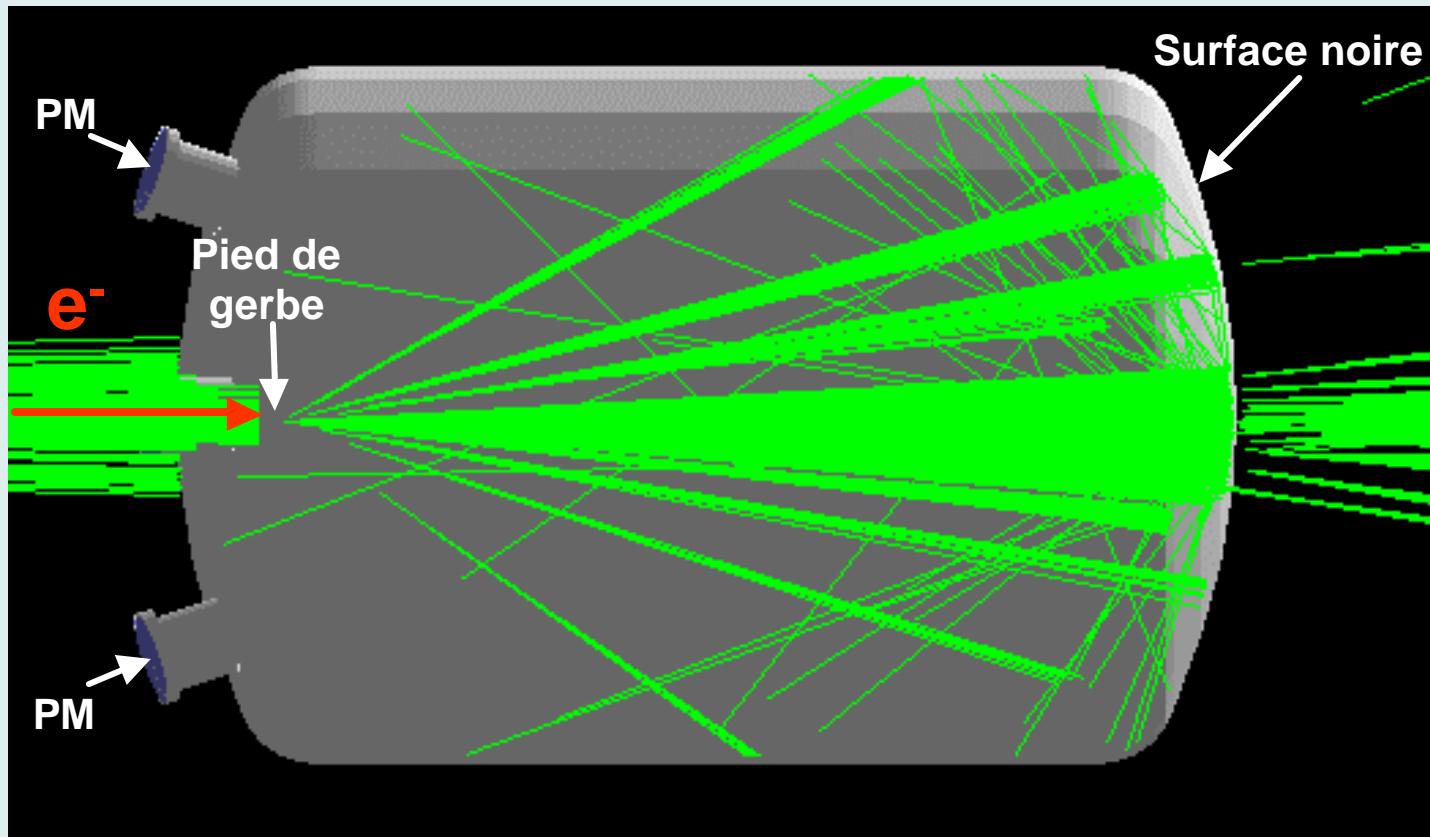
# Simulation du CDL (Signal Cerenkov)

## MF2 : gerbe électromagnétique

$e^-$  de toute énergie 

**Pas de modèle simple**

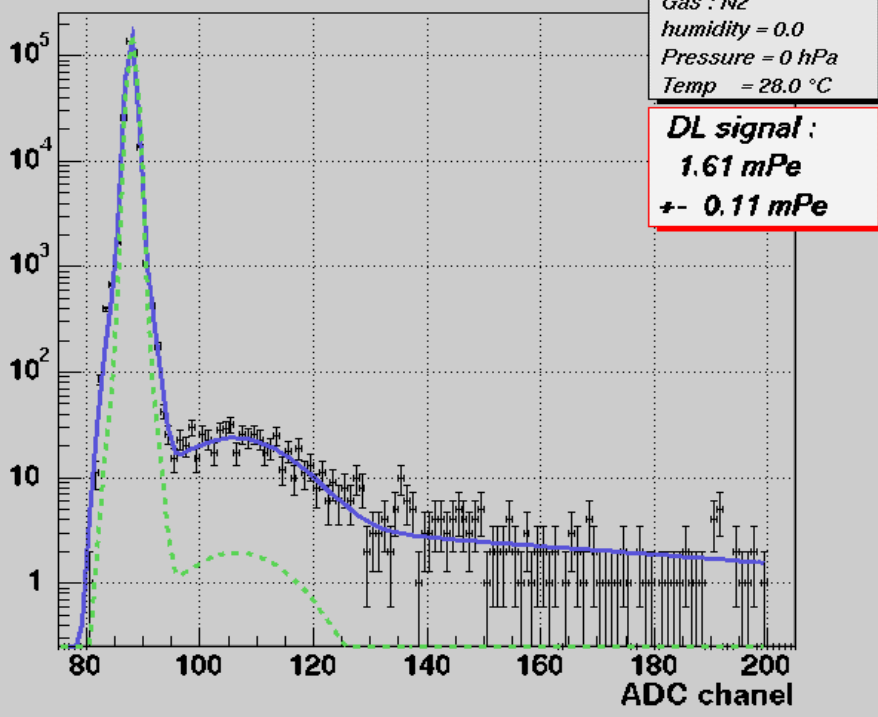
## Simulation Geant4 :



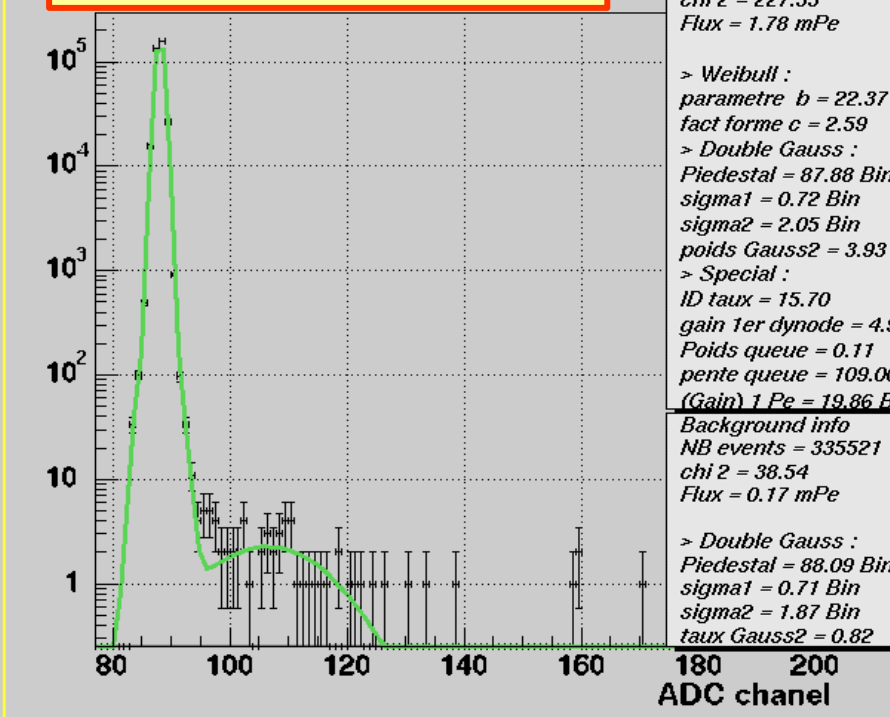
gerbe de 50 GeV 5cm de cuivre Air 1000 hPa

# Mesure du Bgd (Bruits de fond)

## Mesure dans le vide



## Déclenchement aléatoire



MF1 (au CERN) :  
**Bdg = 1,6 mPe**

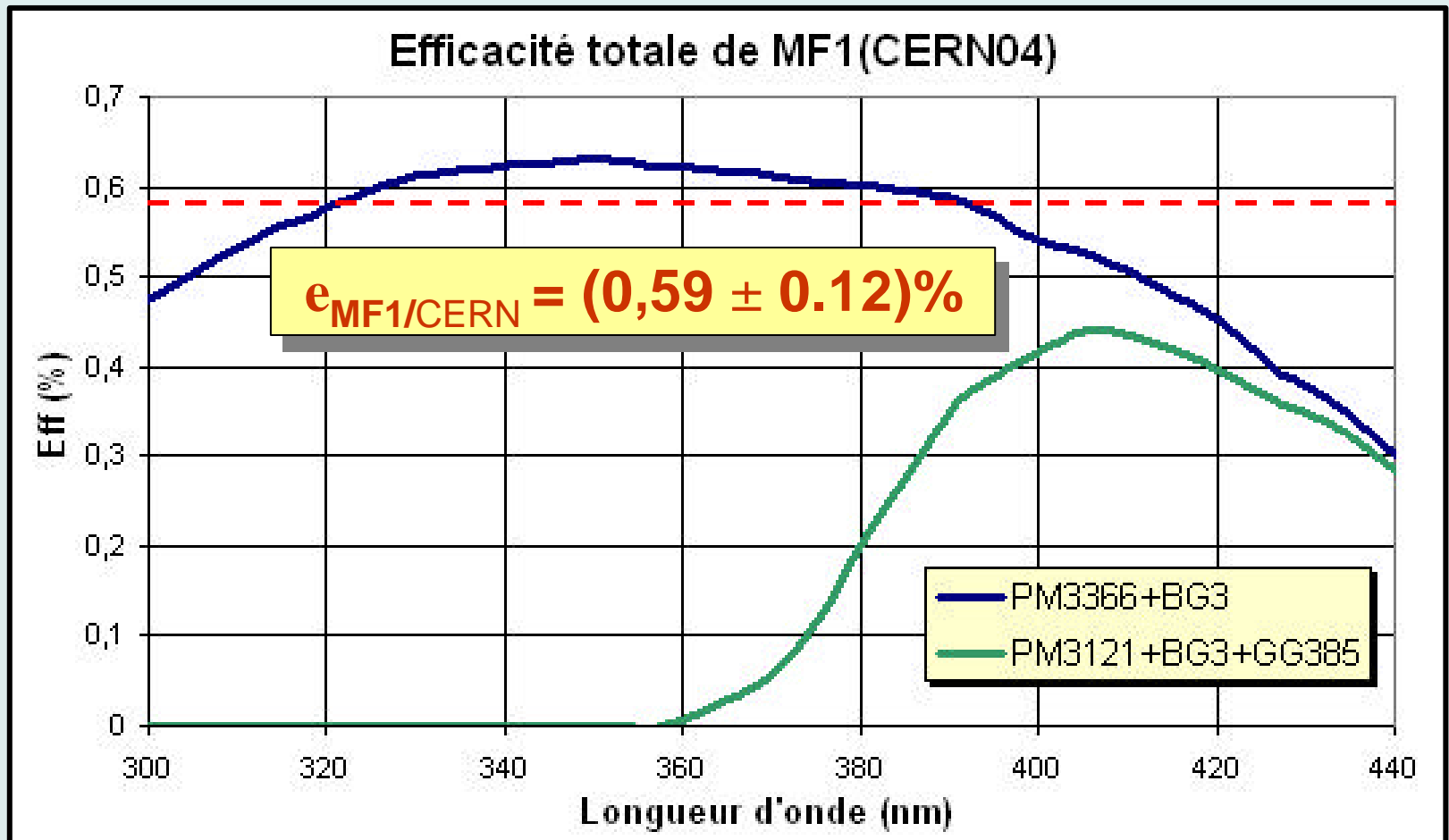
Soustrait à chaque mesure  
**~0,2 mPe**



