

# Le projet PMm<sup>2</sup>

*Des  
photomultiplicateurs  
les pieds dans l'eau*

Jean Peyré

CSNSM (Centre de Sciences Nucléaires et  
de Sciences de la Matière)  
CNRS-IN2P3-Université Paris Sud (Paris-Saclay)

91405 Orsay, France  
Tél. : +33 1 69 15 52 43  
Fax : +33 1 69 15 50 08  
<http://www.csnsm.in2p3.fr>



Jean.Peyre@csnsm.in2p3.fr

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



ANR - IPNO - LAL - LAPP - Photonis



## PMm<sup>2</sup>

### Sommaire

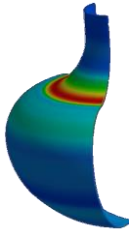
- 1) *Le projet PMm<sup>2</sup>*
- 2) *Détermination de la limite à la rupture du verre*
- 3) *Calculs de résistance pour quelques PMt de grande taille*
- 4) *Calcul des contraintes au pied pour quelques PMt de grande taille*
- 5) *Dessin d'un nouveau PMt de taille 12"*
- 6) *Mesures avec jauges de contraintes*
- 7) *Démonstrateur PMm<sup>2</sup>*



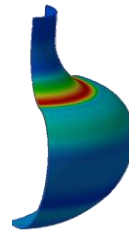
Jean Peyré

P.2

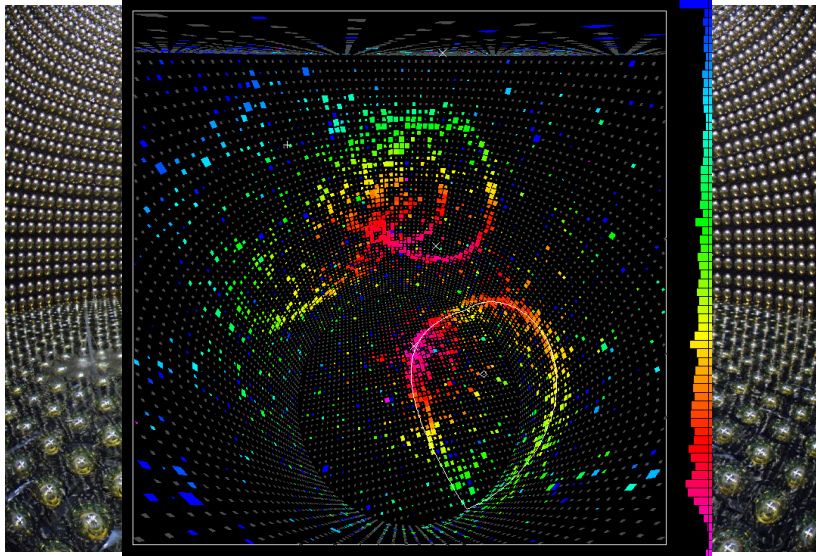
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



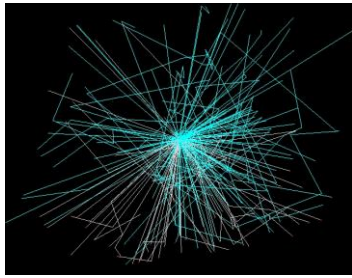
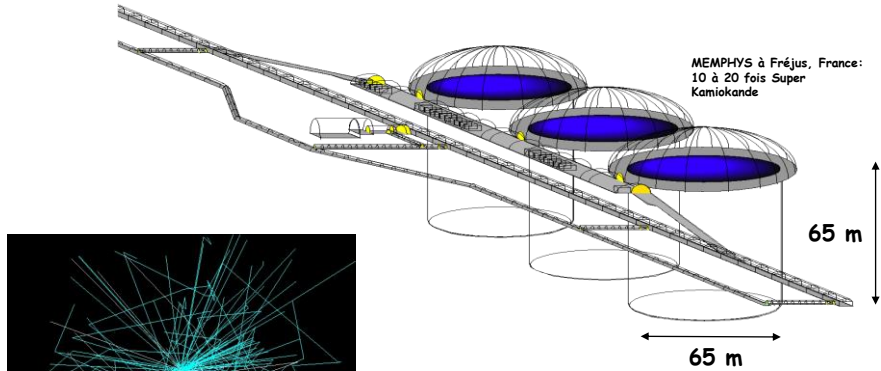
# 1) Le projet PMm<sup>2</sup>



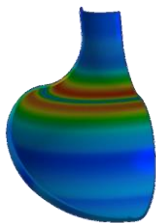
## Principe de détection



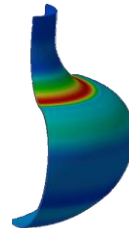
## Les projets



- Passer de  $10^4$  à  $10^5$  tubes
- Sites possibles : USA, Japon, Europe



## 2) Détermination de la limite à la rupture du verre





## Quelques caractéristiques de verres

- Verre Sodocalcique (soft glass) ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ )
- Verre Borosilicate (hard glass) ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ )
  - excellente résistance à l'eau quand la quantité de  $\text{B}_2\text{O}_3$  équivaut celle en  $\text{Na}_2\text{O}$
- Module Young
  - Sodocalcique  $E=70-74$  GPa
  - Borosilicate  $E=64-89$  GPa
- Limite à la rupture en compression: 35-100 MPa
- Le verre est sensible aux objets pointus .....



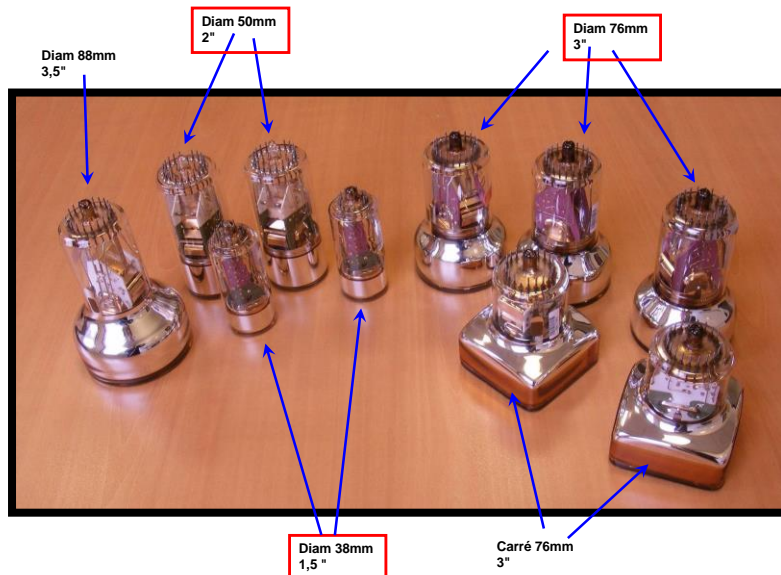
Jean Peyré

P.7

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## PMt rebus pour tests



Jean Peyré

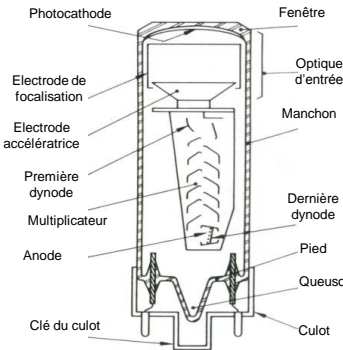
P.8

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Photomultiplicateur

Le Photomultiplicateur (PM) est composé de:



❑ d'une photocathode qui effectue la **conversion du flux de photons incidents en un flux d'électrons** par effet photoélectrique.

