

Le projet PMm²

*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>

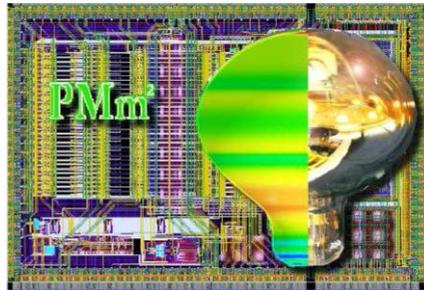


Jean.Peyre@csnsm.in2p3.fr

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



ANR - IPNO - LAL - LAPP - Photonis



PMm²

Sommaire

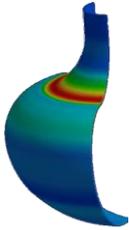
- 1) *Le projet PMm²*
- 2) *Détermination de la limite à la rupture du verre*
- 3) *Calculs de résistance pour quelques PMt de grande taille*
- 4) *Calcul des contraintes au pied pour quelques PMt de grande taille*
- 5) *Dessin d'un nouveau PMt de taille 12"*
- 6) *Mesures avec jauges de contraintes*
- 7) *Démonstrateur PMm²*



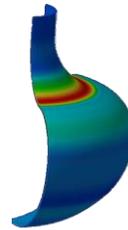
Jean Peyré

P.2

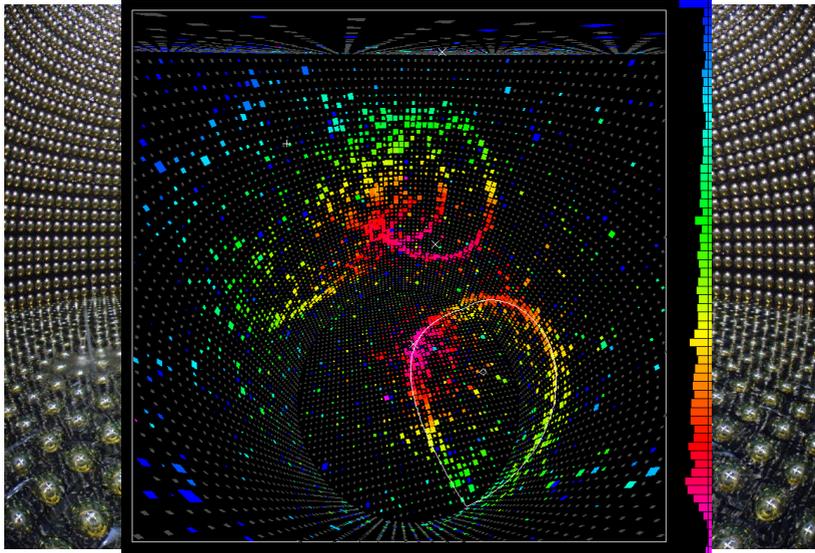
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

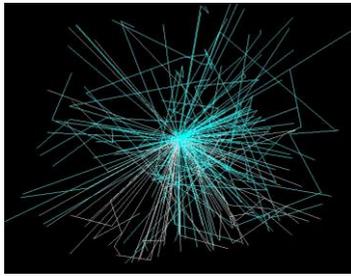
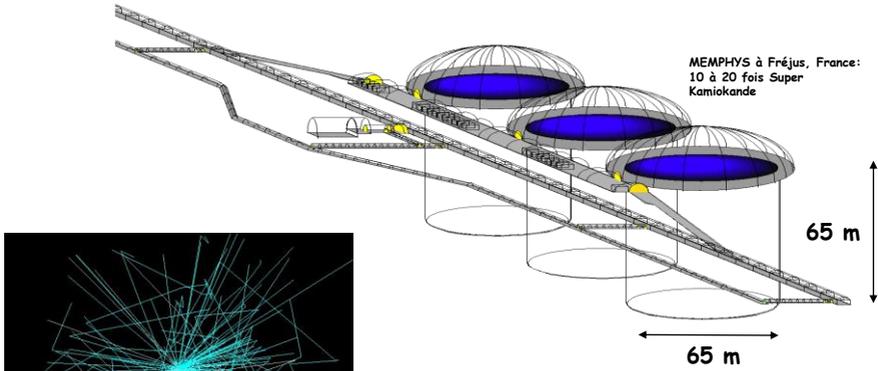


1) Le projet PMm²



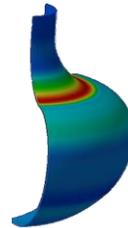
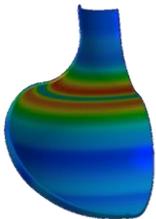
Principe de détection