# Efficacité de MF1

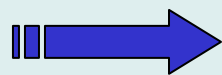
Acceptance géométrique :  Simulation

Efficacité quantique des PM  Étalonnage

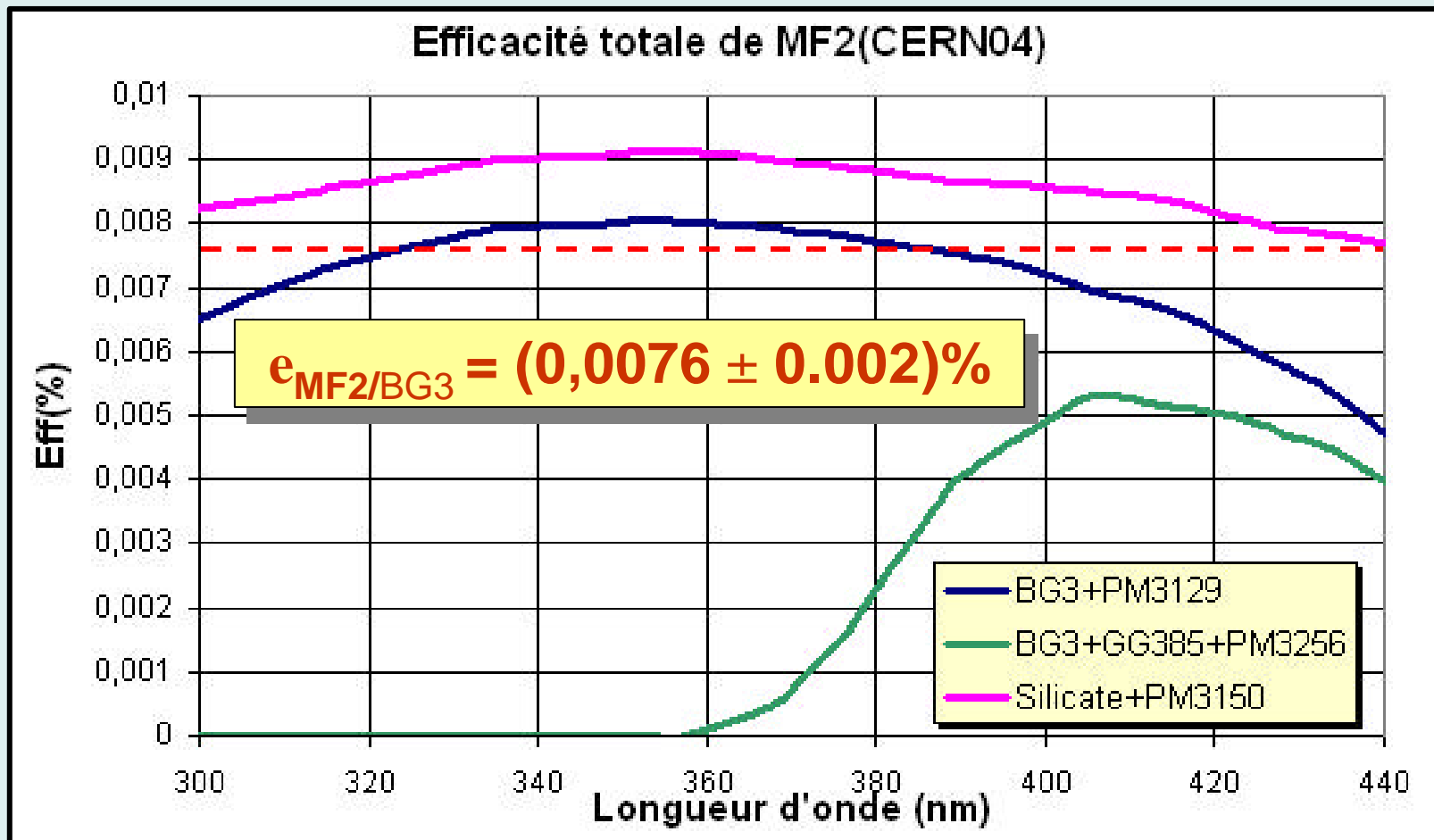


# Efficacité de MF2

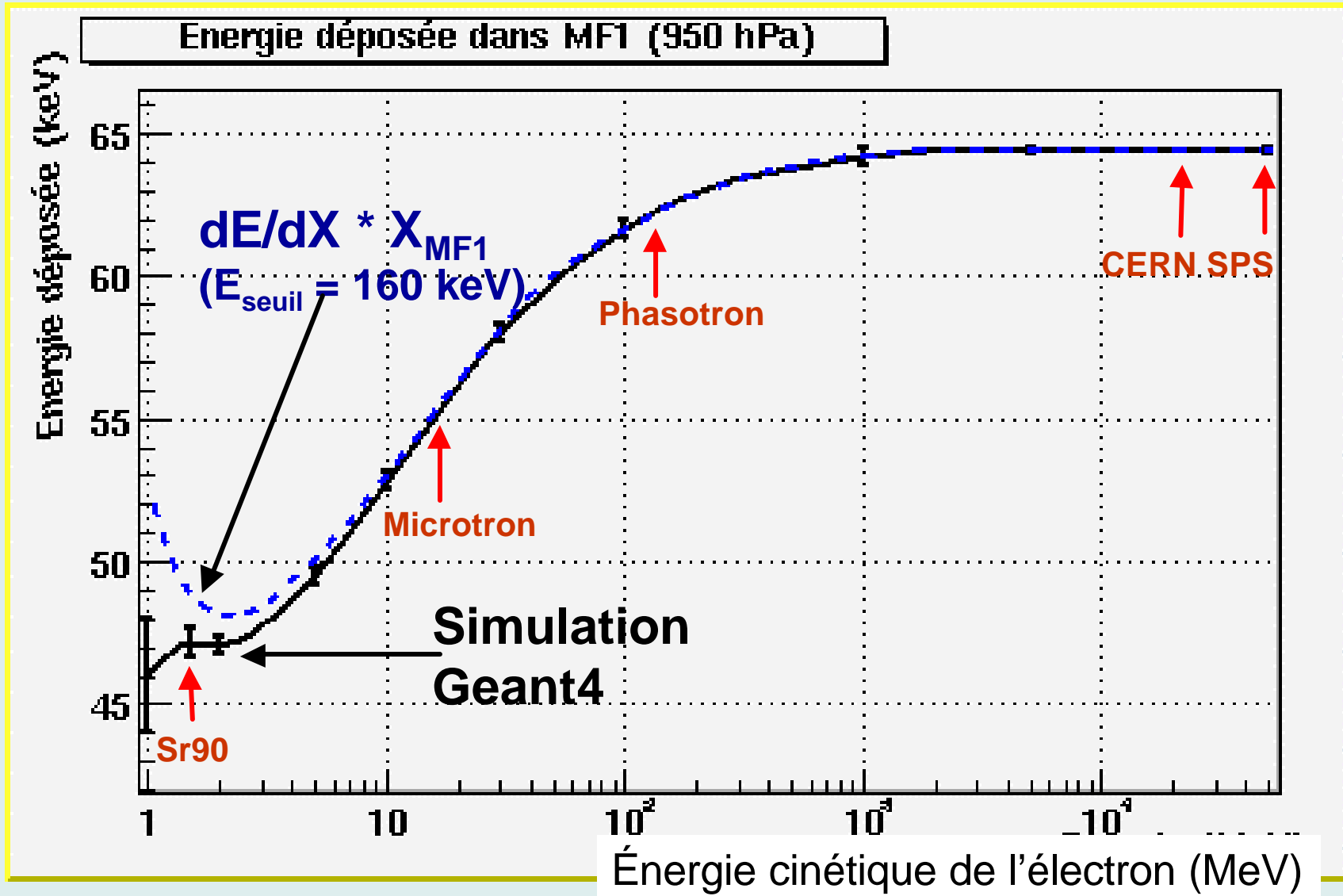
Étalonnage  
avec MF1



$$\frac{FDL_{MF1} (BG3)}{FDL_{MF2} (BG3) \text{ sans pied de gerbe}} = 11. \pm 2$$

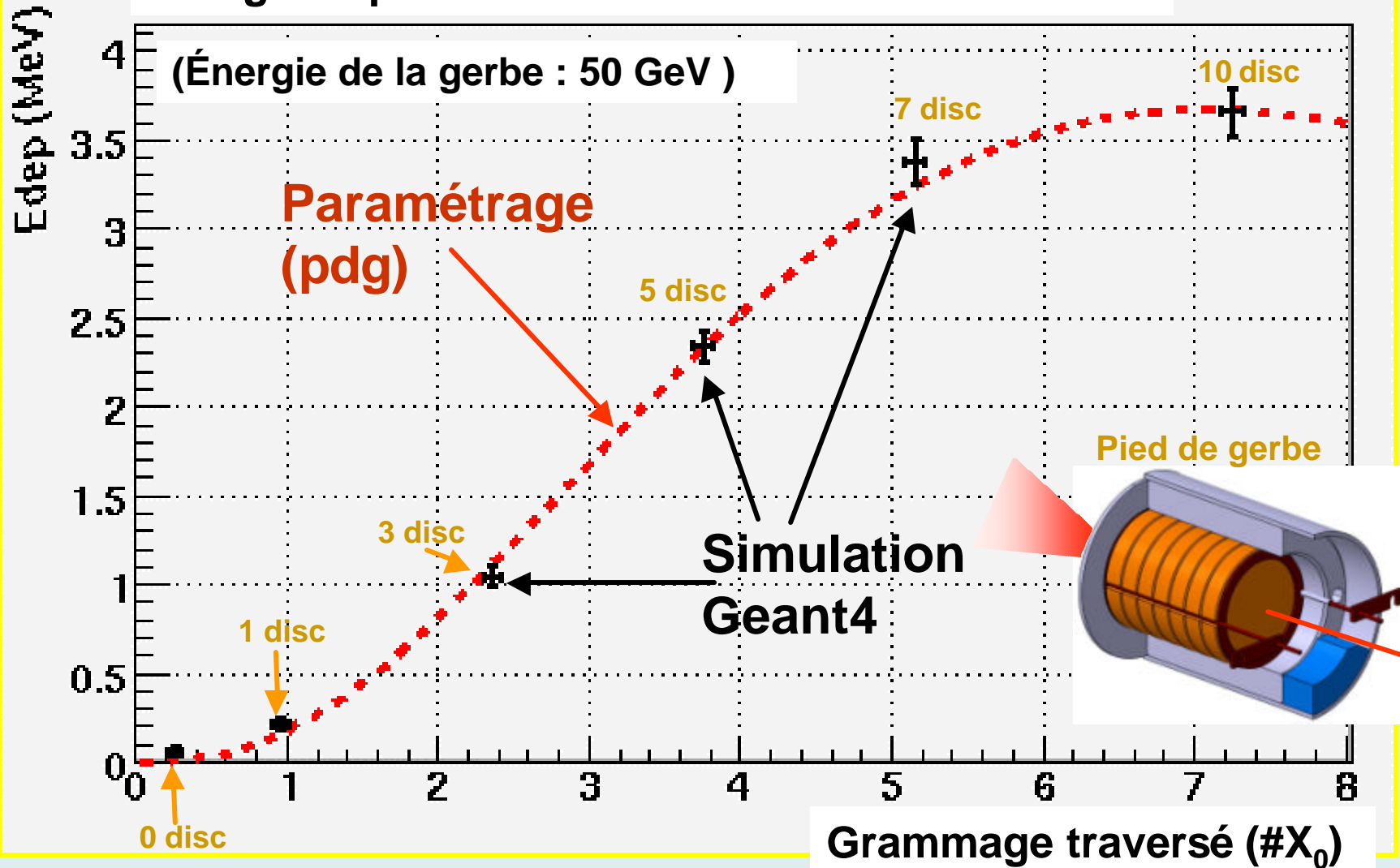


# Énergie déposée dans MF1



# Énergie déposée dans MF2

Énergie déposée dans MF2 dans l'air à 100 hPa



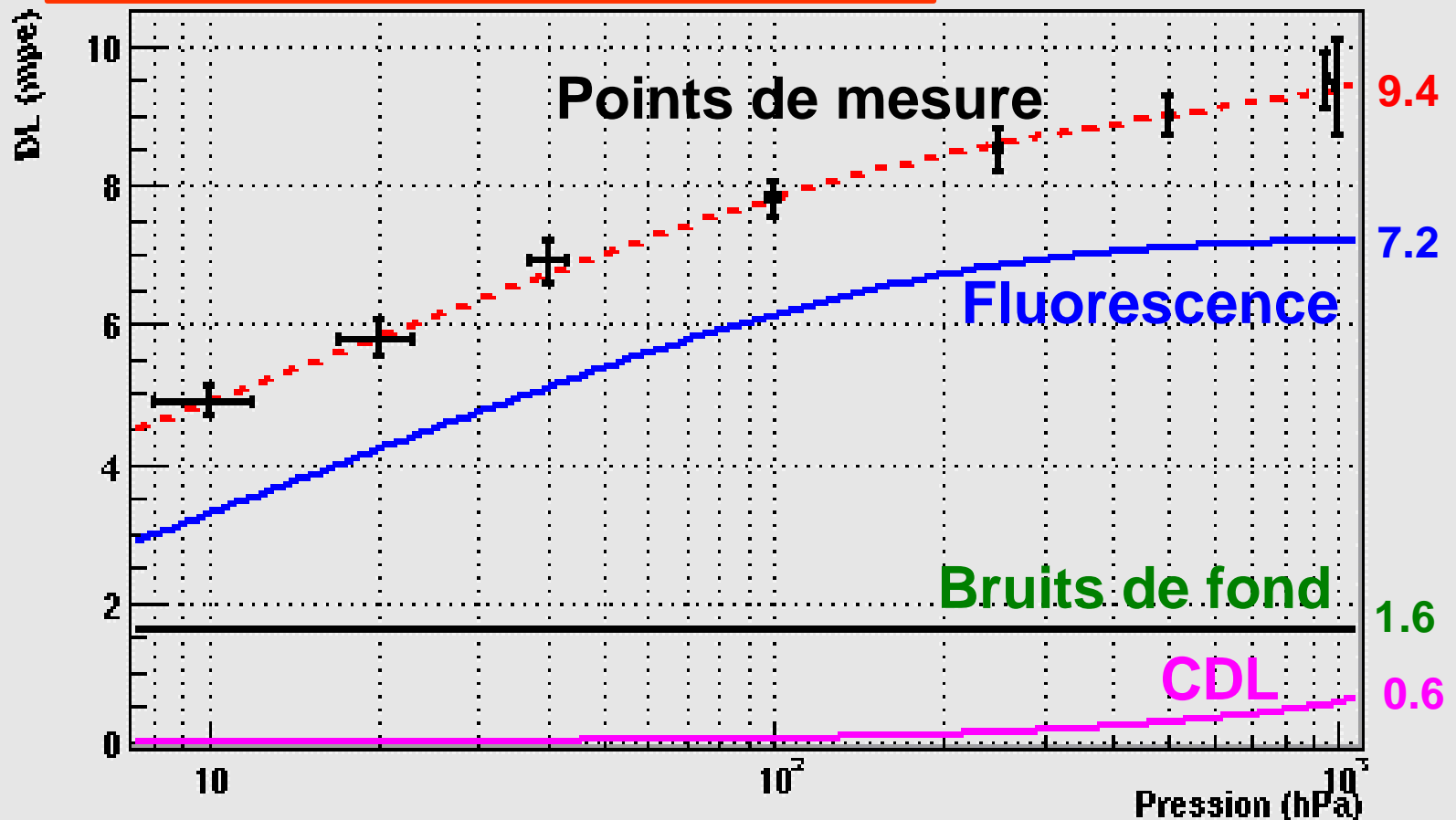
# Erreurs systématiques

Sources d'erreurs	MF1 (air sec)		MF2 (air sec, 3cm)	
	500 hPa	100 hPa	500 hPa	100 hPa
EQ des PM	10%	10%	10%	10%
Acc. Geo.	17%	17%	20%	20%
Recon. DL	4%	4,5%	3,5%	4%
Simu. CDL	2%	<1%	15%	3%
Mesu. Bgd	2%	3%	<1%	1%
<b>FLY :</b>	<b>20,3%</b>	<b>20,5%</b>	<b>27,2%</b>	<b>23%</b>
$E_{dep}$	1%	2%	10%	10%
<b>FLY/E :</b>	<b>20,3%</b>	<b>20,6%</b>	<b>29%</b>	<b>25%</b>