❑ d'une optique d'entrée constituée d'une ou de plusieurs électrodes de focalisation et d'une électrode accélératrice. L'optique d'entrée est destinée à **concentrer tous les électrons issus de la photocathode sur la première électrode** du photomultiplicateur.

❑ d'un **multiplicateur d'électrons** formé d'une succession d'électrodes appelées dynodes, lesquelles multiplient en cascade le nombre des électrons pénétrant dans le photomultiplicateur.

❑ enfin, d'une **anode chargée de recueillir le flux d'électrons** issu de la dernière dynode du photomultiplicateur et sur laquelle est prélevé le signal de sortie.



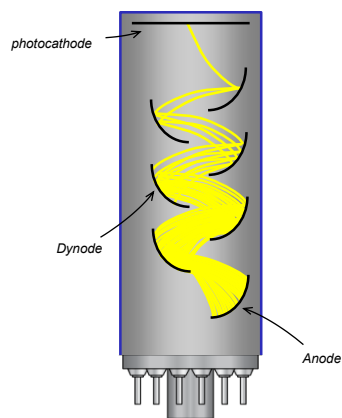
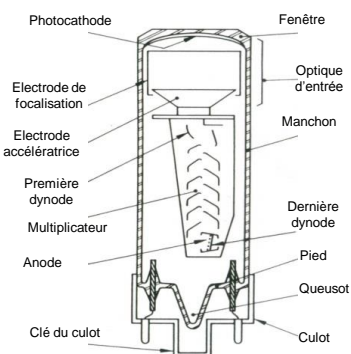
Jean Peyré

P.9

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Photomultiplicateur



Jean Peyré

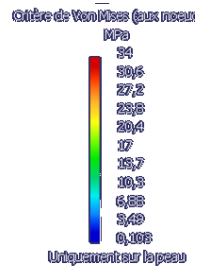
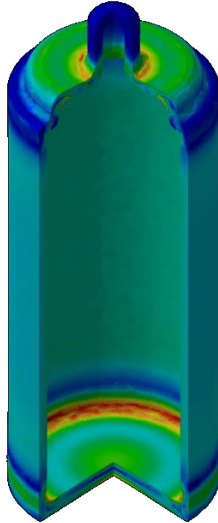
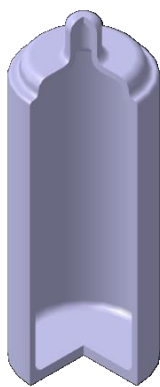
P.10

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



### PMT diam 38mm (1,5")

- **Contrainte Maximale pour 10 bars: 34 MPa**



Jean Peyré

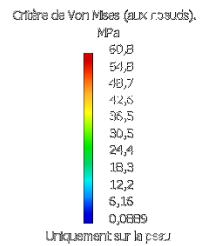
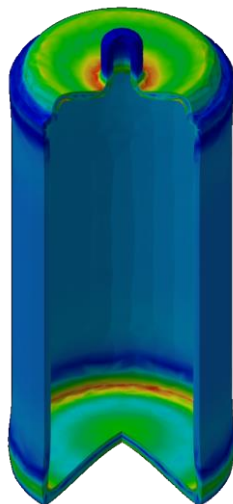
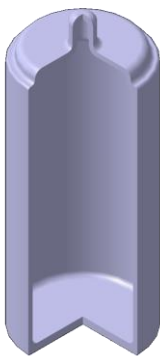
P.11

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



### PMT diam 50mm (2")

- **Contrainte Maximale pour 10 bars : 61 MPa**



Jean Peyré

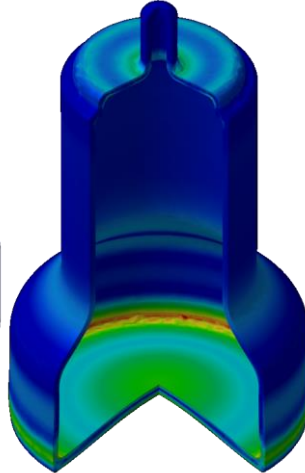
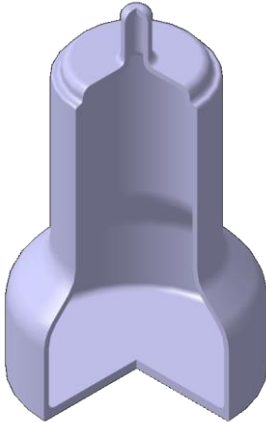
P.12

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## PMT diam 76mm (3")

- **Contrainte Maximale pour 10 bars : 159 MPa**



Catégorie de Von Mises (aux noeuds)

MPa

159

144

128

112

95,7

79,8

63,9

47,9

32

16

0,0066

Uniquement sur la peau



Jean Peyré

P.13

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Tests sous pression : 1/ une cuve



Jean Peyré

P.14

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Tests sous pression : 2/ un filet de pêche



Diam 50mm  
2 "

Diam 38mm  
1,5 "

Diam 76mm  
3 "



Jean Peyré

P.15

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Tests sous pression : 3/ résultat



Diam 50mm  
2 "

Diam 38mm  
1,5 "

Diam 76mm  
3 "

Rupture = 6,5 bars

Rupture =16,3 bars

Rupture =3,2 bars



Jean Peyré

P.16

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



**PMm<sup>2</sup>**

**PMT diam 76mm (3")**

**Rupture à 3,2 bars**



**Rupture de la  
fenêtre d'entrée**



Jean Peyré

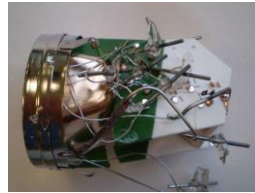
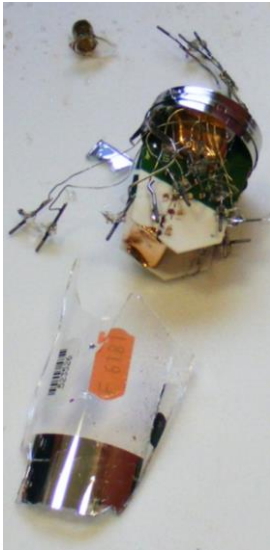
P.17

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

**PMm<sup>2</sup>**

**PMT diam 50mm (2")**

**Rupture à 6,5 bars**



**Rupture au pied  
du PMt**



Jean Peyré

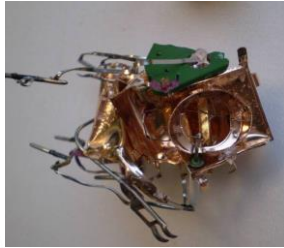
P.18

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

**PMm<sup>2</sup>**

**PMT diam 38mm (1,5")**

Rupture à 16,3 bars



Point de rupture ?