- 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) (SiO_2 , CaO , Na_2O)
- Verre Borosilicate (hard glass) (SiO_2 , B_2O_3 , Na_2O)
 - excellente résistance à l'eau quand la quantité de B_2O_3 équivaut celle en Na_2O
- 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

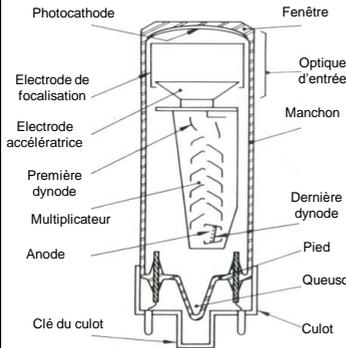
P.8

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.



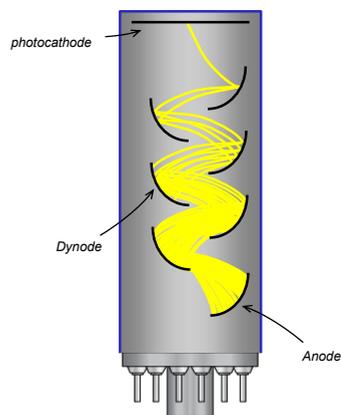
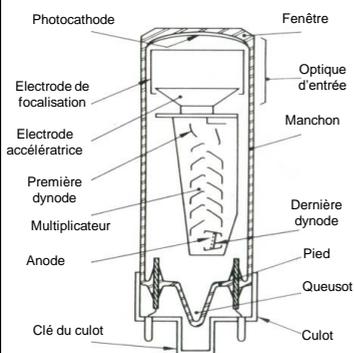
Jean Peyré

P.9

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



Photomultiplicateur



Jean Peyré

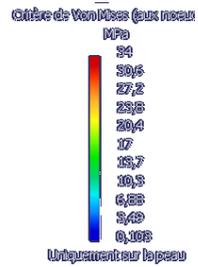
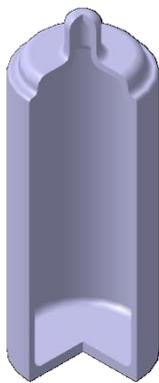
P.10

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



PMT diam 38mm (1,5")

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



Jean Peyré

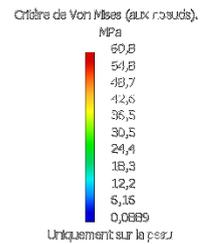
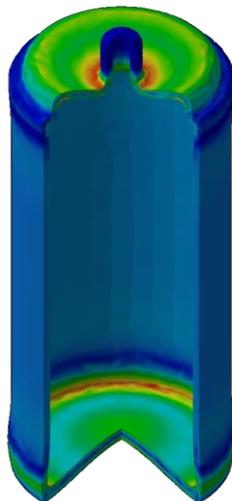
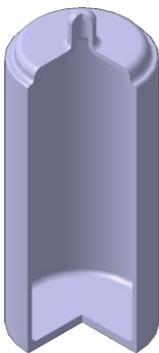
P.11

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



PMT diam 50mm (2")

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



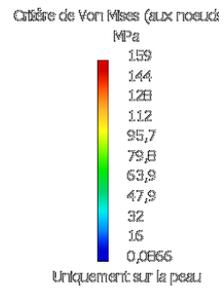
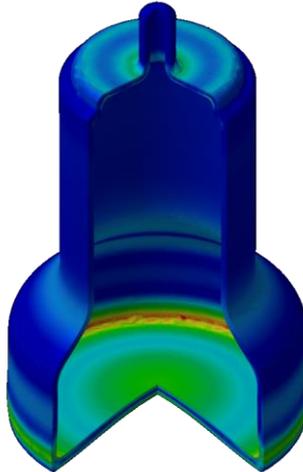
Jean Peyré

P.12

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

PMt diam 76mm (3")

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



Tests sous pression : 1/ une cuve





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

PMm²

PMT diam 76mm (3")

Rupture à 3,2 bars



**Rupture de la
fenêtre d'entrée**



Jean Peyré

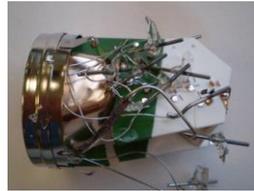
P.17

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

PMm²

PMT diam 50mm (2")