# Résultats MF1

Lumière détectée dans MF1 en fonction de la pression :

$$DL = FDL + CDL + Bgd$$

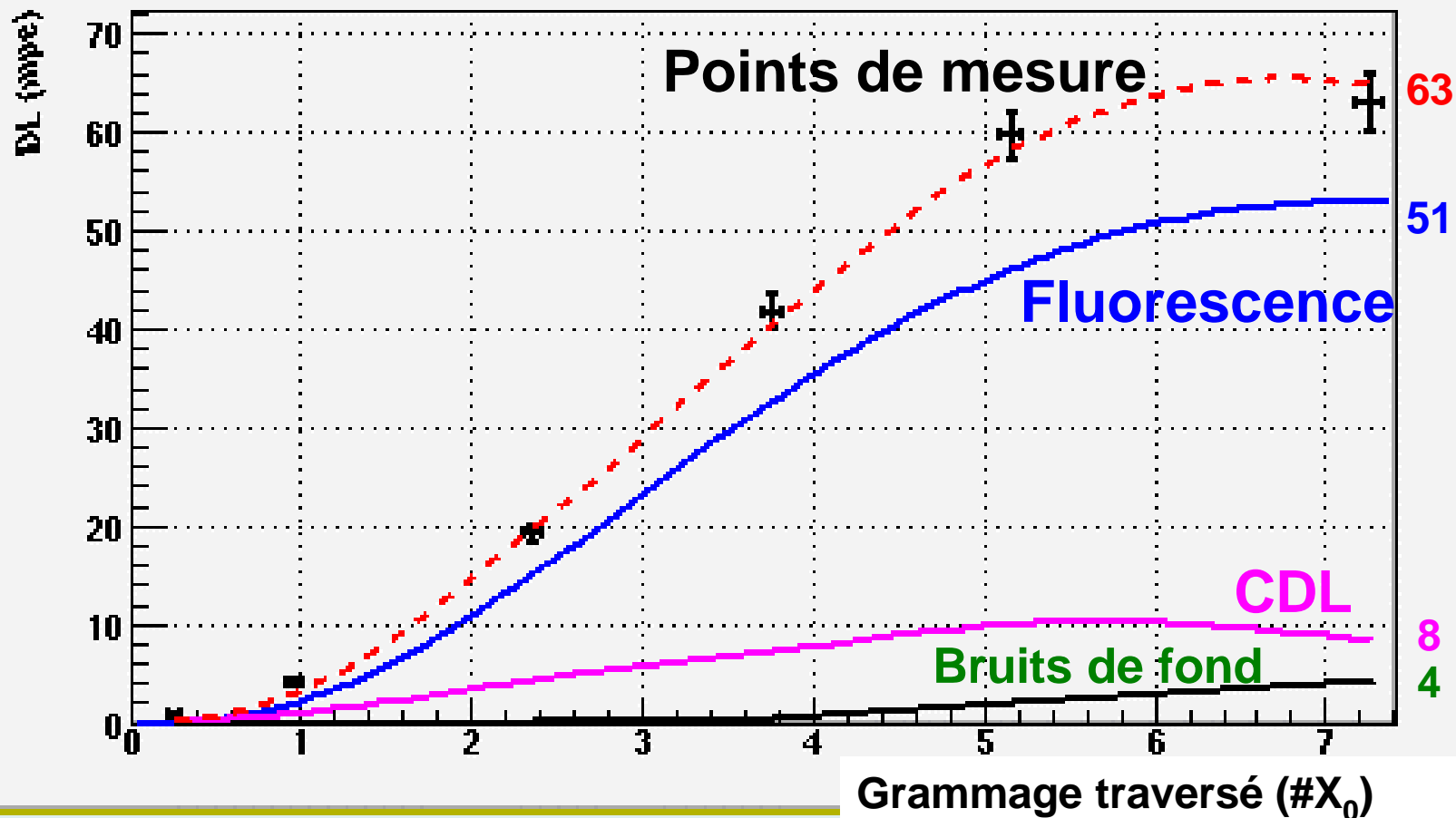


Électron de 50 GeV dans l'air sec à 28°C

# Résultats MF2

Lumière détectée dans MF2 en fct du grammage traversé :

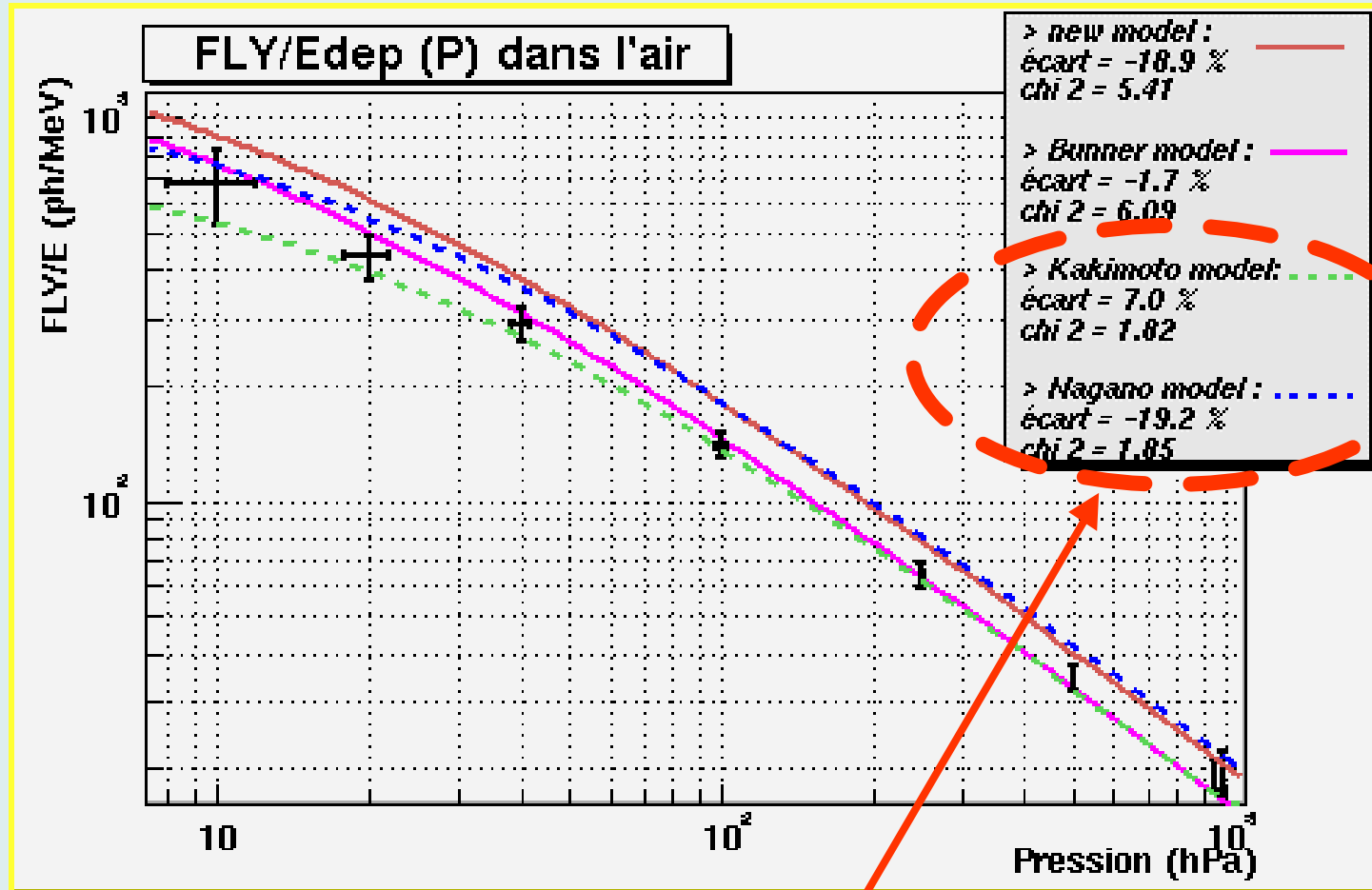
$$DL = FDL + CDL + Bgd$$



Gerbe de 50 GeV dans l'air sec à 500 hPa et 25°C

# Dépendance en pression

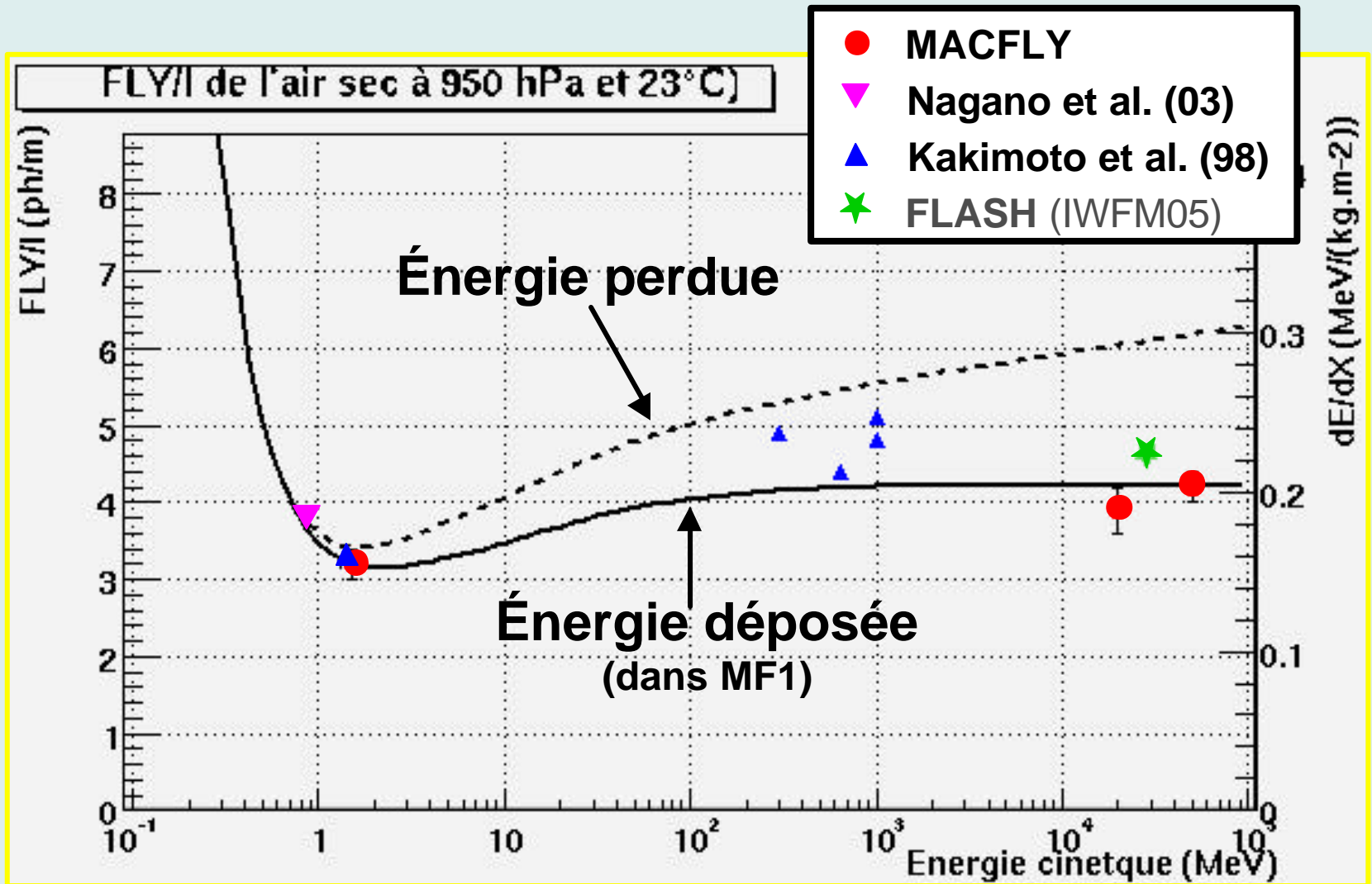
Fluo. induite par un électron de 50 GeV dans l'air sec à 28°C



Résultats semblables aux mesures du même type (avec filtres)