Jean Peyré

P.19

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

**PMm<sup>2</sup>**

**Les restes .....**



Jean Peyré

P.20

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Tests sous pression

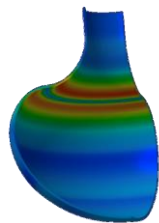
|   | 1,5"<br>(soft glass) | 2"<br>(hard glass) | 3"<br>(soft glass) |
|---|----------------------|--------------------|--------------------|
| Contrainte max sous<br>10 bars (calcul) | 34 MPa               | 61 MPa             | 159 MPa            |
| Rupture à                               | 16,3 bars            | 6,5 bars           | 3,2 bars           |
| Contrainte à la rupture                 | 55 MPa               | 40 MPa             | 51 MPa             |

### CONCLUSION:

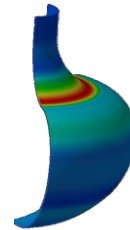
Limite à la rupture en compression  $R_m$ (glass borosilicate-SIMAX)  
donnée par la documentation: 35-100MPa

Contrainte à la rupture "soft glass" : 51-55 MPa

Contrainte à la rupture "hard glass" : 40 MPa



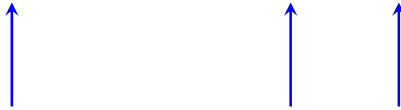
### 3) Calculs de résistance pour quelques PMt de grande taille



### Calculs de quelques PMt's



XP1803 5"    XP1806 8"    XP1802 9"    XP1805 9"    XP1804 10"    XP1807 12"



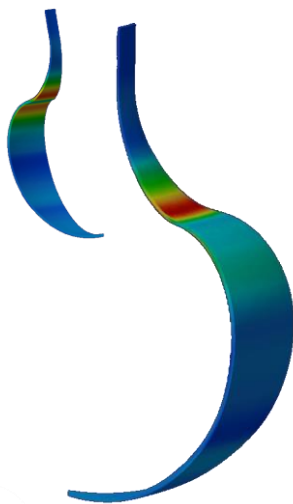
SPHERE

Calculs

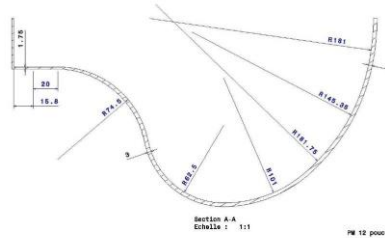


| Contrainte max sous 10 bars | 8"       | 10"      | 12"      |
|-----------------------------|----------|----------|----------|
| Sphère ép 3mm               | 18 MPa   | 22,3 MPa | 26,3 MPa |
| Sphère ép 4mm               | 13,6 MPa | 17 MPa   | 20 MPa   |
| Sphère ép 5mm               | 11,3 MPa | 13,7 MPa | 16,3 MPa |

### PMt 12" XP1807

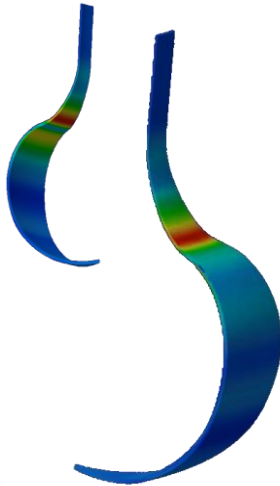


- **Contrainte max sous 10 bars: 158 MPa**
- **Sphère ép 3 diam 12" : 26,3 MPa**

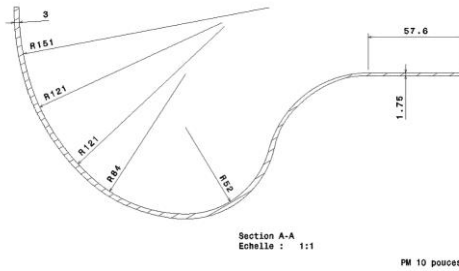




## PM 10 pouces XP1804



- **Contrainte max sous 10 bars: 154 MPa**
- **Sphère ép 3 diam 10" : 22,3 MPa**



Jean Peyré

P.25

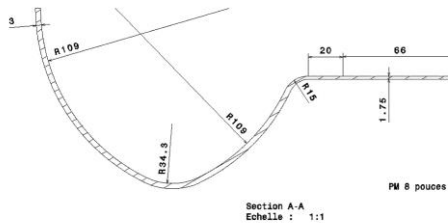
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## PM 8 pouces XP1806



- **Contrainte max sous 10 bars: 54 MPa**
- **Sphère ép 3 diam 8" : 18 MPa**



Jean Peyré

P.26

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Calculs de quelques PMt's

| Contrainte max sous 10 bars | 8"               | 10"               | 12"               |
|-----------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Pmt ép. 3mm                 | 54 MPa<br>XP1806 | 154 MPa<br>XP1804 | 158 MPa<br>XP1807 |
| Sphère ép. 3mm              | 18 MPa           | 22,3 MPa          | 26,3 MPa          |



1 PM diam 8" XP18060 (XP1806 renforcé)

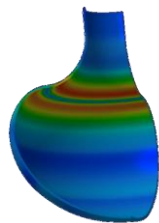
10,2 bars sans rupture



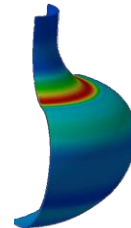
Jean Peyré

P.27

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## 4) Calcul des contraintes au pied pour quelques PMt de grande taille