Rupture à 6,5 bars



**Rupture au pied
du PMt**



Jean Peyré

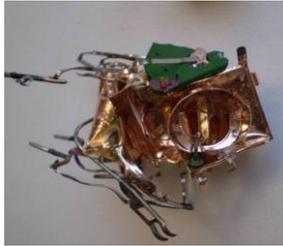
P.18

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

PMm²

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

PMm²

Les restes



Jean Peyré

P.20

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



Tests sous pression

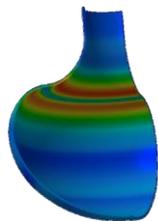
	1,5" (soft glass)	2" (hard glass)	3" (soft glass)
Contrainte max sous 10 bars (calcul)	34 MPa	61 MPa	159 MPa
Rupture à	16,3 bars	6,5 bars	3,2 bars
Contrainte à la rupture	55 MPa	40 MPa	51 MPa

CONCLUSION:

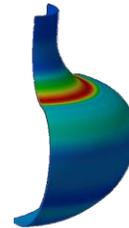
Limite à la rupture en compression R_m (glass borosilicate-SIMAX)
donnée par la documentation: 35-100MPa

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"



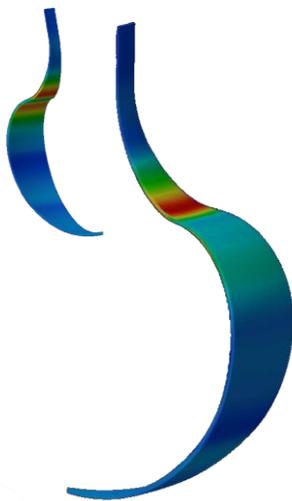
SPHERE

Calculs

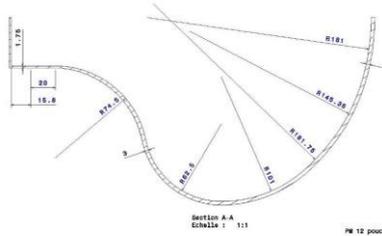


Contrainte max sous 10 bars	8"	10"	12"
Sphère ép 3mm	18 MPa	22,3 MPa	26,3 MPa
Sphère ép 4mm	13,6 MPa	17 MPa	20 MPa
Sphère ép 5mm	11,3 MPa	13,7 MPa	16,3 MPa

PMt 12" XP1807

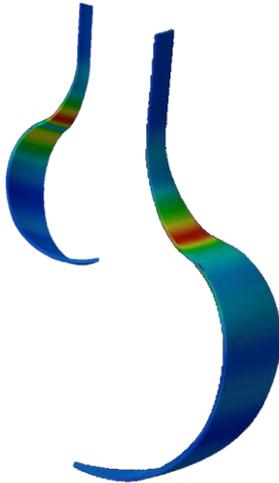


- **Contrainte max sous 10 bars: 158 MPa**
- **Sphère ép 3 diam 12" : 26,3 MPa**

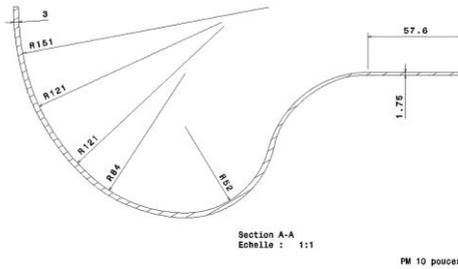




PM 10 pouces XP1804



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



Jean Peyré

P.25

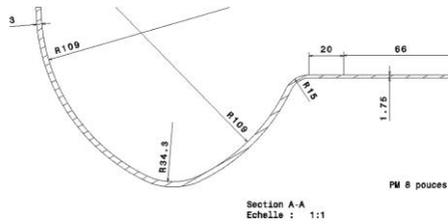
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



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 XP1806	154 MPa XP1804	158 MPa XP1807
Sphère ép. 3mm	18 MPa	22,3 MPa	26,3 MPa



1 PM diam 8" XP18060 (XP1806 renforcé)

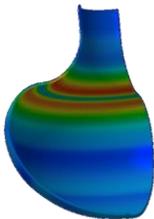
10,2 bars sans rupture



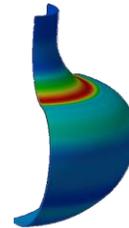
Jean Peyré

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



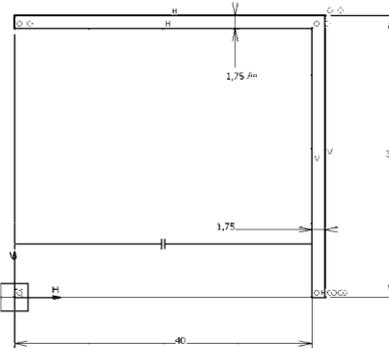
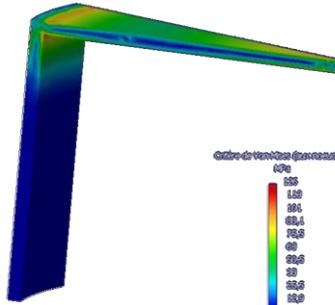
Pied n°2