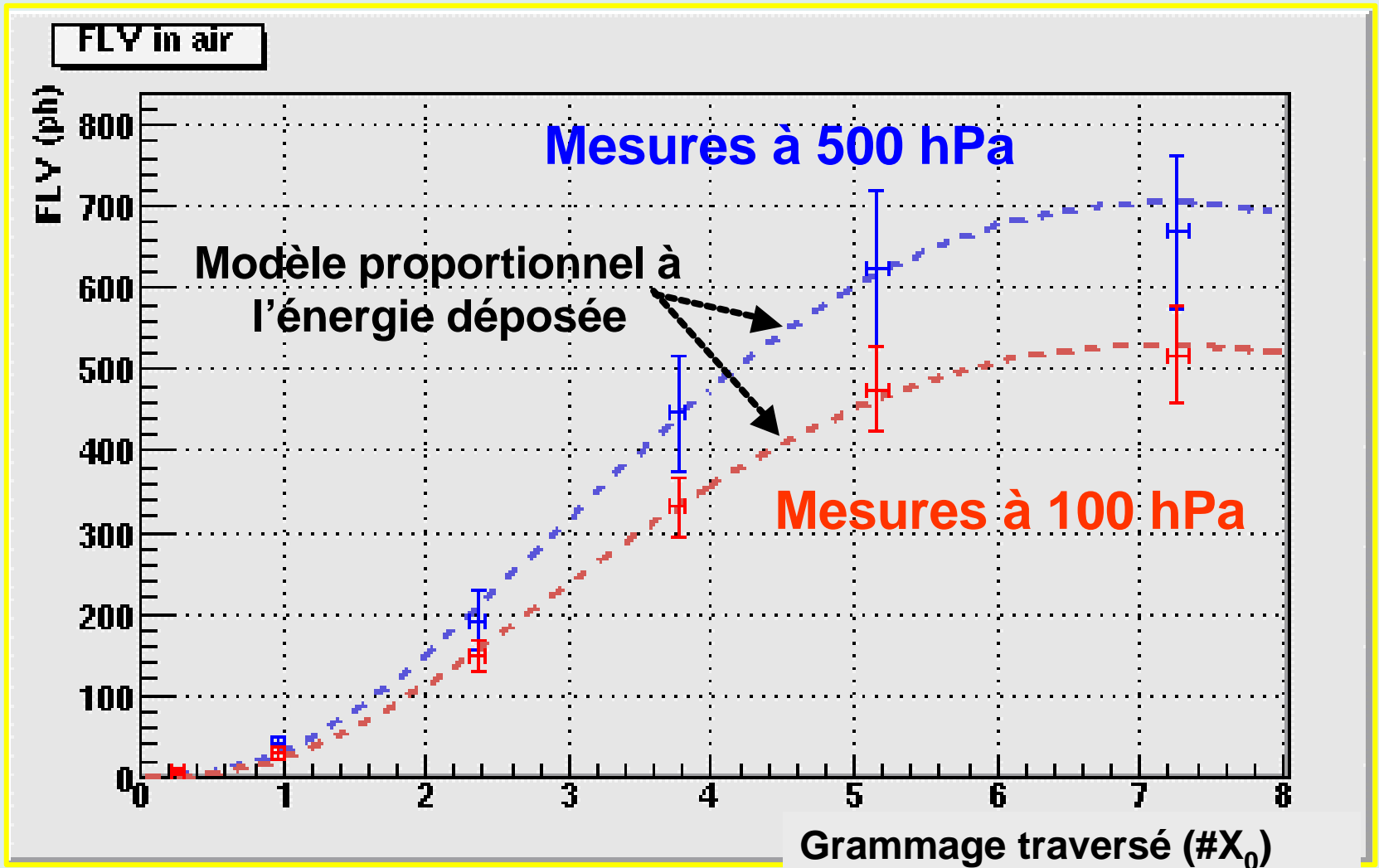


# Variations avec l'énergie des électrons



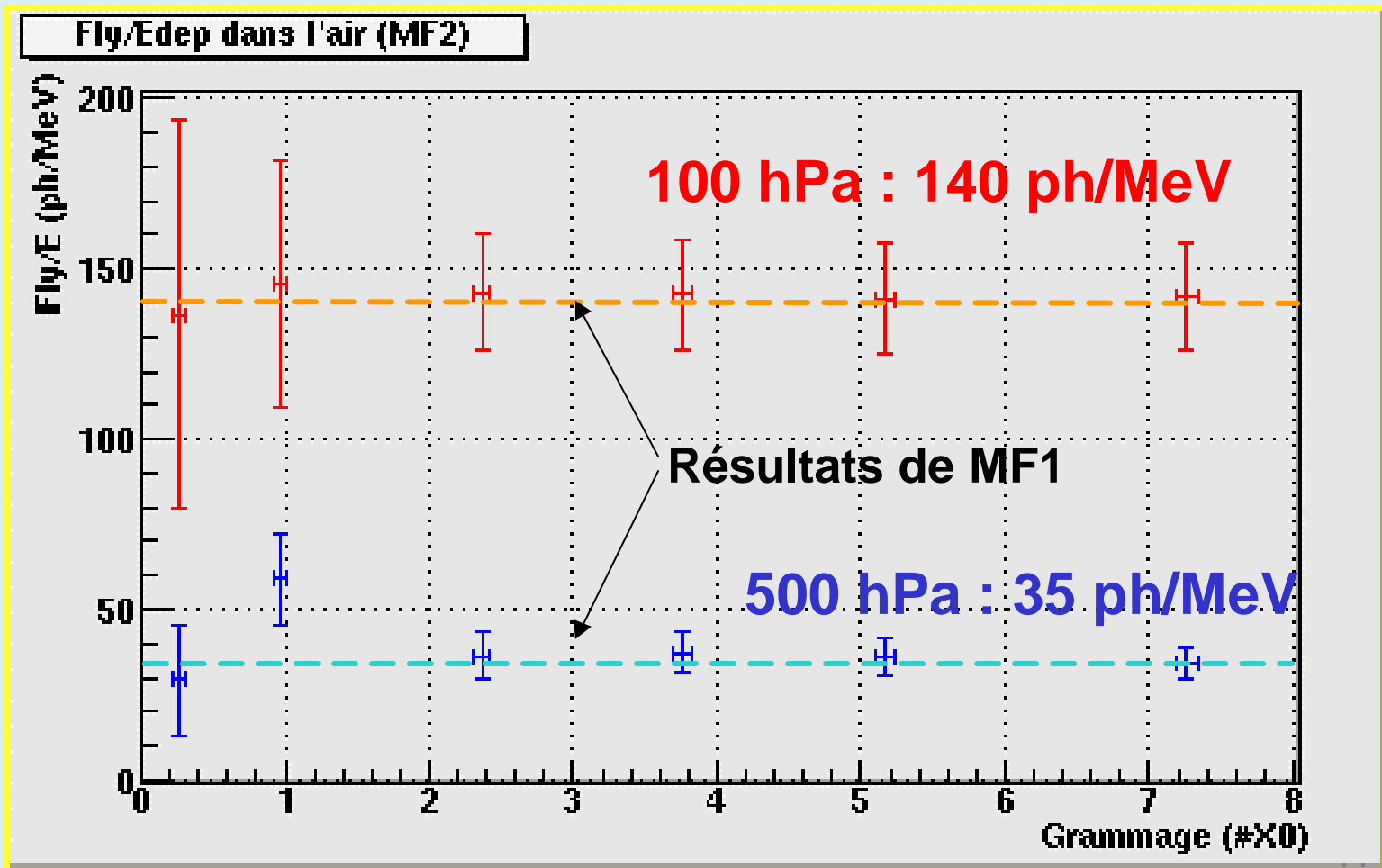
$$\text{FLY}/E_{\text{dep}} (E_c) = \text{Cste} = 19 \text{ ph/MeV} (950\text{hPa et } 23^\circ \text{C})$$

# Variation avec l'âge de la gerbe



**Gerbe de 50 GeV dans l'air sec à 100 hPa et 500 hPa et 25°C**

# FLY/E en fonction de l'âge de la gerbe



$$\text{FLY}/E_{\text{dep}}(X) = \text{Cste} :$$

Propriétés de la fluorescence  
indépendantes de l'âge de la gerbe

# Conclusion et perspectives

**Mesures réalisées** : (intensité absolue : ~20%)

- > Fluorescence de **l'air sec** et de **l'azote pur**.
- > **1<sup>ère</sup> Mesure** de la Fluo. induite par **une gerbe**.
- > Variation avec **la pression** de l'air et de l'azote
  - ⇒ **Ajustement du modèle de Fluorescence :**
- > Variation avec **l'énergie** des  $e^-$  et **l'âge** de la gerbe
  - ⇒ **Rendement indépendant de l'excitation**

## **Futur :**

- > Variation avec **la température** (phasotron Dubna)
- > **Étalonnage de MF1**

⇒ **Mesures du CERN : ~12% ; Nouvelles mesures : <10%**

# Plan de l'exposé

- **Contexte scientifique**
- **Le projet EUSO**
- **La reconstruction des gerbes atmosphériques**
- **La fluorescence de l'air**
- **L'expérience MACFLY**
- **Conclusion**

# Conclusion générale

**Projet EUSO**



Validation du concept :

**Reconstruction des gerbes atmosphériques vues depuis l'espace par leur propre signal**

**Expérience  
MACFLY**

Réalisation d'une expérience  
de mesure de la Fluo. de l'air :

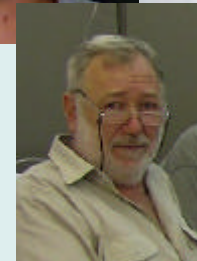
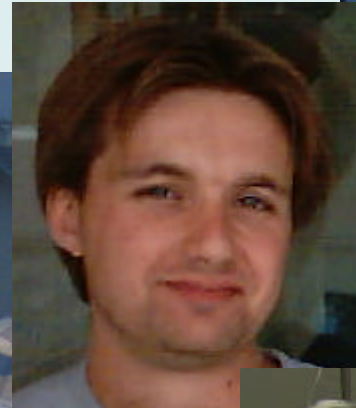
MF1  **Particules d'énergies de 1 MeV à 100 GeV**

MF2  **Gerbes électromagnétiques de différents âges**

**Premières mesures (mondiales) avec des gerbes :  
résultat conforme au modèle de fluorescence**



Merci







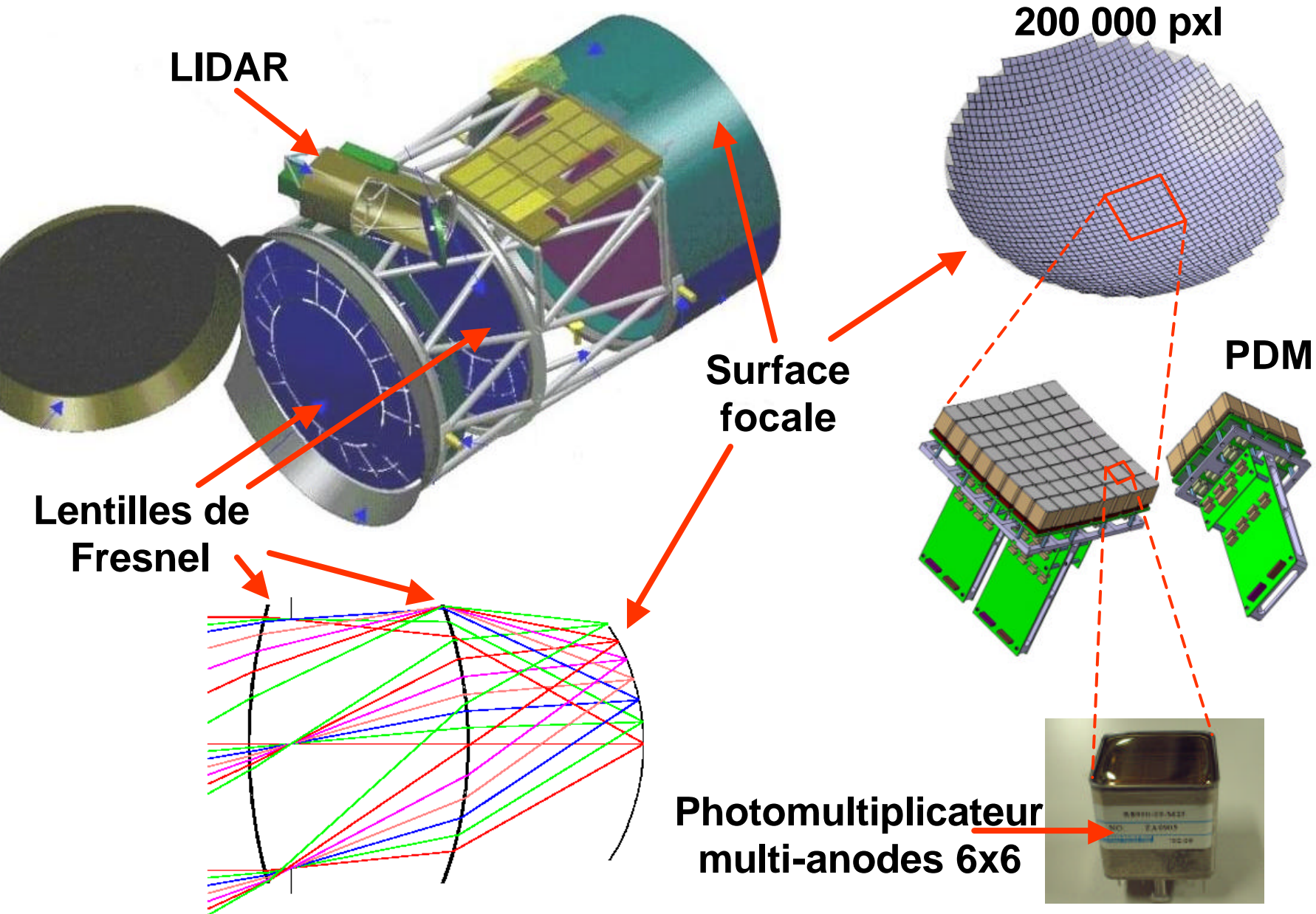




Bonus

EUSO

# Gros plan sur le détecteur

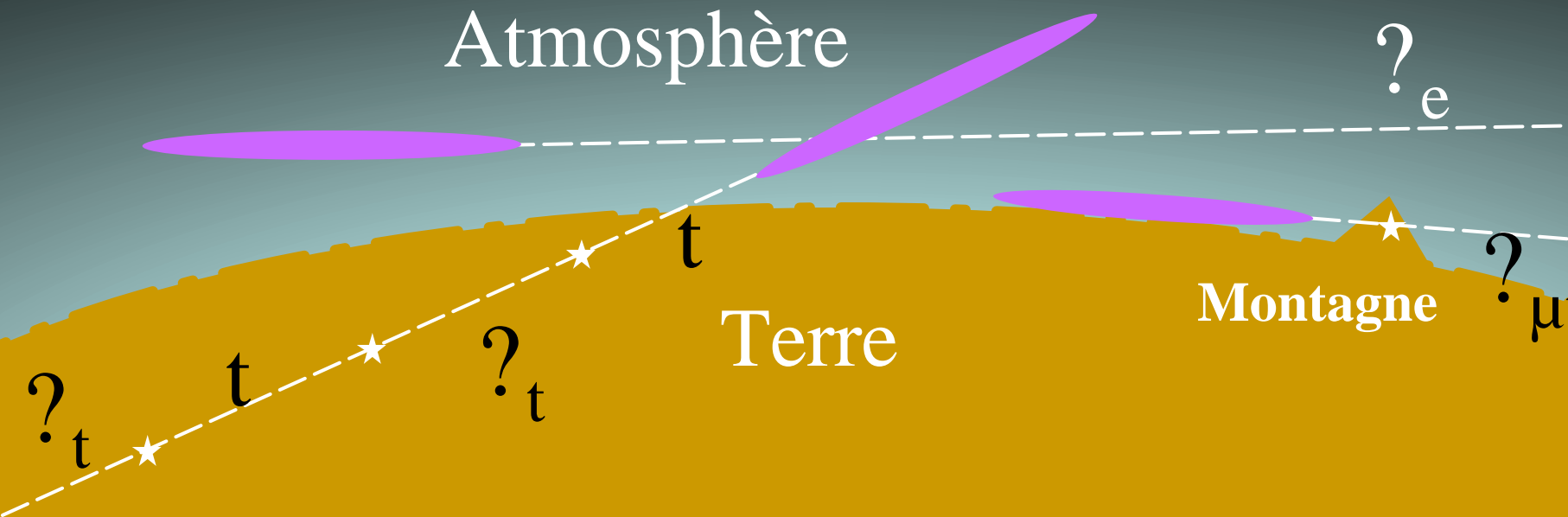


# Astronomie neutrino avec EUSO

## Grâce à notre méthode :

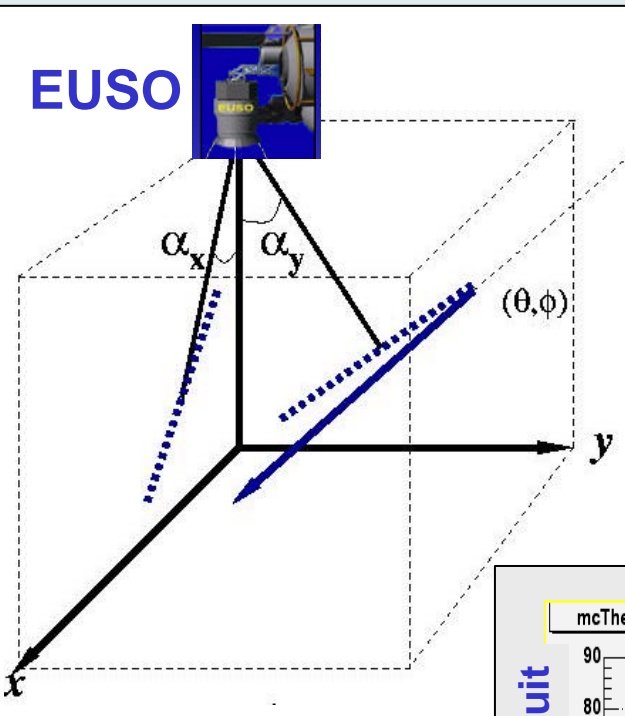
- Reconstruction des gerbes horizontales possible
- Augmente l'acceptance d'EUSO pour les neutrinos