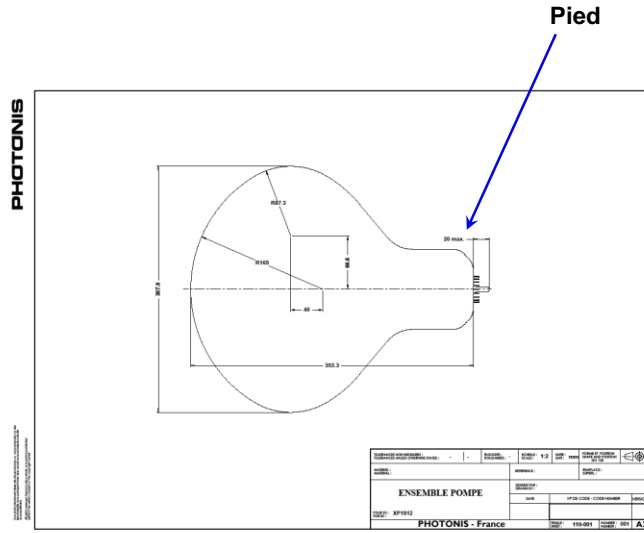
Jean Peyré

P.28

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



# Calcul des contraintes au pied



Jean Peyré

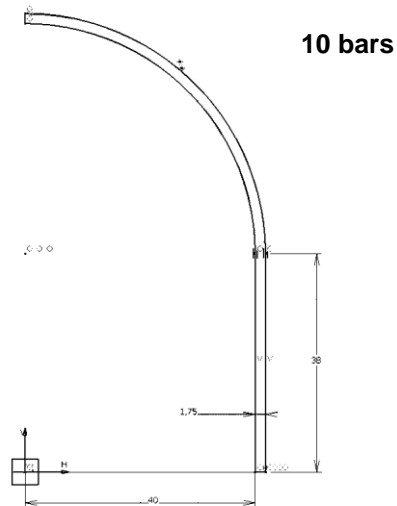
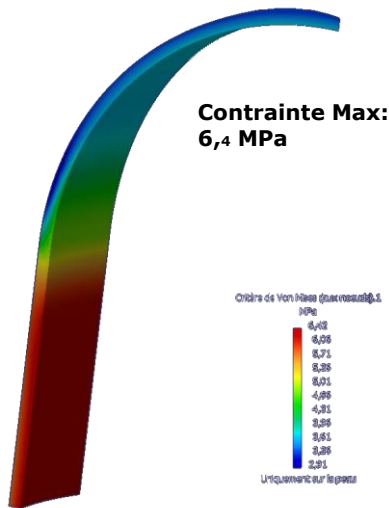
P.29

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



# Pied n°1

Diamètre 80 mm  
Epaisseur 1,75 mm



Jean Peyré

P.30

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



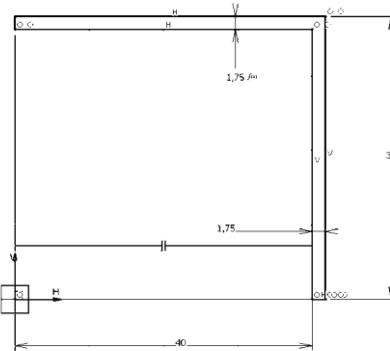
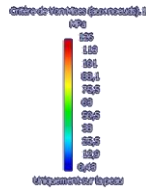
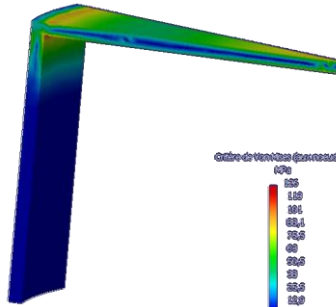
## Pied n°2

Diamètre 80 mm  
Epaisseur 1,75 mm

10 bars

Contrainte Max:  
126 MPa

**ATTENTION A LA FORME  
DE PIED!!!!!!!**



Jean Peyré

P.31

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

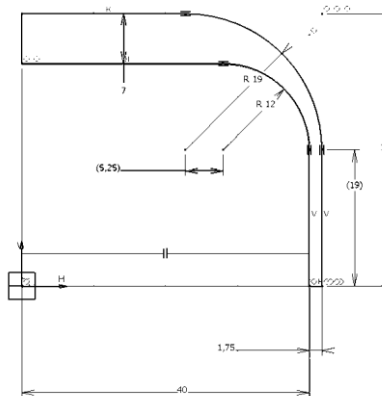
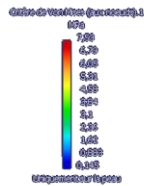
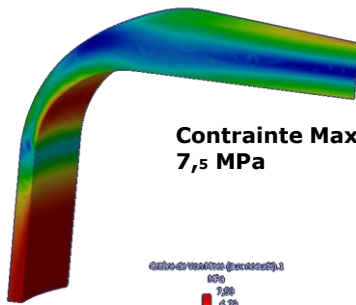


## Pied n°3

Diamètre 80 mm  
Epaisseur 1,75 mm

10 bars

Contrainte Max:  
7,5 MPa



Jean Peyré

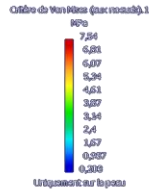
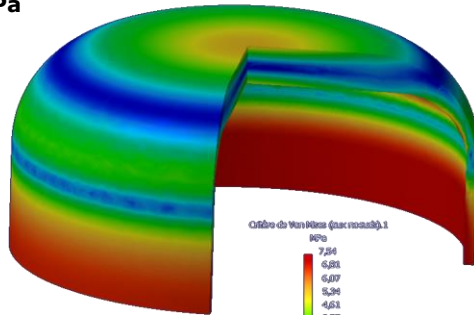
P.32

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

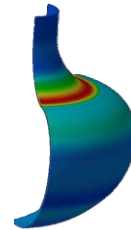
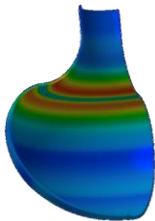


**Contrainte Max:  
7,5 MPa**

**10 bars**

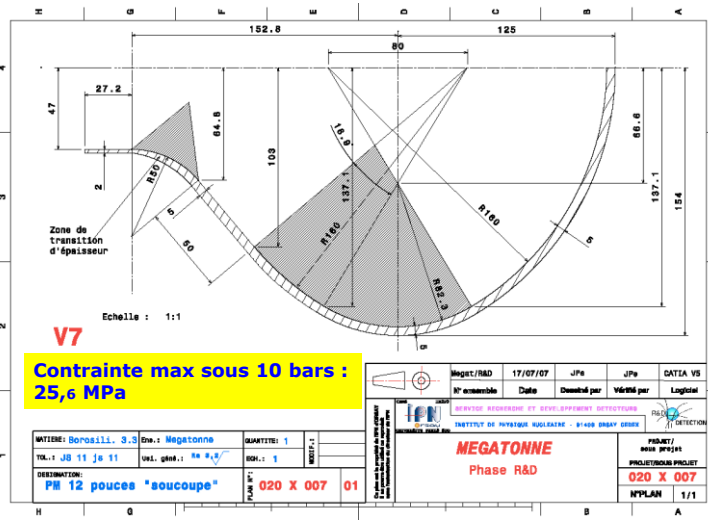


**5) Dessin d'un  
nouveau PMt de  
taille 12"**





## Bulbe optimisé de 12 pouces et ép. 5mm



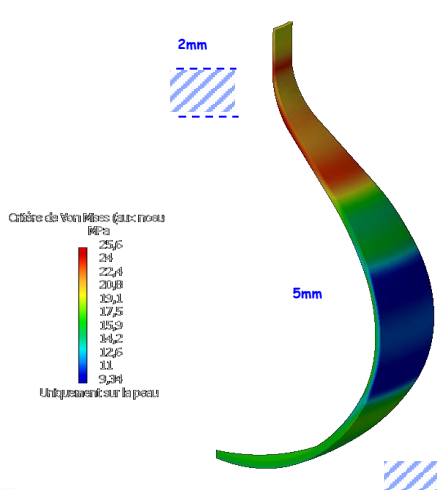
Jean Peyré

P.35

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Bulbe optimisée de 12 pouces/5mm - 10 bars