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

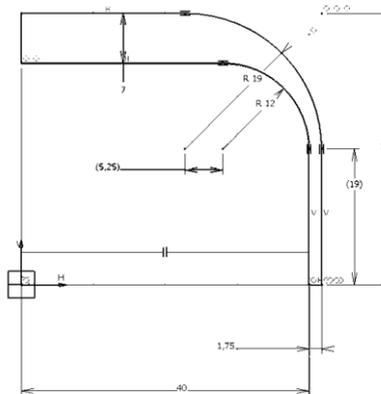
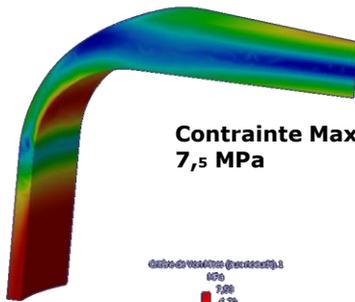


Pied n°3

Diamètre 80 mm
Epaisseur 1,75 mm

10 bars

Contrainte Max:
7,5 MPa



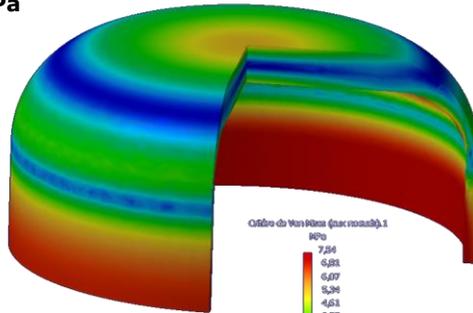
Jean Peyré

P.32

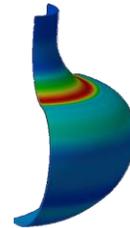
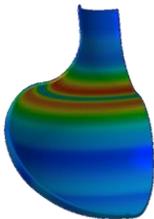
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

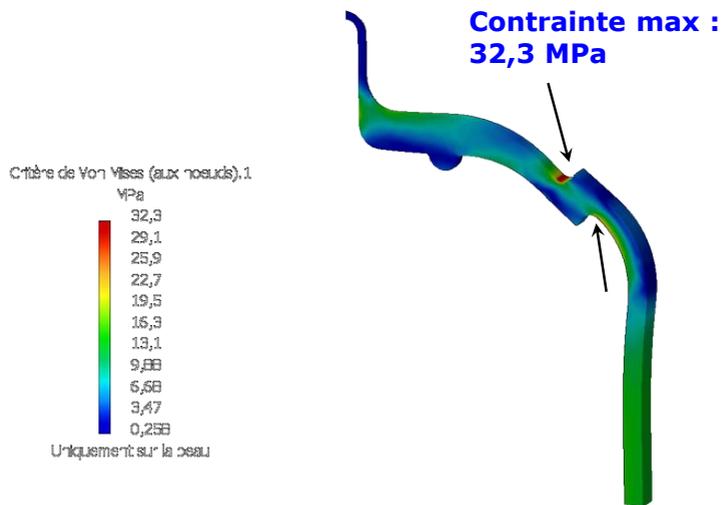
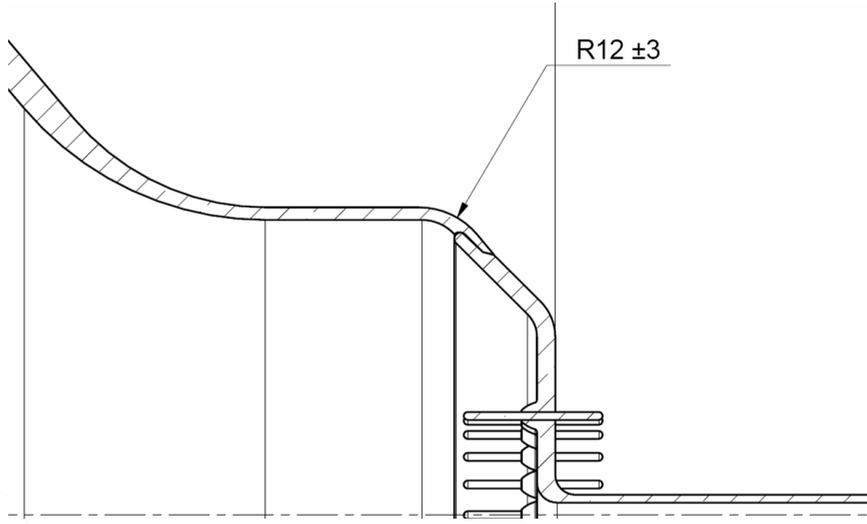
**Contrainte Max:
7,5 MPa**