Gerbes atmosphériques initiées par des neutrinos ultra énergétiques



# RECONSTRUCTION

# Reconstruction de la direction



## Information:

Angles d'arriver des photons chaque GTU

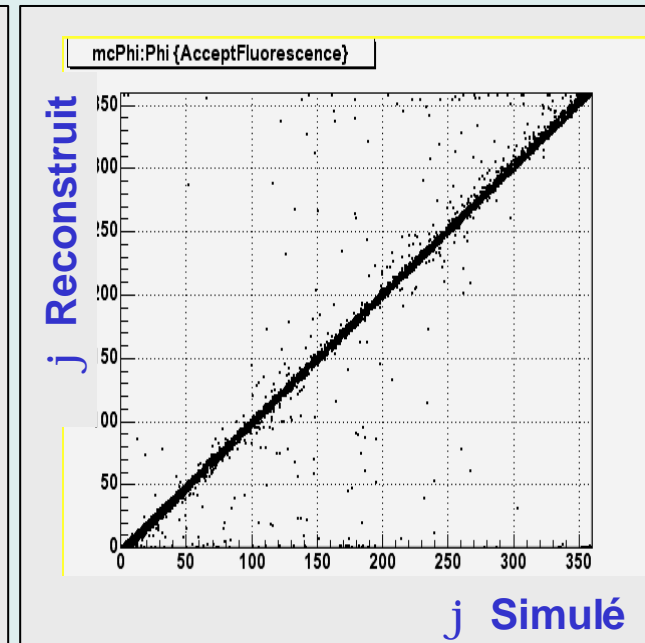
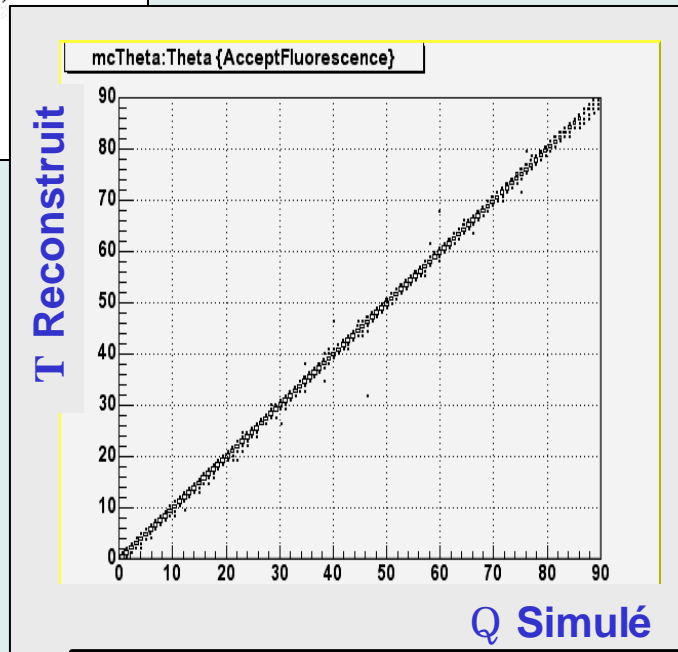
$\Rightarrow a_x^i, a_y^i$

Il y a une relation géométrique entre  $(\alpha_x^i, \alpha_y^i)$  et les angles  $(\theta, \phi)$  de la gerbe

## Teste de la méthode:

Direction:

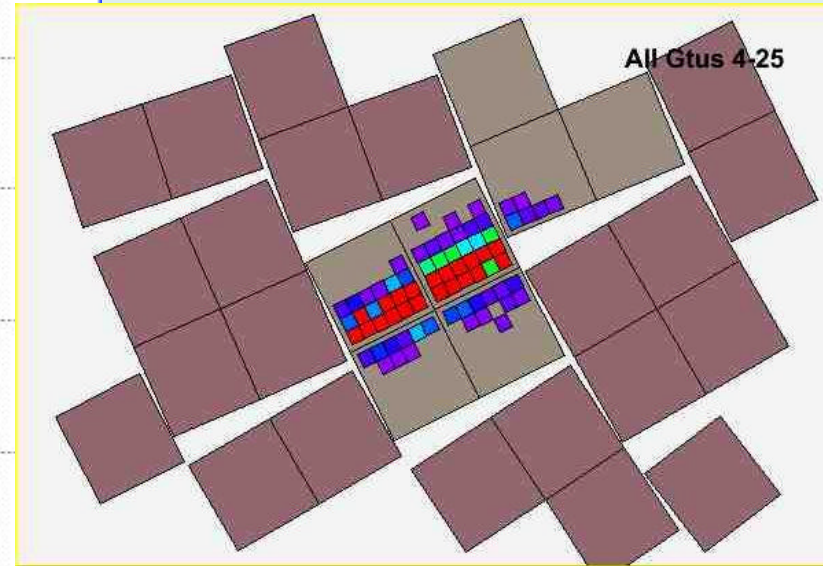
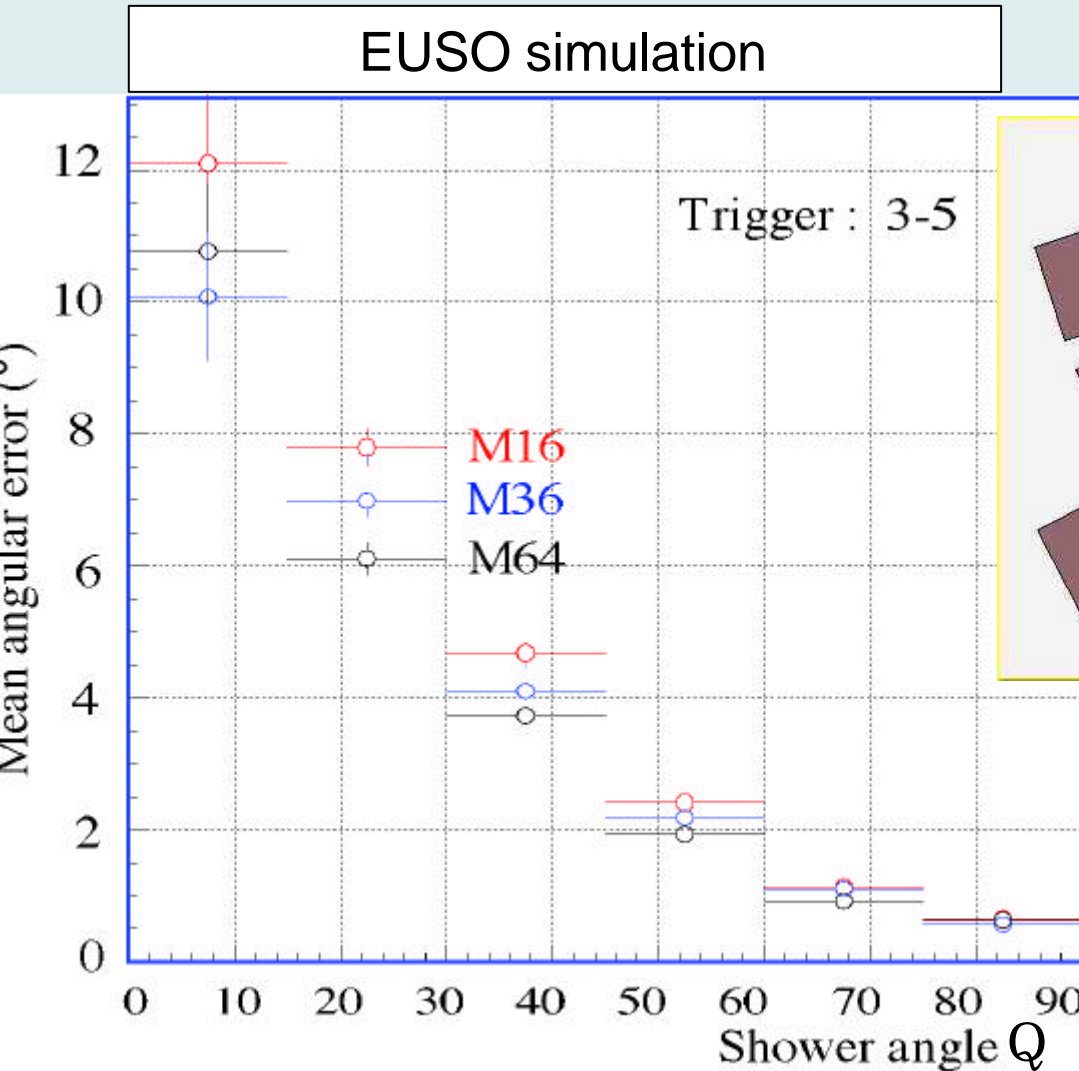
$S \sim 2^\circ$



Simulation avec une résolution infinie



# Reconstruction des angles avec la pixelisation:



Événement sur la surface focale d'EUSO (M36)



**Photomultiplicateur multi-anodes (4\*4, 6\*6 ou 8\*8)**

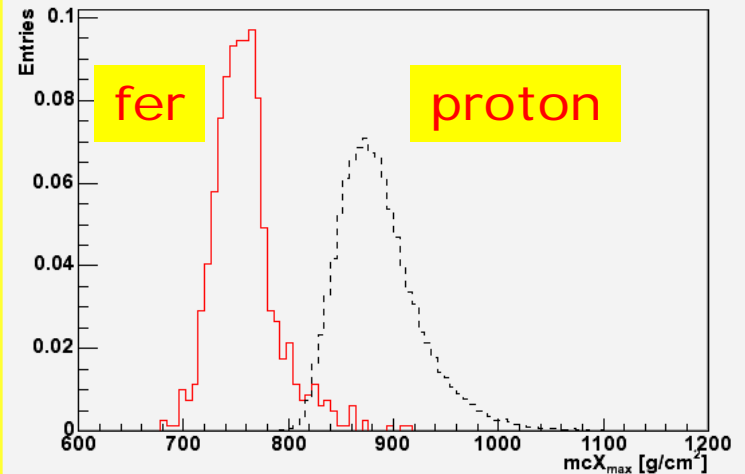
# Reconstruction de la nature du RCUE

$X_{\max}$  change en fonction de E/A

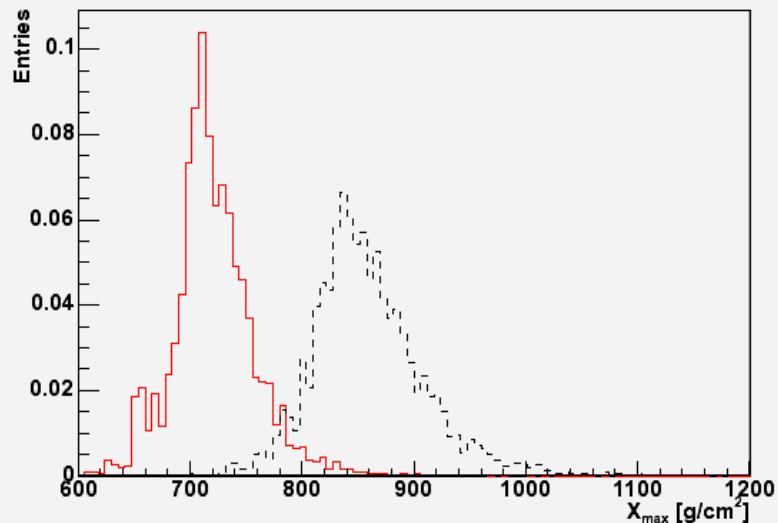
Test avec 10 000 protons et 10 000 noyau de fer



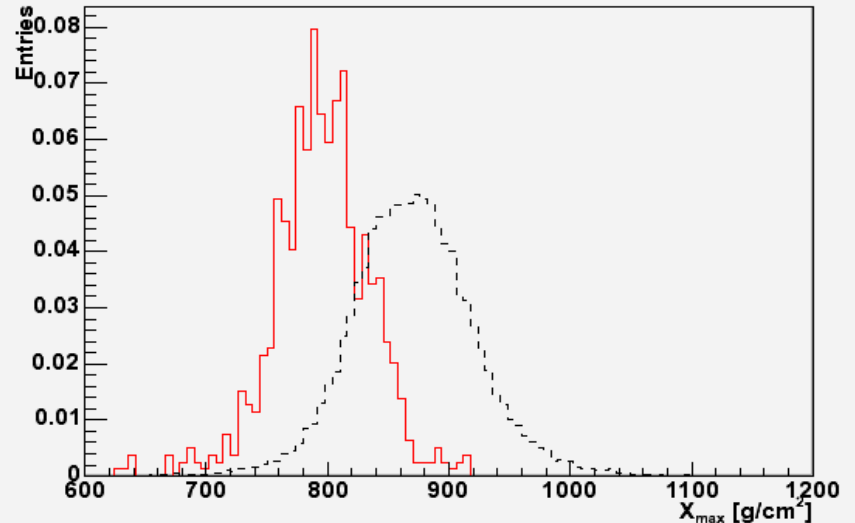
simulation de  $X_{\max}(\text{g/cm}^2)$



$X_{\max}$  Reconstruit (en or)

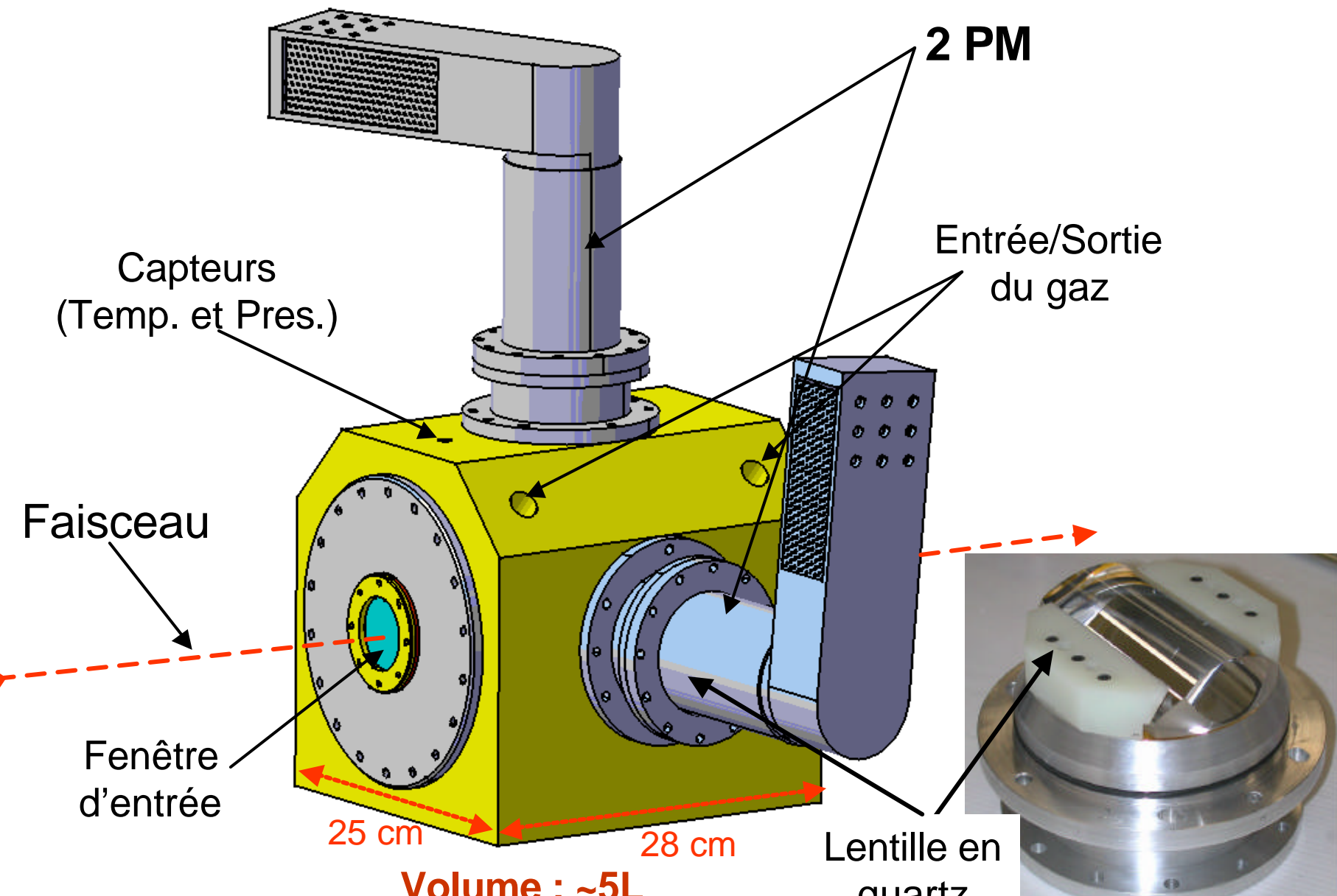


$X_{\max}$  Reconstruit (Fluo.)