- Contrainte max: 25,6 MPa
- La contrainte a été optimisée mais est encore plus grande que celle de la sphère équivalente(16.9 MPa)
- Calculs sous 10 bars

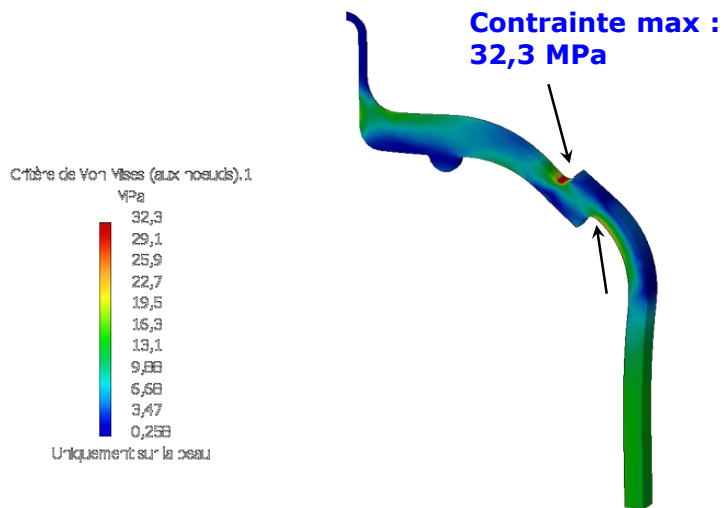
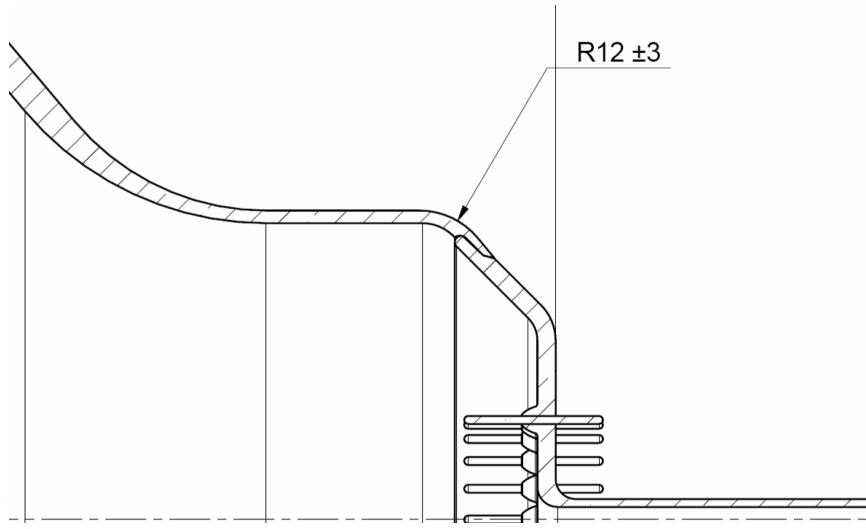
: variation d'épaisseur



Jean Peyré

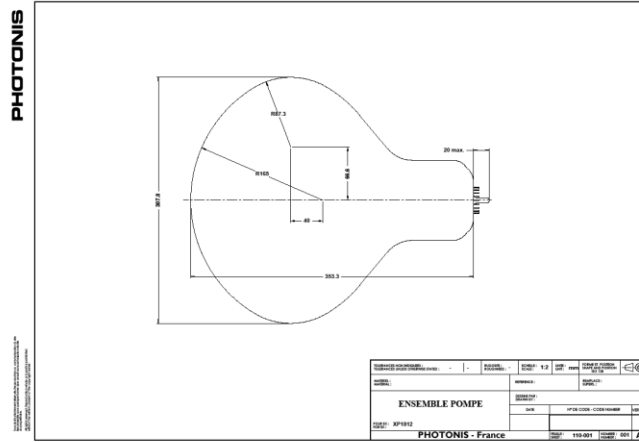
P.36

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017





## PMT optimisé de 12 pouces



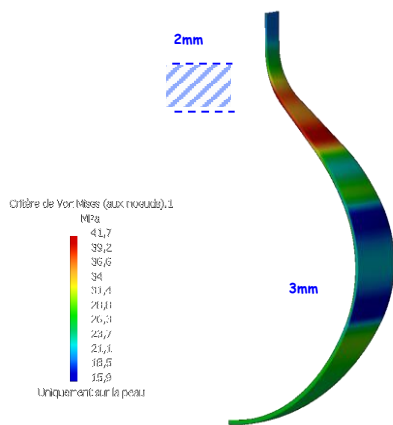
Jean Peyré

P.39

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Bulbe optimisée de 12 pouces/3mm - 10 bars



- Contrainte max: 41,7 MPa
- La contrainte a été optimisée mais est encore plus grande que celle de la sphère équivalente(26.3 MPa)
- Calculs sous 10 bars

: variation d'épaisseur



Jean Peyré

P.40

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## CONCLUSIONS Phase 1

| Contraintes max sous 10 bars | 8"               | 10"               | 12"               | 12"                       | 12"                       |
|------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| Pmt ép. 3mm                  | 54 MPa<br>XP1806 | 154 MPa<br>XP1804 | 158 MPa<br>XP1807 | 42 (32) MPa<br>XP1812 3mm |                           |
| Sphère ép. 3mm               | 18 MPa           | 22,3 MPa          | 26,3 MPa          | 26,3 MPa                  |                           |
| Pmt ép. 3mm                  |                  |                   |                   |                           | 26 (32) MPa<br>XP1812 5mm |
| Sphère ép. 5mm               |                  |                   |                   |                           | 16,9 MPa                  |

Bulbe (pied)

Contrainte à la rupture "soft glass" : 51-55 MPa

Contrainte à la rupture "hard glass" : 40 MPa

Des calculs précédents, on conclut:

Pression limite 12" PMt optimisé épaisseur 5mm: **15 atm** (soft glass)

Pression limite 12" PMt optimisé épaisseur 3mm: **11,6 atm** (soft glass)

Pression limite 12" PMt optimisé épaisseur 5mm : **12 atm** (hard glass)

Pression limite 12" PMt optimisé épaisseur 3mm : **9,3 atm** (hard glass)



Jean Peyré

P.41

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Et maintenant ?