10 bars



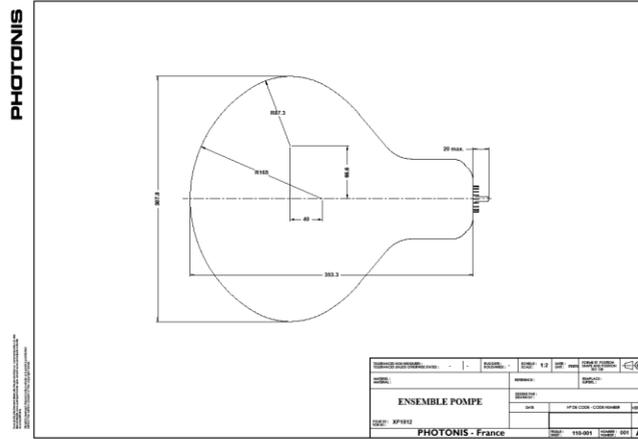
**5) Dessin d'un
nouveau PMt de
taille 12"**







PMt optimisé de 12 pouces



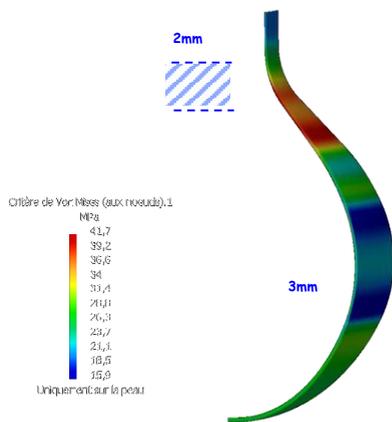
Jean Peyré

P.39

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



Bulbe optimisée de 12 pouces/3mm - 10 bars



: variation d'épaisseur

- 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



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 XP1806	154 MPa XP1804	158 MPa XP1807	42 (32) MPa XP1812 3mm	
Sphère ép. 3mm	18 MPa	22,3 MPa	26,3 MPa	26,3 MPa	
Pmt ép. 3mm					26 (32) MPa 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 ?

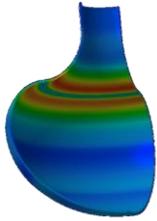
- Equiper des PMt avec des jauges de contrainte pour réaliser des tests



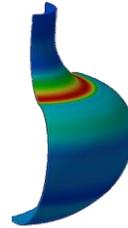
Jean Peyré

P.42

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

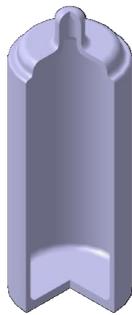


6) Mesures avec jauges de contraintes

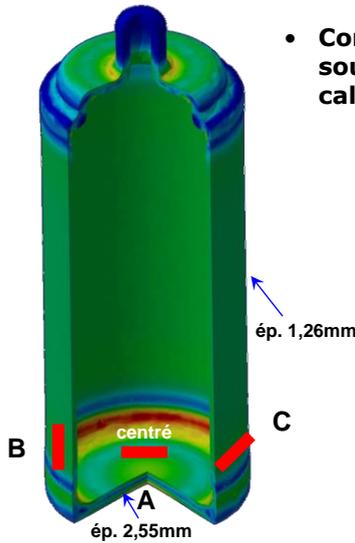


Mesures avec jauges de contraintes

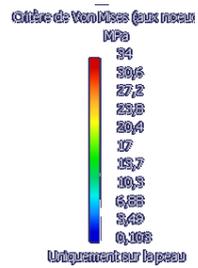
PMT diam
38mm (1,5")