**MACFLY**

# Macfly 1 (MF1)



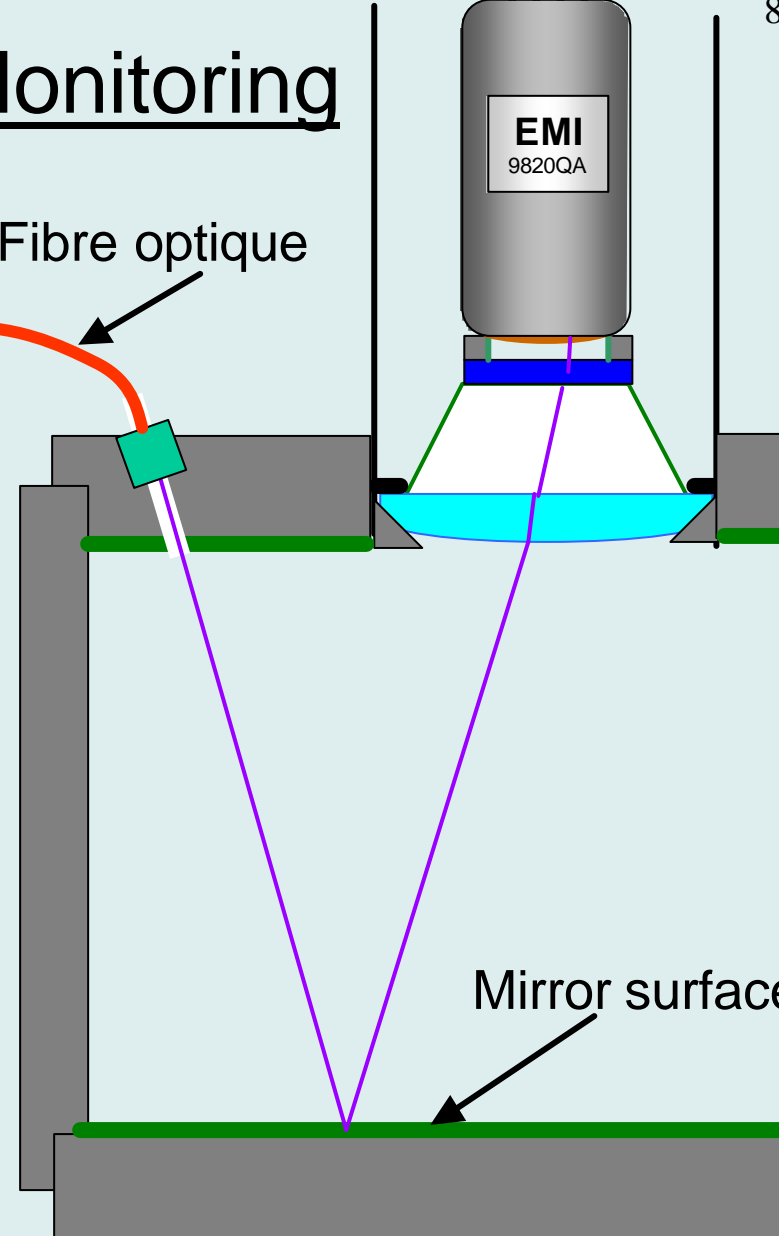
# Calibration and Monitoring

Light Source

Fibre optique

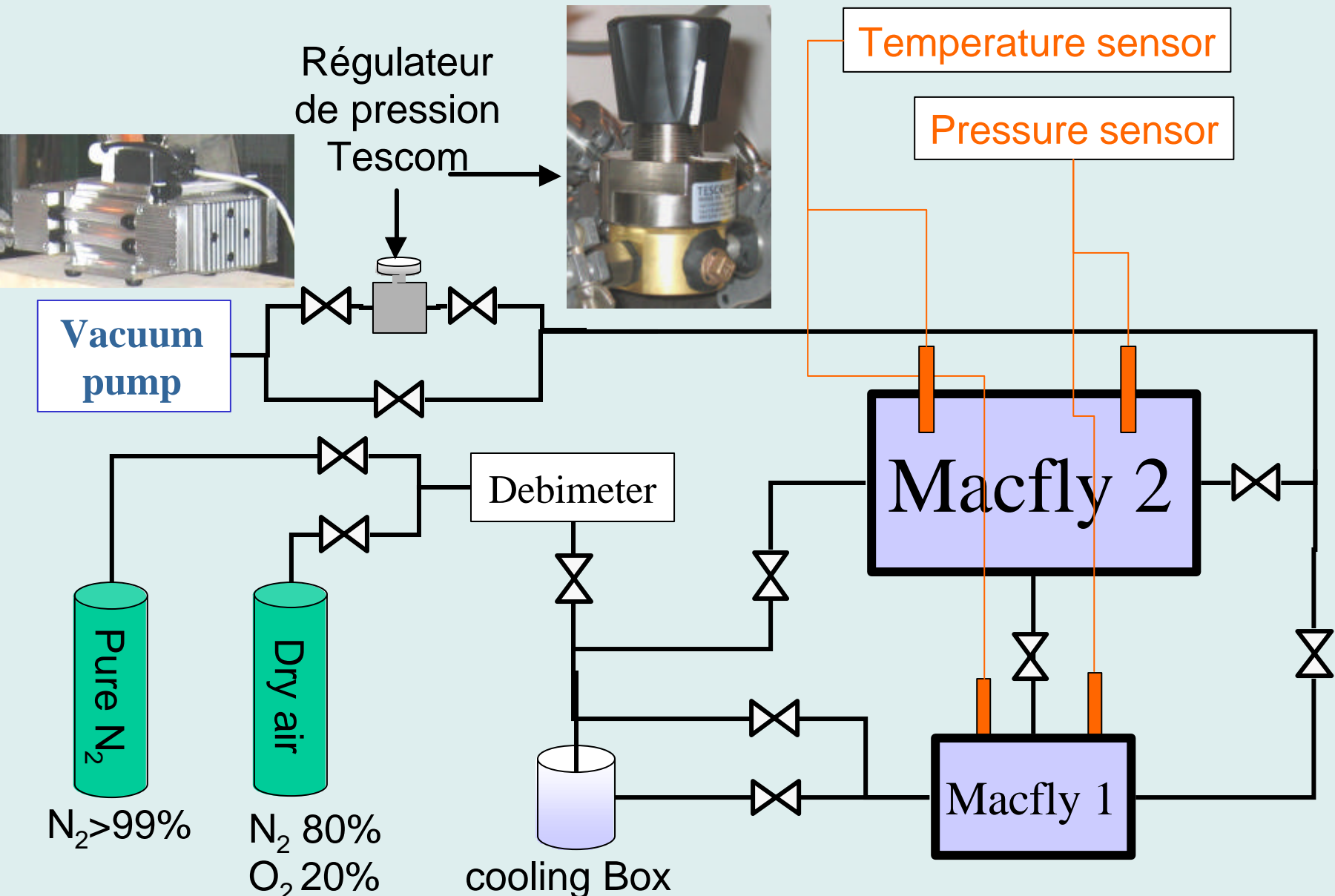
EMI  
9820QA

Source de lumière	Longueur d'onde
Spectro (lampe Xe)	240 to 800 nm
DEL pulsée bleue	480 nm
DEL pulsée UV	370 nm