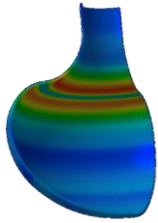
- Equiper des PMt avec des jauges de contrainte pour réaliser des tests



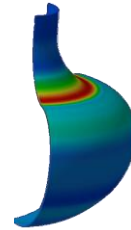
Jean Peyré

P.42

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

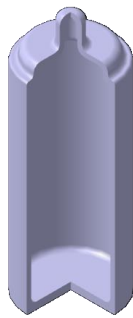


## 6) Mesures avec jauges de contraintes

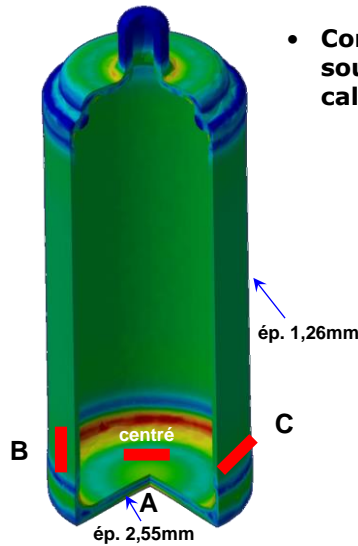


## Mesures avec jauges de contraintes

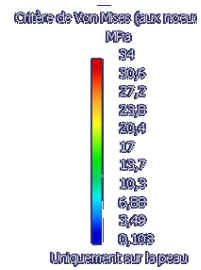
PMT diam  
38mm (1,5")

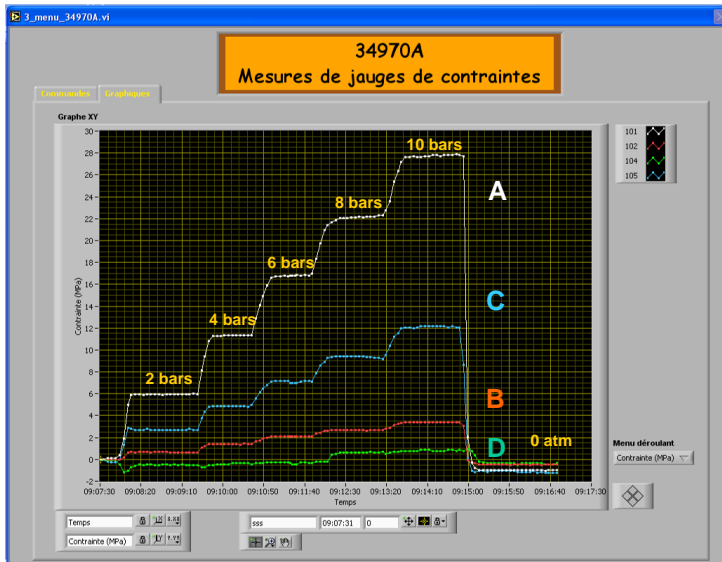
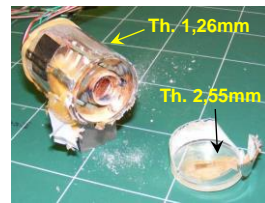
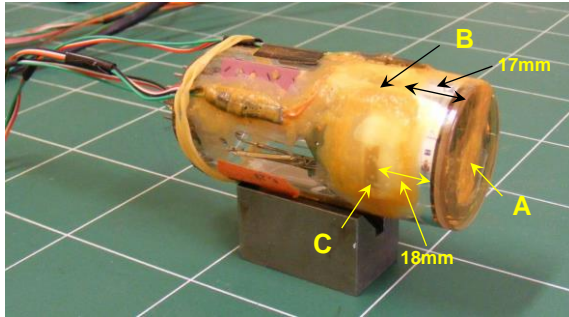


Jauge D=Ref



- Contrainte maximale sous 10 bars :  
calculs -> 34 MPa







## Mesures avec Jauges à 90°

### • Critère de Von Mises

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_0^2 < 2R_e^2$$

$$\sigma_3 = 0 \quad \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_0^2 < R_e^2$$

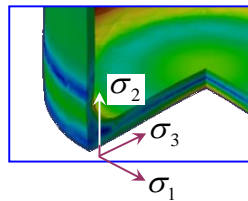
|                  |                |           |
|------------------|----------------|-----------|
| module Young     | E              | 64000 MPa |
| Coef poisson     | v              | 0,2       |
| Limite élastique | R <sub>e</sub> |           |

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$$

Loi de Hooke généralisée  
État de contraintes quasi planes sur la périphérie du tube.

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$$

$\sigma_1$  &  $\sigma_2$  sont sur les axes principaux



Jean Peyré

P.47

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



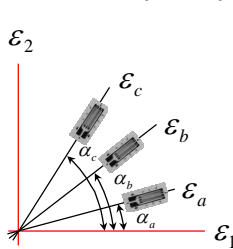
## Mesures avec Jauges

### • Mesures avec 2 jauges à 90°

$\sigma_1$  &  $\sigma_2$  sont sur les axes principaux – accès direct à  $\varepsilon_1$  &  $\varepsilon_2$

### • Mesures avec 3 jauges

Les axes principaux ne sont pas connus

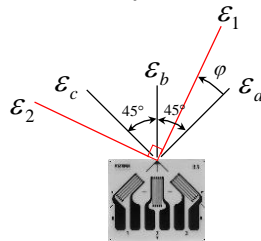


Angles quelconques

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\alpha_a$$

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\alpha_b$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\alpha_c$$

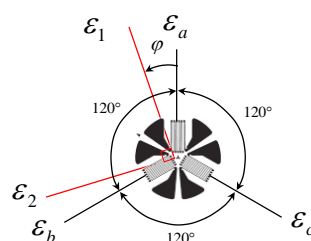


Angles à 45°

$$d = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad r = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2}$$

$$d = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \quad \operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}$$

$$r = \frac{\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}}{\sqrt{2}}$$



Angles à 60° ou 120°

$$d = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad r = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2}$$

$$d = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \quad \operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_c - \varepsilon_b)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}$$

$$r = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2}$$



Jean Peyré

P.48

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017





## Comparaison Calculs - Mesures

- Contrainte calculée avec critère de Von Mises

Mesures jauges B & C

$$\varepsilon_1 = -189\mu \frac{\Delta L}{L}; \varepsilon_2 = -53\mu \frac{\Delta L}{L}$$