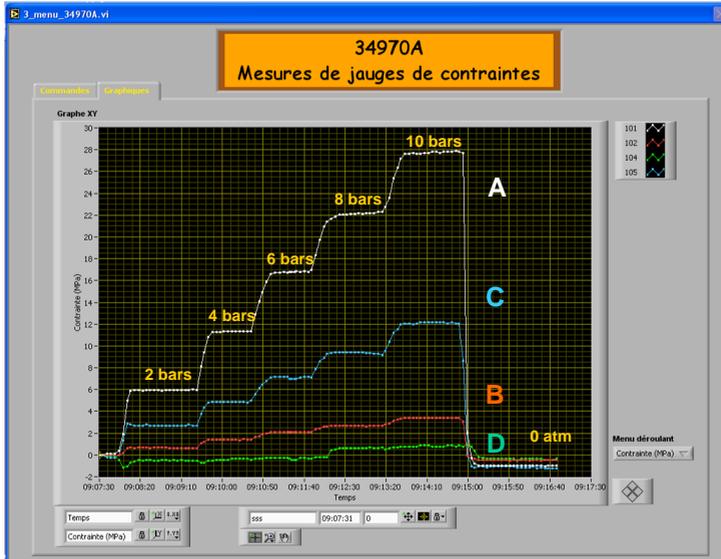
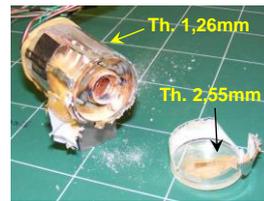
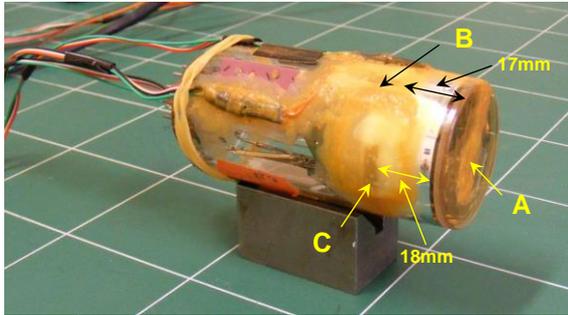


Jauge D=Ref



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







Mesures avec Jauges à 90°

- Critère de Von Mises**

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

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

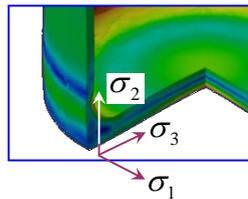
module Young	E	64000 MPa
Coef poisson	v	0,2
Limite élastique	R _e	

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

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

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

σ_1 & σ_2 sont sur les axes principaux



Jean Peyré

P.47

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



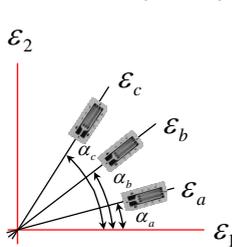
Mesures avec Jauges

- Mesures avec 2 jauges à 90°**

σ_1 & σ_2 sont sur les axes principaux – accès direct à ε_1 & ε_2

- Mesures avec 3 jauges**

Les axes principaux ne sont pas connus

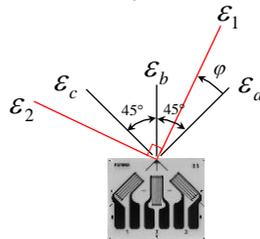


Angles quelconques

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

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

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

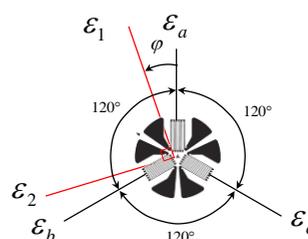


Angles à 45°

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

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

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



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

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



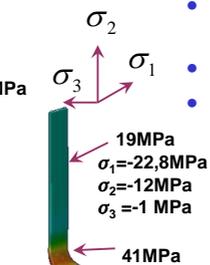
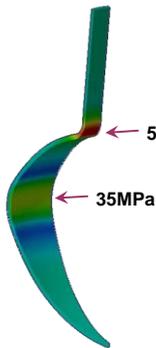
Jean Peyré

P.49

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



PMT 8 pouces XP18060



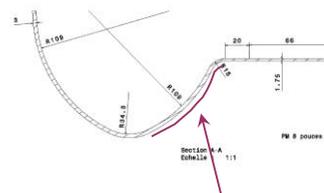
- **Contrainte max sous 10 bars : 52 MPa –renforcé**
- **Soft glass: limite ~ 53 MPa**
- **Rupture estimer : 9,6 bars**