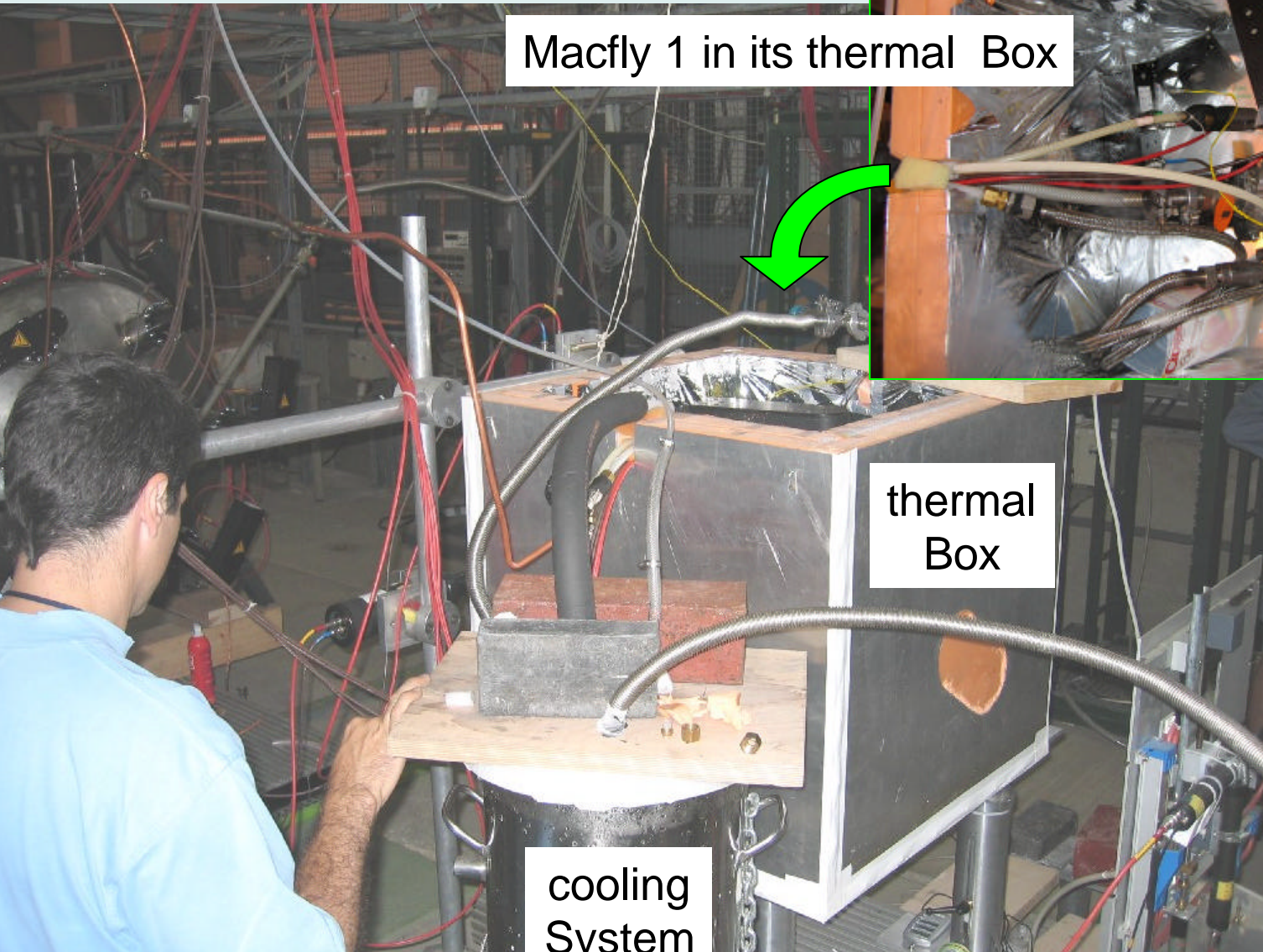
Mirror surface

# Gas system

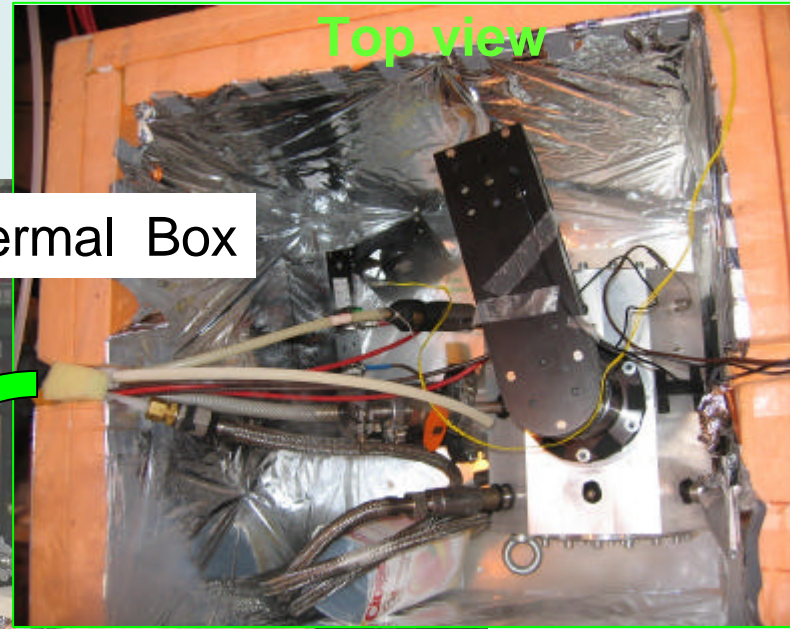




# Boite thermique



Macfly 1 in its thermal Box



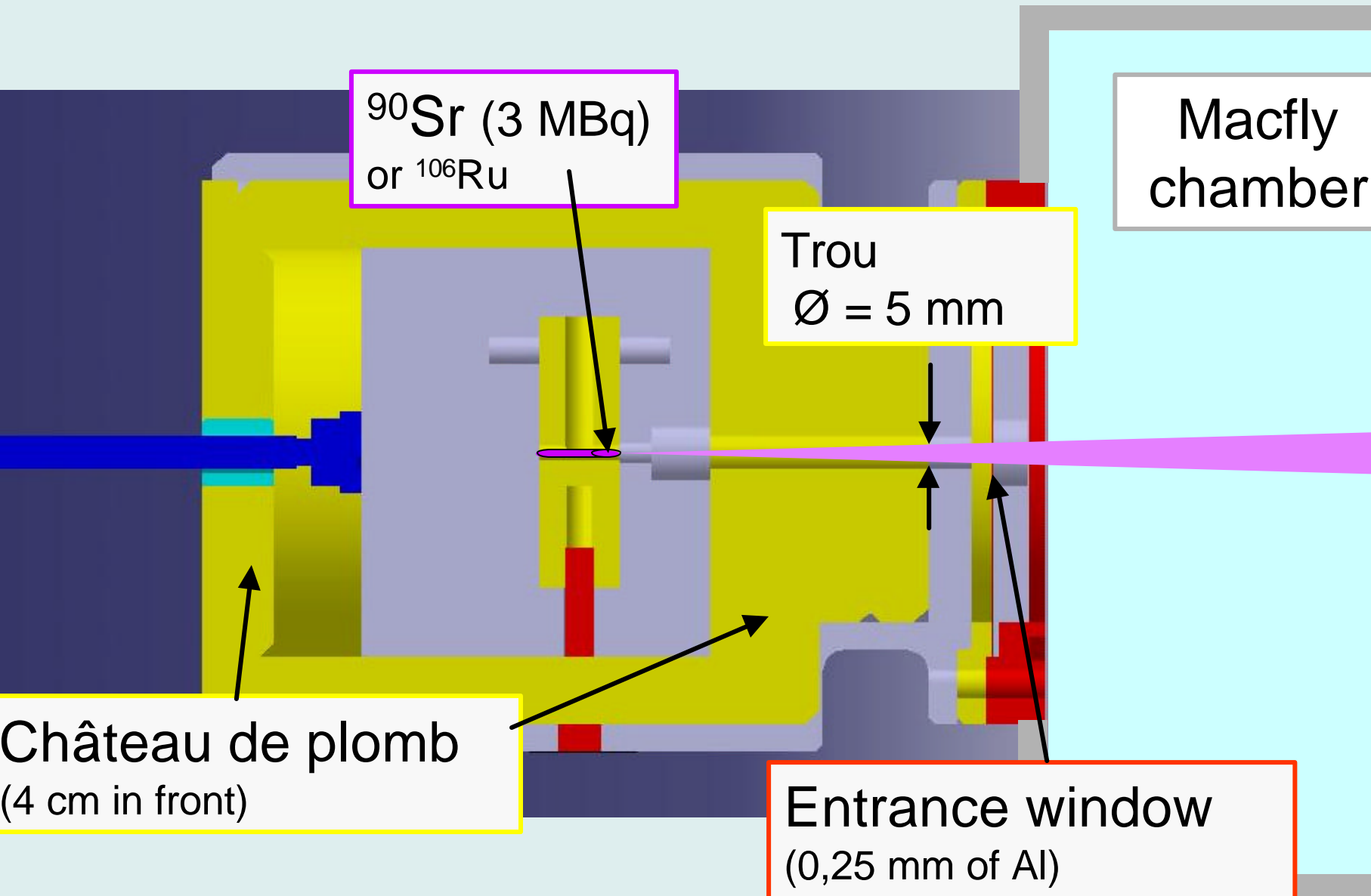
Top view

thermal  
Box

cooling  
System

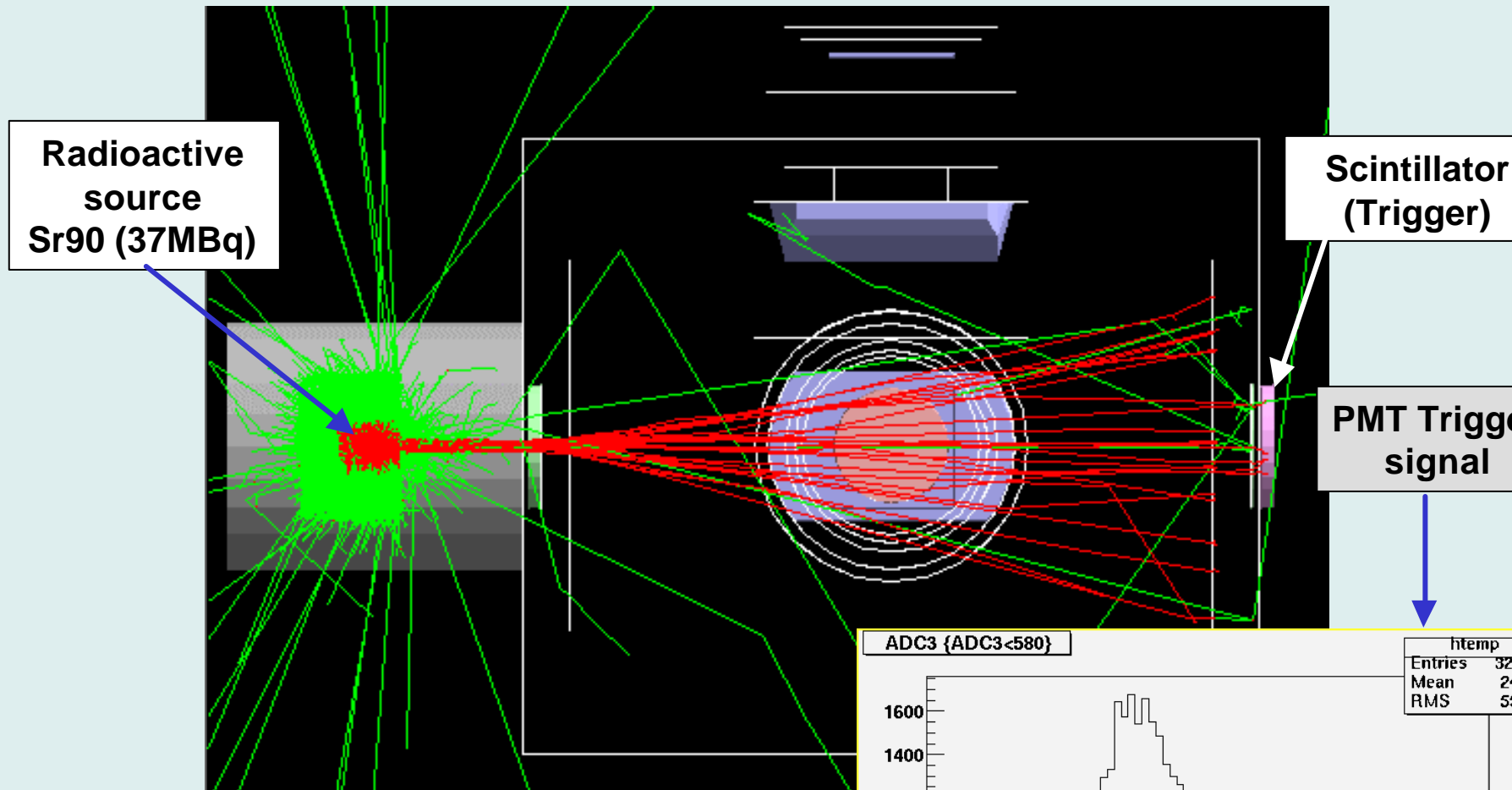
Liquid  
Nitrogen

# Radio-active source system



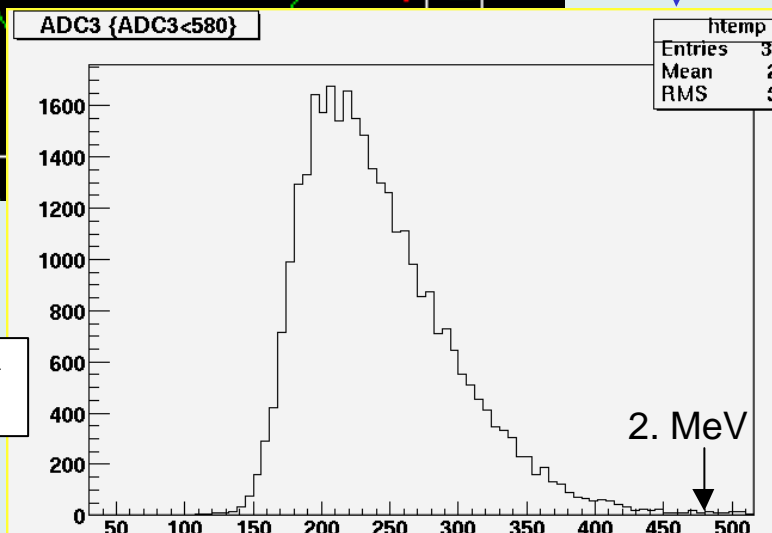


# MF-1: Mesure en source $^{137}\text{Cs}$



Mean energy in scintillator ? 1. MeV

Mean energy of electrons in gas ? 1.5 MeV



# Faisceau CERN SPS X5

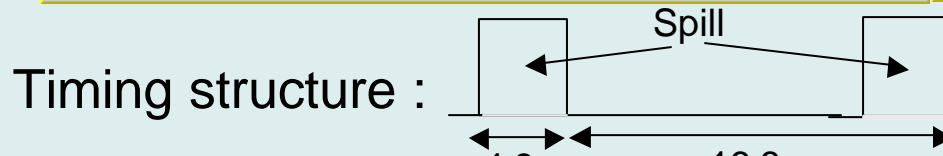
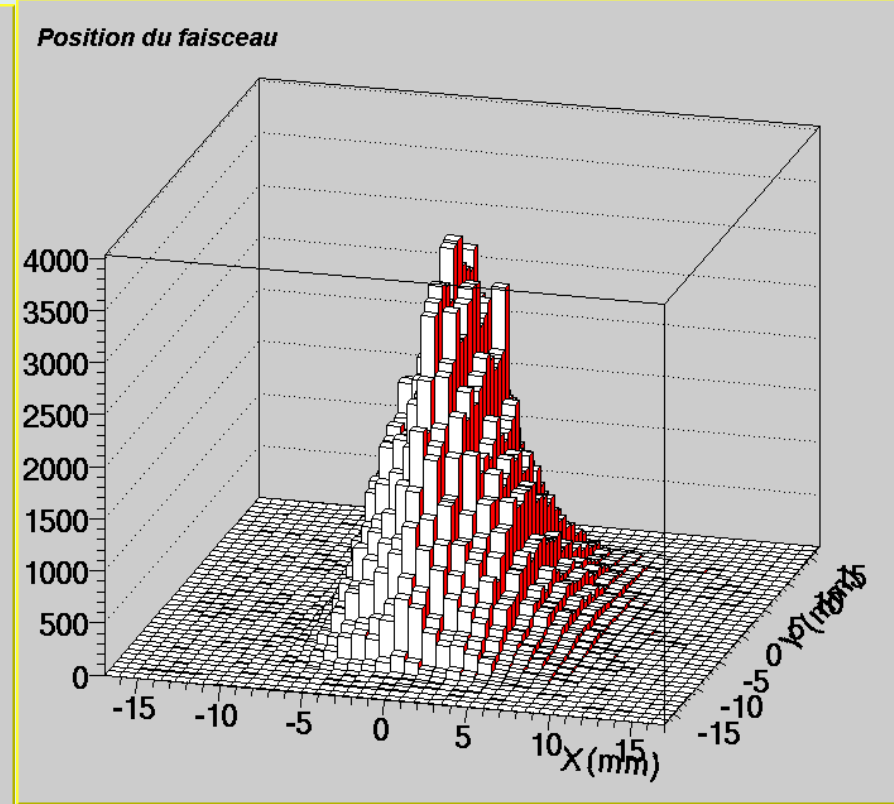
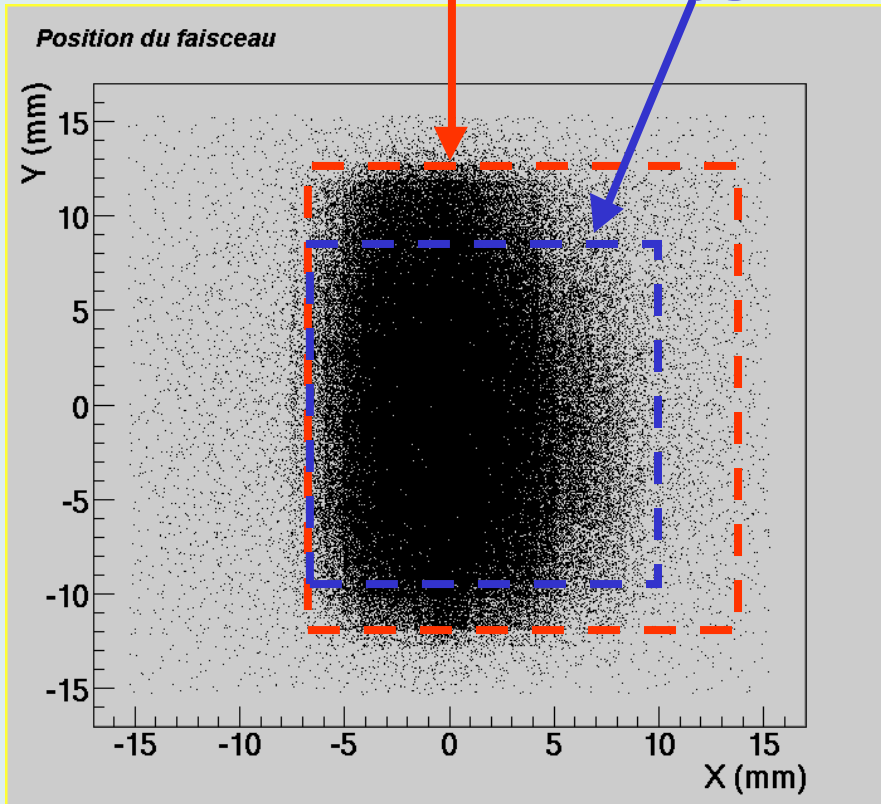
Analyse des données de la chambre à retard :