$$\sigma_1 = -13,2\text{MPa}; \sigma_2 = -6,1\text{MPa}$$

$$\sigma_0 = 11,5\text{MPa}$$

Calculs CATIA  $3\sigma = -14, -7, -1\text{MPa}$

$$\sigma_0 = 11,8\text{MPa}$$

Mesure jauge A

$$\sigma_0 = 27,8\text{MPa}$$

$$\sigma_0 = 27,8\text{MPa}$$

Calculs CATIA  $3\sigma = -28, -28, -1\text{MPa}$

$$\sigma_0 = 27,3\text{MPa}$$



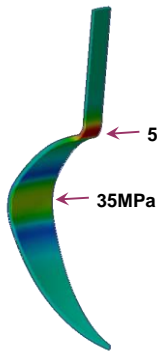
Jean Peyré

P.49

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## PMT 8 pouces XP18060



$$\sigma_2$$

$$\sigma_1$$

$$\sigma_3$$

- Contrainte max sous 10 bars : 52 MPa –renforcé
- Soft glass: limite ~ 53 MPa
- Rupture estimer : 9,6 bars

$$19\text{MPa}$$

$$\sigma_1 = -22,8\text{MPa}$$

$$\sigma_2 = -12\text{MPa}$$

$$\sigma_3 = -1\text{MPa}$$

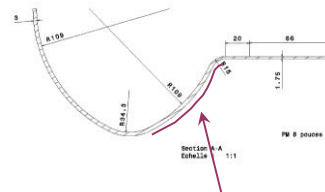
$$41\text{MPa}$$

$$11,9\text{MPa}$$

$$\sigma_1 = 11\text{MPa}$$

$$\sigma_2 = -0,3\text{MPa}$$

$$\sigma_3 = -1,1\text{MPa}$$



Renforcement 4mm



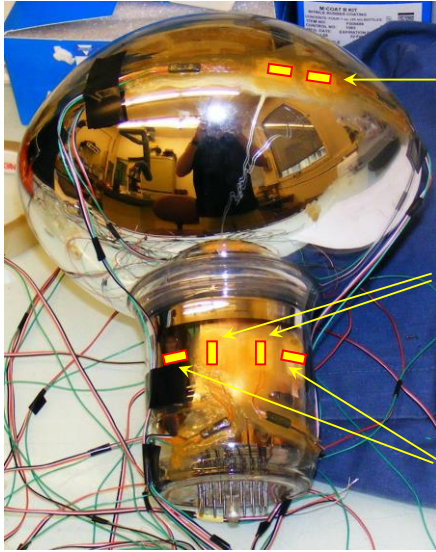
Jean Peyré

P.50

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## XP18060: position des jauges



Jauges 101 & 102

Jauges 103 & 104

Jauges 105 & 106



Jean Peyré

P.51

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Mesures avec jauges de contraintes

PMT diam 8 pouces  
(XP18060)



Jean Peyré

P.52

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

- **Contrainte calculée avec critère de Von Mises**

Jauges 103/106

$$\varepsilon_1 = -282\mu \frac{\Delta L}{L}; \varepsilon_2 = -98\mu \frac{\Delta L}{L}$$



$$\sigma_1 = -20,1MPa; \sigma_2 = -10,3MPa$$

$$\sigma_0 = 17,4MPa$$

Calculs CATIA

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -21,6MPa \\ \sigma_2 &= -11,4MPa \\ \sigma_3 &= -1 MPa \end{aligned}$$

$$\sigma_0 = 18MPa$$

Jauges 101/102

$$\varepsilon_1 = -176\mu \frac{\Delta L}{L}; \varepsilon_2 = 0$$

$$\sigma_1 = 11,7MPa$$

$$\sigma_0 = 11,7MPa$$

Calculs CATIA

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 10,4MPa \\ \sigma_2 &= -0,6MPa \\ \sigma_3 &= -1 MPa \end{aligned}$$

$$\sigma_0 = 11,3MPa$$





# PMT 10 pouces R7081

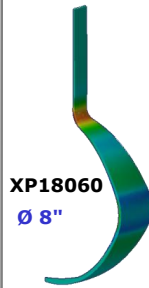
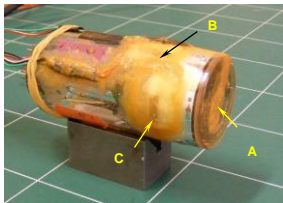
## 1: calibration

PMT équipé avec jauges de contrainte



Contrainte max sous 10 bars:  
**34 MPa**  
Rupture à 16 bars

### Simulation



XP18060  
Ø 8\"/>

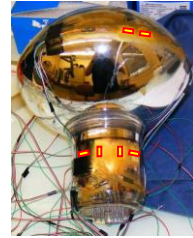
Contrainte max sous 10 bars :  
**52 MPa**  
Rupture  
Estimée 9,6 bars  
Réal 9,5 bars