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

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

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

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



Renforcement 4mm



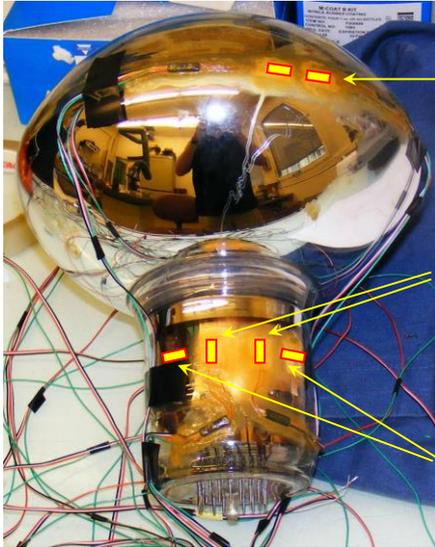
Jean Peyré

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

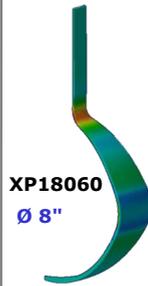
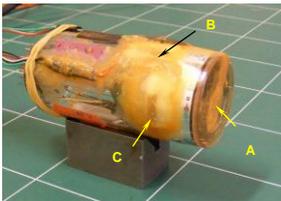
1: calibration

PMT équipé avec jauges de contrainte



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

Simulation



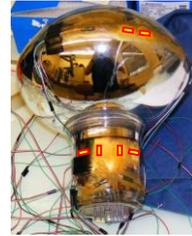
XP18060
Ø 8\"/>
Contrainte max sous 10 bars :
52 MPa
Rupture
Estimée 9,6 bars
Réal 9,5 bars