$$s_X^{\text{beam}} = 3,2 \text{ mm}$$

$$s_Y^{\text{beam}} = 5,7 \text{ mm}$$

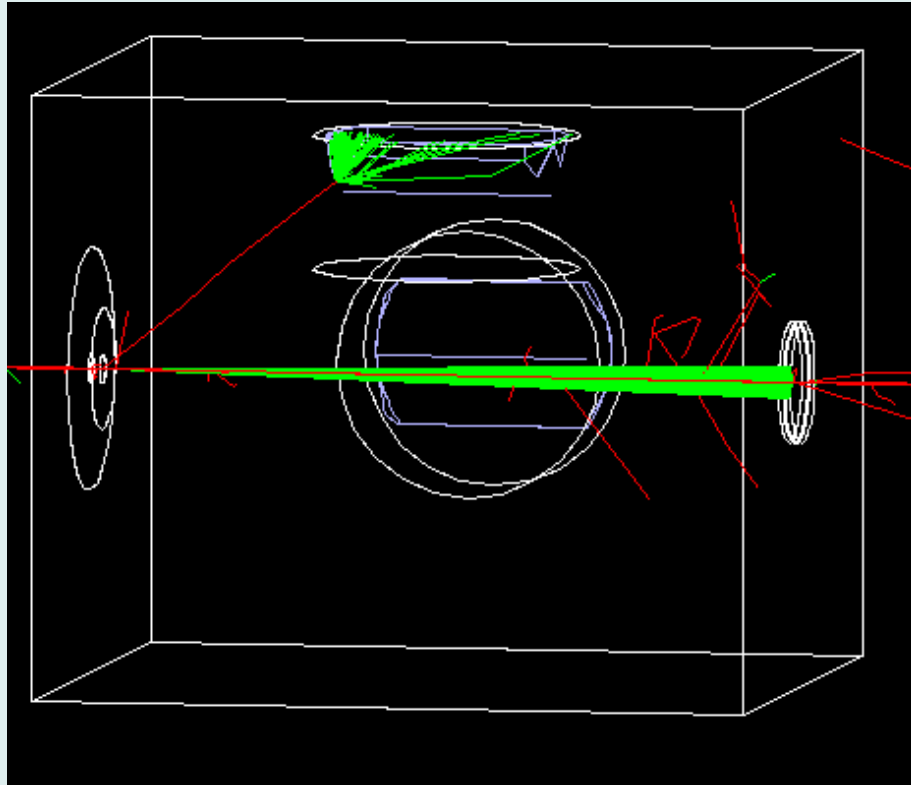
Trigger large

Trigger étroit



? 10 000 particles/spill

# MF1: Simulation du bruit de fond



**In Green** : Cerenkov photon

**d ray through lenses :**  
Background stable with pressure.

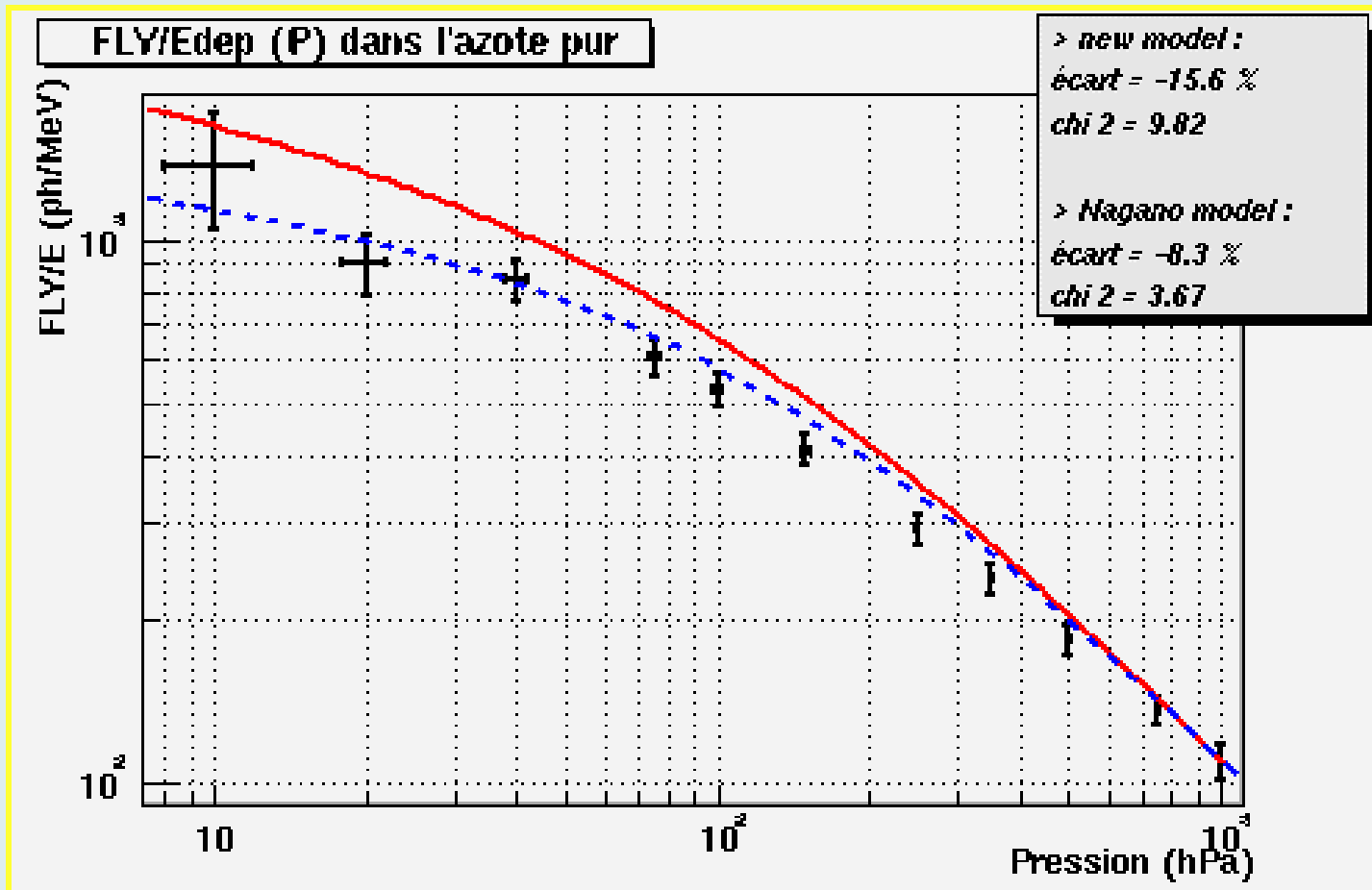
**G4 simulation :**

Perfectly centered beam	0.5 mpe
CERN beam like shape	1.8 mpe

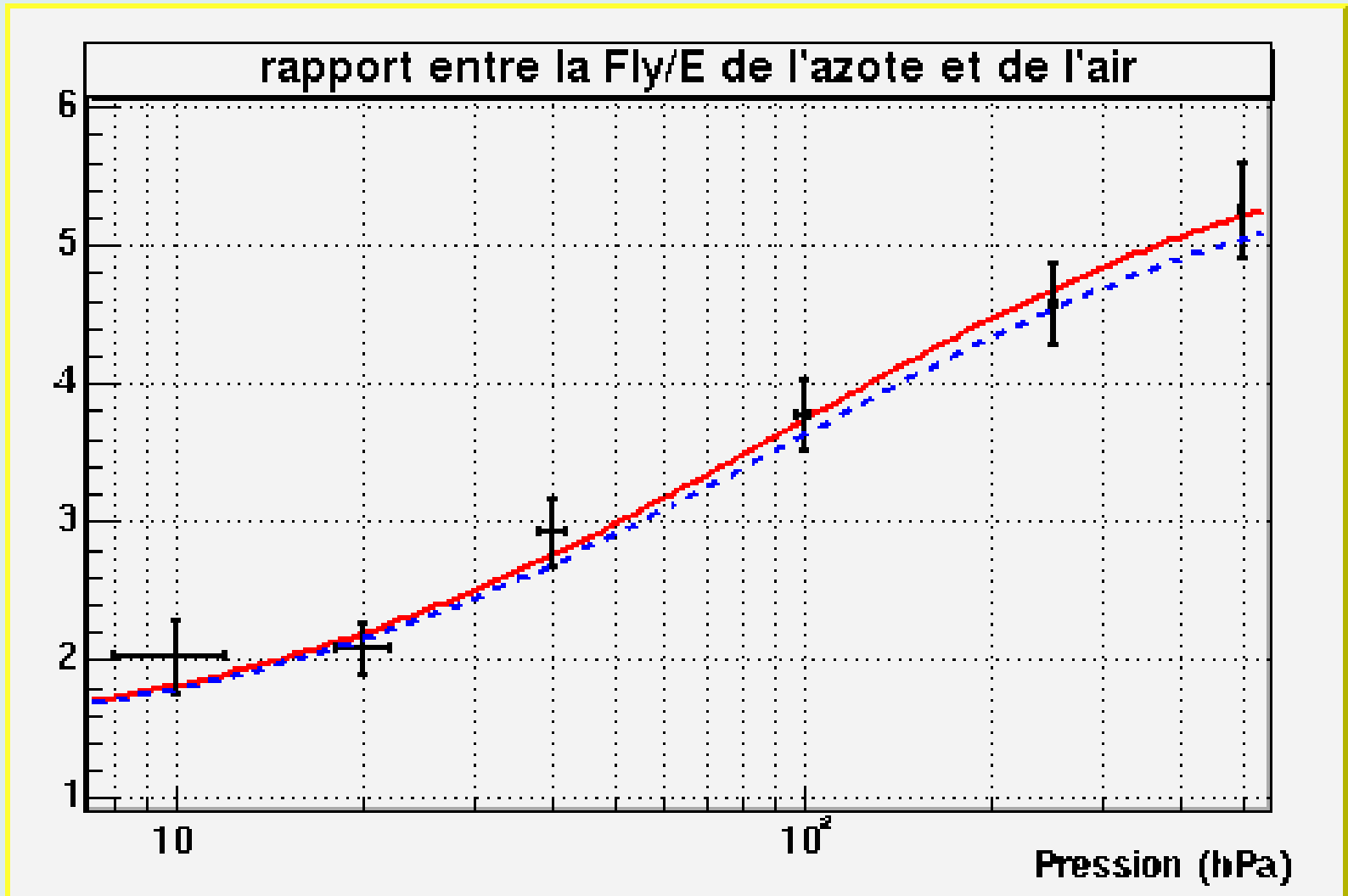
**Detected light in vacuum:**

**$1.6 \pm 0.2$  mpe**

# FLY/E de l'azote pur en fonction de la pression

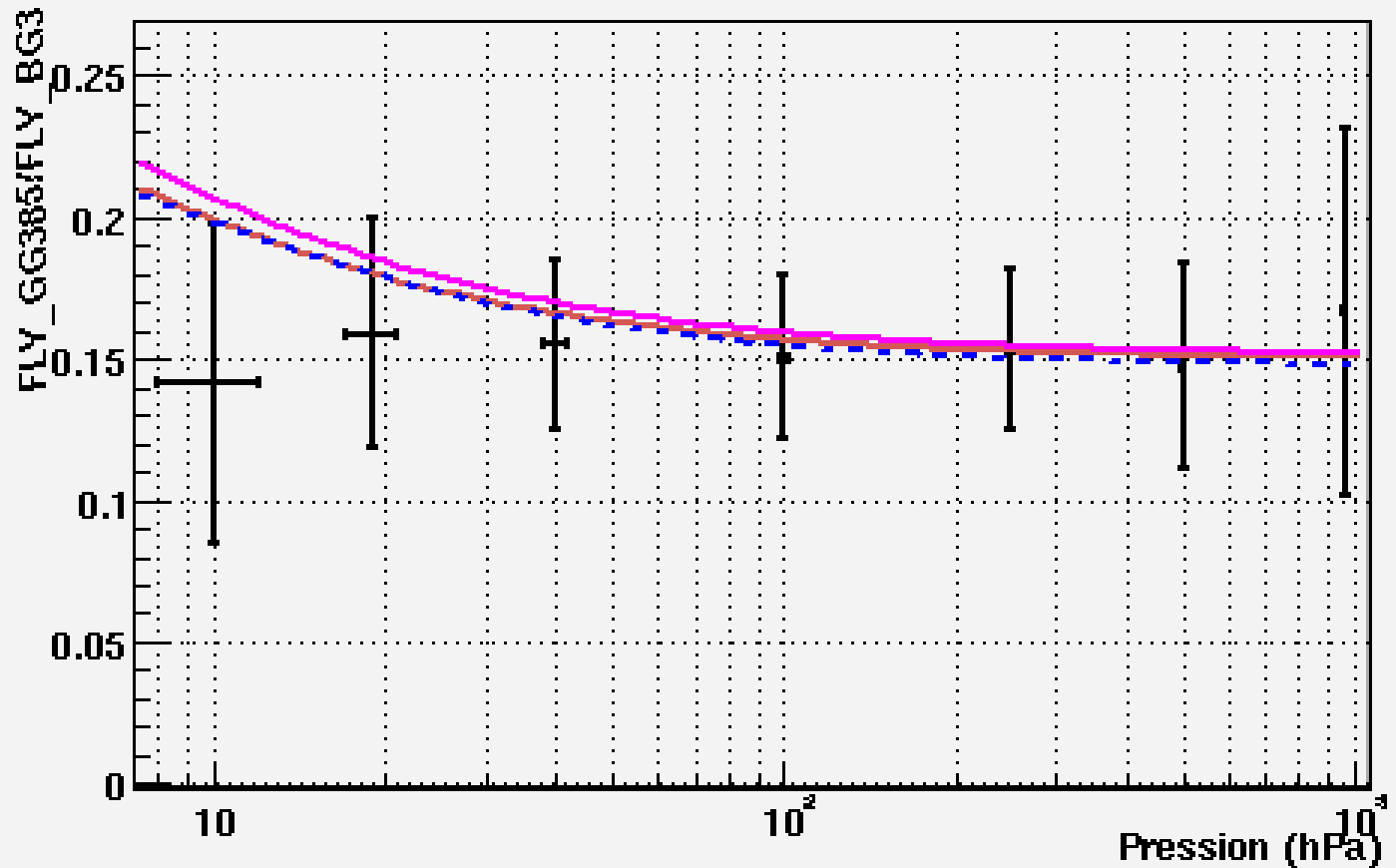


# Comparaison azote pur/air sec



# BG3/GG385

FLY GG385/BG3 (P) dans l'air



# Apport de l'expérience MACFLY

## Dépendances : Après MACFLY

- La pression ( 0 à 1 atm )
- La température
- La composition de l'air ( $O_2$ , Ar, humidité...)
- **L'énergie des particules** ←
- La densité des particules
- La nature des particules ( $e^-$ , ?,  $\pi$ ,  $p$ ...) ←
- **L'age de la gerbe** ←
- La présence de rayonnement Cerenkov ←

- bien mesurée
- qq mesures
- aucune mesure