## 2: Estimation

R7081  
Ø 10\"/>



Rupture  
Estimée 5,5 bars  
Réal 6 & 10 bars



Jean Peyré

P.55

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



# PMT 10 pouces R7081



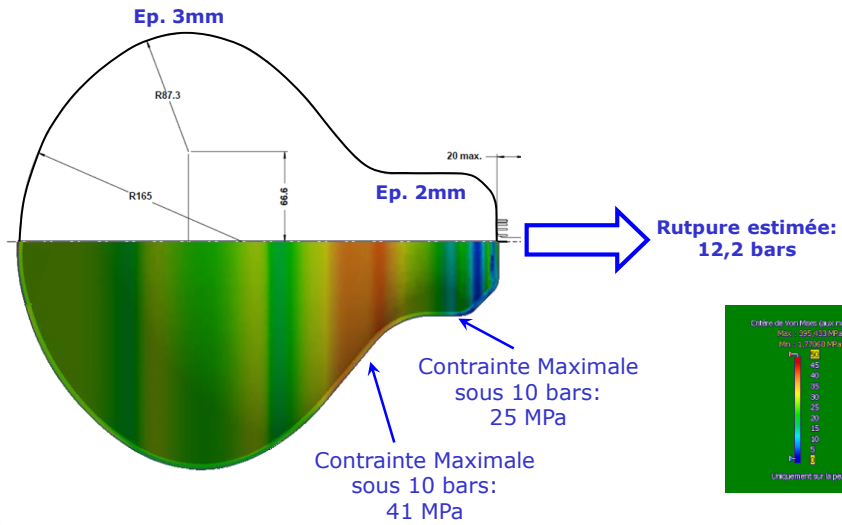
Jean Peyré

P.56

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## XP1812: PMt 12 pouces



Jean Peyré

P.57

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## XP1812: PMt 12 pouces

Rupture >22,5 bars

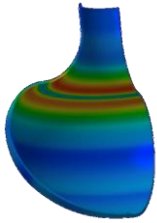
PMt 12" XP1807  
Rupture ~ 3bars



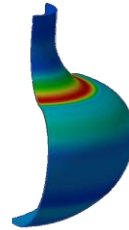
Jean Peyré

P.58

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



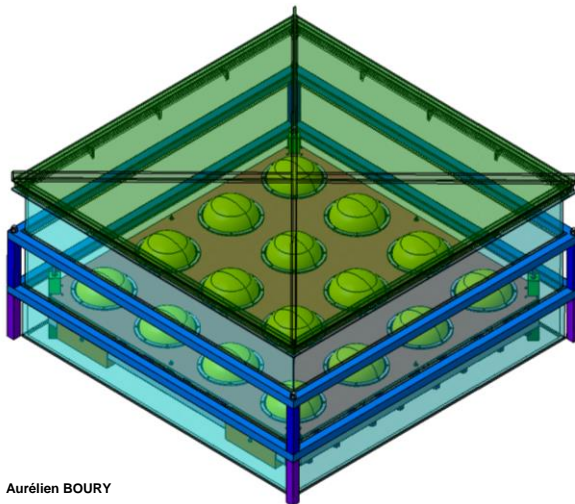
## 7) Démonstrateur PMm<sup>2</sup>



## Démonstrateur PMm<sup>2</sup>

### Etude et tests

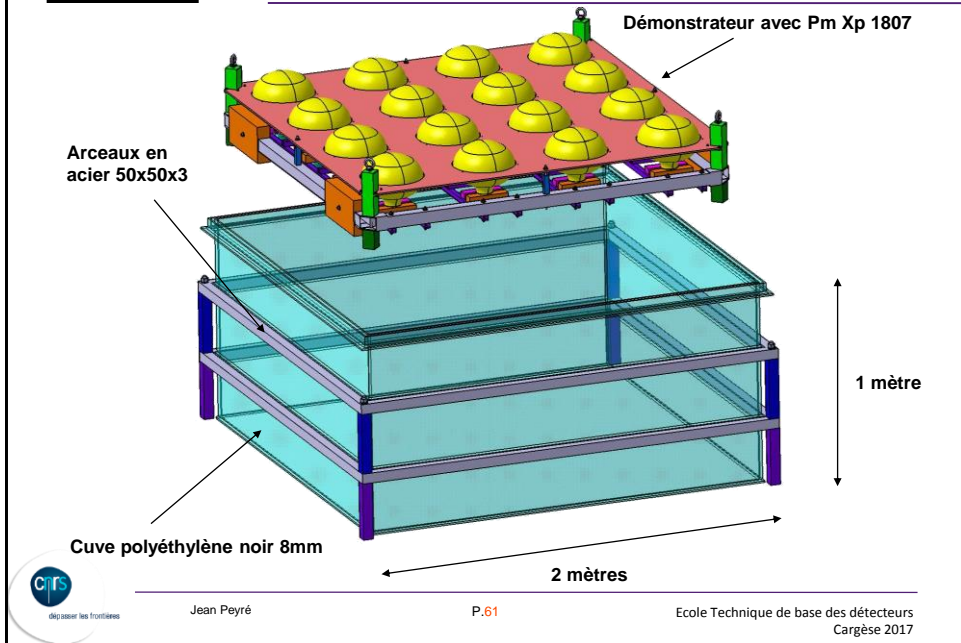
Conception du démonstrateur PMM2  
(Cuve 3,2m<sup>3</sup>. 16 phototubes)



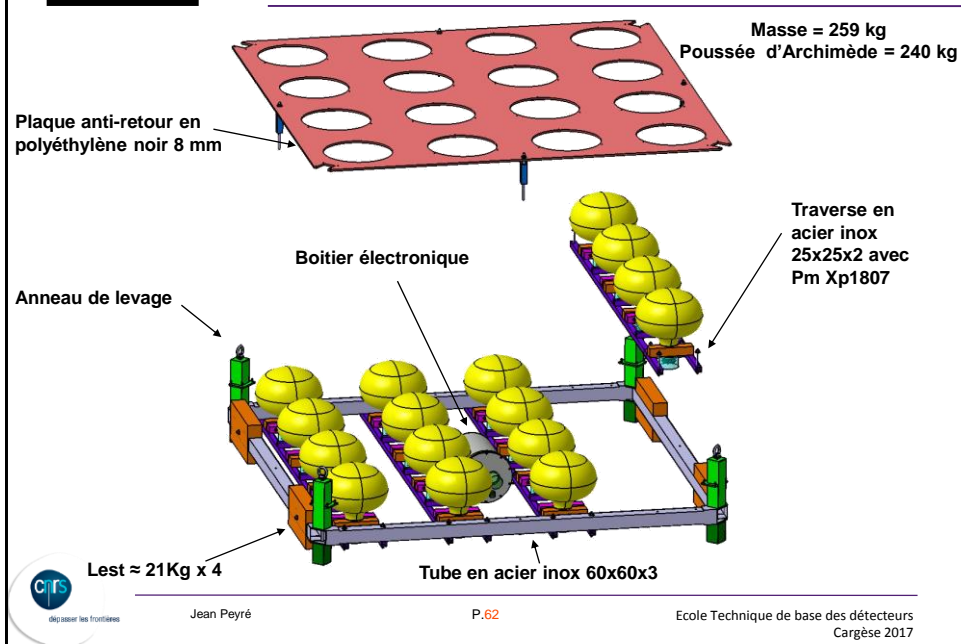
Aurélien BOURY



## Démonstrateur PMm2



## Démonstrateur PMm2



**PMm<sup>2</sup>**

## Etanchéité des embases



- Potting : essais sur tubes de 1 pouces,
- 1 câble signal + HT : économie, fiabilité
- Test sous 10 bars → ajout fixation câble
- Le potting a tenu 25 jours sous pression (15 tubes 1 pouce)



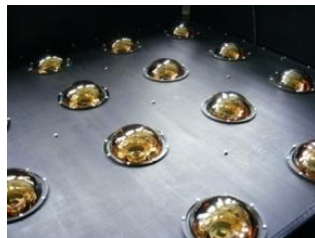
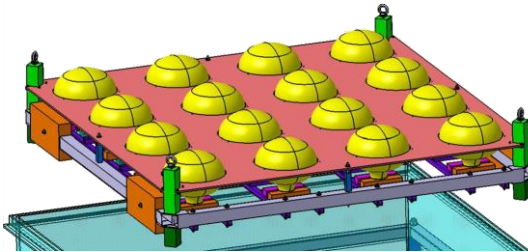
Jean Peyré

P.63

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

**PMm<sup>2</sup>**

## Démonstrateur final



Jean Peyré

P.64

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017





Jean Peyré

P.65

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

### Tubes : tests sous pression **PMm<sup>2</sup>**

BNL tank (150b)

- Tests jusqu'à 10 bars => enceinte spéciale
- Comparaison avec simulations (jauges de contrainte) => recommandations à Photonis