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



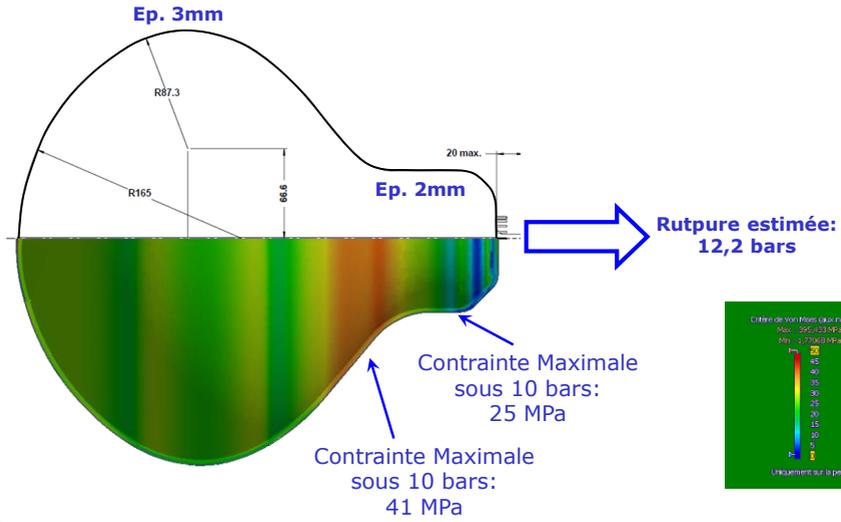
Jean Peyré

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

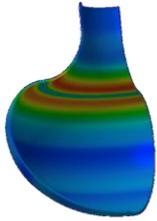
PMt 12" XP1807
Rupture ~ 3bars



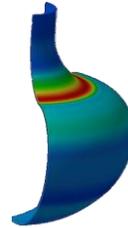
Jean Peyré

P.58

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017



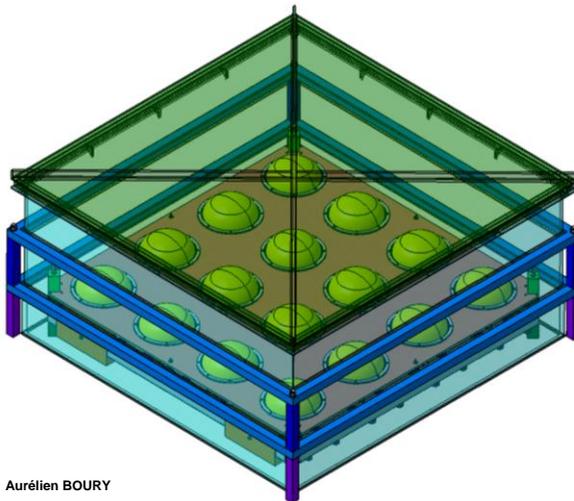
7) Démonstrateur PMm²



Démonstrateur PMm²

Etude et tests

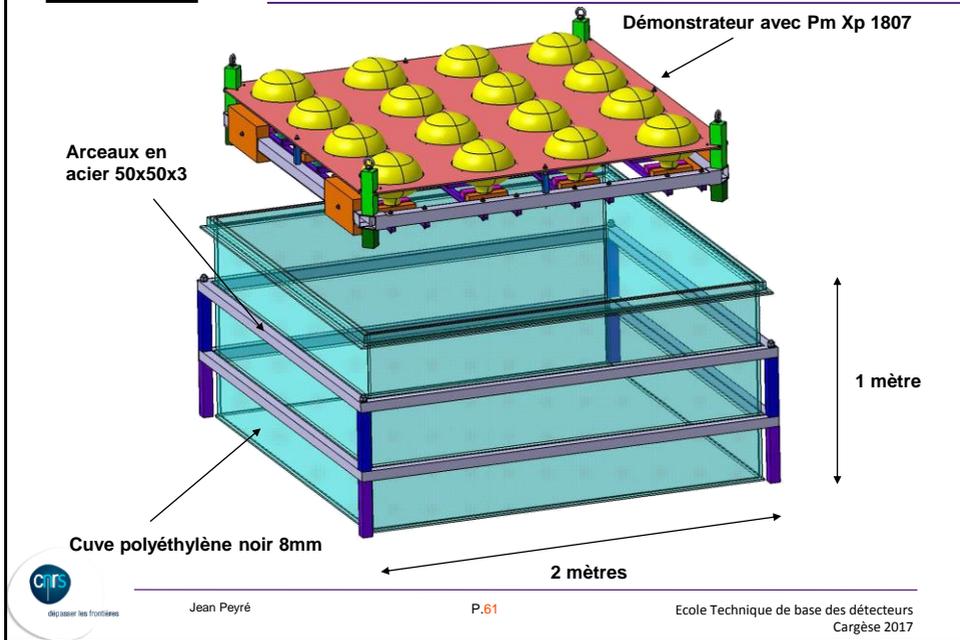
Conception du démonstrateur PMM2
(Cuve 3,2m³. 16 phototubes)



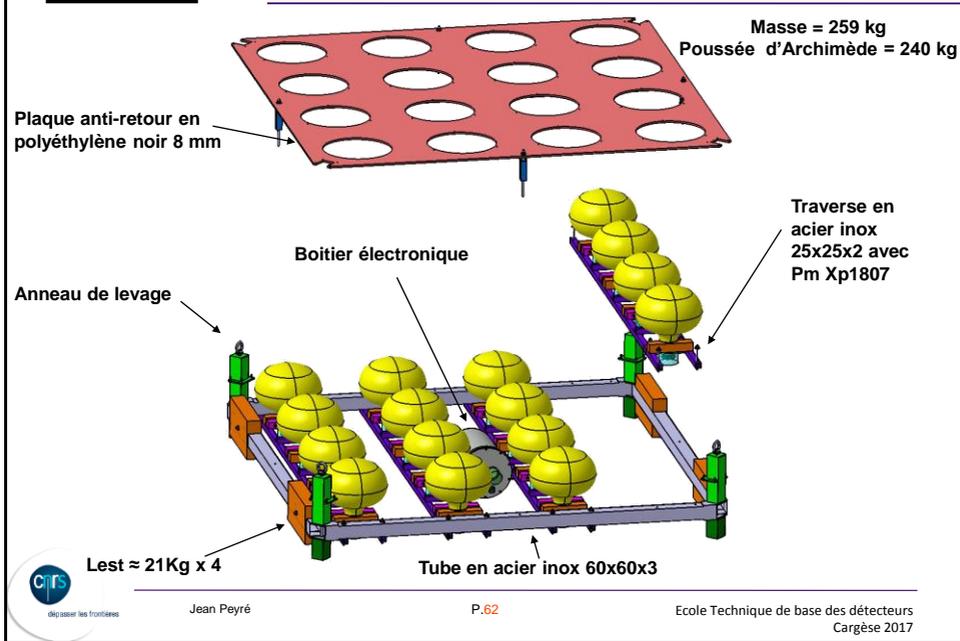
Aurélien BOURY



Démonstrateur PMm2



Démonstrateur PMm2



PMm²

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)



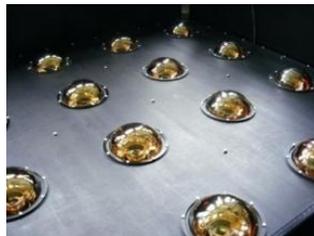
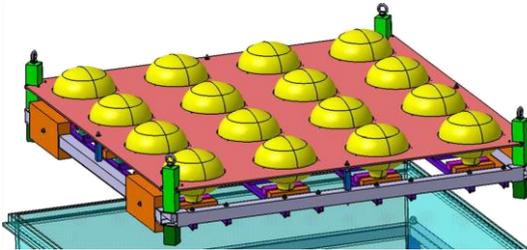
Jean Peyré

P.63

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

PMm²

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 **PMm²**

BNL tank (150b)

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