Projet des Bidons à Muons pour CAT
D. A. Smith et C. Ghesquière
Mai 1995

1 Vue d'ensemble

L'idée de base est de signaler le passage dans CAT de muons émetteurs de lumière Cherenkov [1]. L'image de la lumière Cherenkov dans la caméra est un anneau ou une partie d'anneau dont la forme et l'intensité sont bien connues. L'étude de ces anneaux aidera à la calibration de l'appareil et à l'analyse des images des gerbes. Trois exemples suivent:

- *Calibration de l'ensemble miroir et phototubes.*
  Les muons illuminent la caméra avec de la lumière Cherenkov ayant un spectre semblable à celui des gerbes, à l'absorption atmosphérique près, d'où on obtient l'efficacité de collection de photons de l'ensemble mirror + photomultiplicateurs.
- *Efficacité du trigger.*
  Une lecture de la caméra indépendante du déclenchement de l'imageur permettra une mesure de l'efficacité du trigger.
- *Etude d'un fond.*
  Le segment d'anneau pour des muons tombant à une dizaine de mètres de l'axe de l'imageur et dont l'angle entre la trajectoire du muon et l'axe de l'imageur est proche de l'angle Cherenkov ressemble suffisamment à l'image d'une gerbe électromagnétique pour ne pas être rejeté par les algorithmes de reconstruction de gerbes. Un échantillon de ces segments d'anneaux de muons aidera à la caractérisation de ce fond.

Le système d'étiquettage (*'tagging'*) et de déclenchement prévu consiste en un "bidon à muons", c'est à dire, un cylindre fermé à l'intérieur duquel se trouve deux miroirs, chacun avec un PM au plan focal (voir la figure 1). Les photons Cherenkov d'un muon relativiste longeant l'axe du cylindre sont refléchis sur les pm. L'avantage du bidon à deux miroirs est qu'avec une coïncidence entre les deux PM l'on minimise le bruit dans le trigger [1].
Deux bidons différents sont prévus. Le premier sera fixé au contre-poids du télescope avec son axe parallèle à celui de l'imageur (voir les figures 2,3,4). Le taux de muons est suffisament bas pour qu'on puisse accumuler des evènements à muons en même temps que le suivi d'une source de gammas. (La plupart de ces muons déclencheront de toute façon le trigger "standard" de CAT.) Le deuxième bidon sera à plusieurs mètres du télescope et fournira des données pour les études de fonds. Ce deuxième bidon visera une direction fixe et ne servira donc que pour des runs spéciaux (la distance de l'imageur et l'angle seront reglables). Dans le ci-présent memo nous présentons le projet des bidons proposés pour l'imageur CAT. Le tableau 1 résume le projet.

[1]Le bidon d'Artémis/Whipple avait un scintillateur prévu pour être mis en coïncidence avec le PM au plan focal. Le taux de particules chargées passant à travers le PM a été tel que cette stratégie a été abandonée.

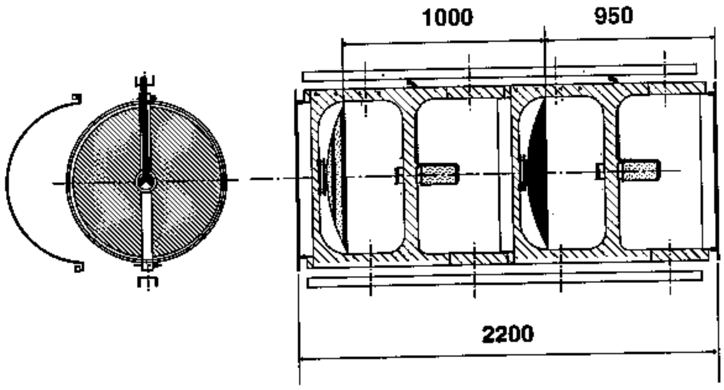

Figure 1: *Un bidon à muons.*

2 Le bidon sur le contre-poids

2.0.1 Placement et Dimensions

La taille choisie pour le bidon est un compromis entre le parcours minimum du muon pour que le signal ne soit pas trop petit, la place disponible pour le bidon, et le matériel disponible. Le bidon sera installé au-dessus du contre-poids, vu quand le télescope est horizontal (c'est à dire, au repos dans le hangar) (voir les figures 2,3,4).

Le diamètre est déterminé par le miroir. Deux espèces de miroir sont disponibles: ceux de Delphi/Thémistocle (diamètre = 80 cm) et ceux de la défense aerienne (diamètre = 150 cm). Pour le bidon monté sur le contre-poids les plus petits nous conviennent, parce que i) la forme des images varie selon la distance du pied du muon à l'axe du télescope, et la plus faible variation avec le petit miroir facilitera l'analyse des anneaux et ii) le poids et l'encombrement sont moindre. Le grand miroir donnerait un taux 3.5 fois plus élevé que celui du petit miroir mais à partir du moment où l'on accumule des données pendant le suivi des astres nous aurons de toute façon suffisamment de statistiques. Le diamètre du bidon sera donc d'environ 90 cm.

Une longueur de 220 cm donnera suffisamment de photoelectrons dans chacun des deux PM pour permettre un seuil "facile à vivre" sans présenter trop de problèmes d'encombrement. Sur les figures 2,3,4 on voit qu'un bidon plus long aurait été encombré par les bras de support de la caméra.

La distance prévue entre l'axe optique de l'imageur et l'axe du bidon est de 115 cm. A peu près 10 métres des $\sim$ 600 câbles de liason entre la caméra et les baies d'électronique passeront entre le bidon et le contrepoids, pour les retards des signaux des PM par rapport au signal de trigger. Le bidon sera monté une fois que les câbles auront été tirés. Un reglage de ± 8 mr dans les deux sens est prévu dans le systéme de fixation du bidon. (La caméra de déplace d'environ 2,5 mr entre les positions verticale et horizontale de l'imageur.)

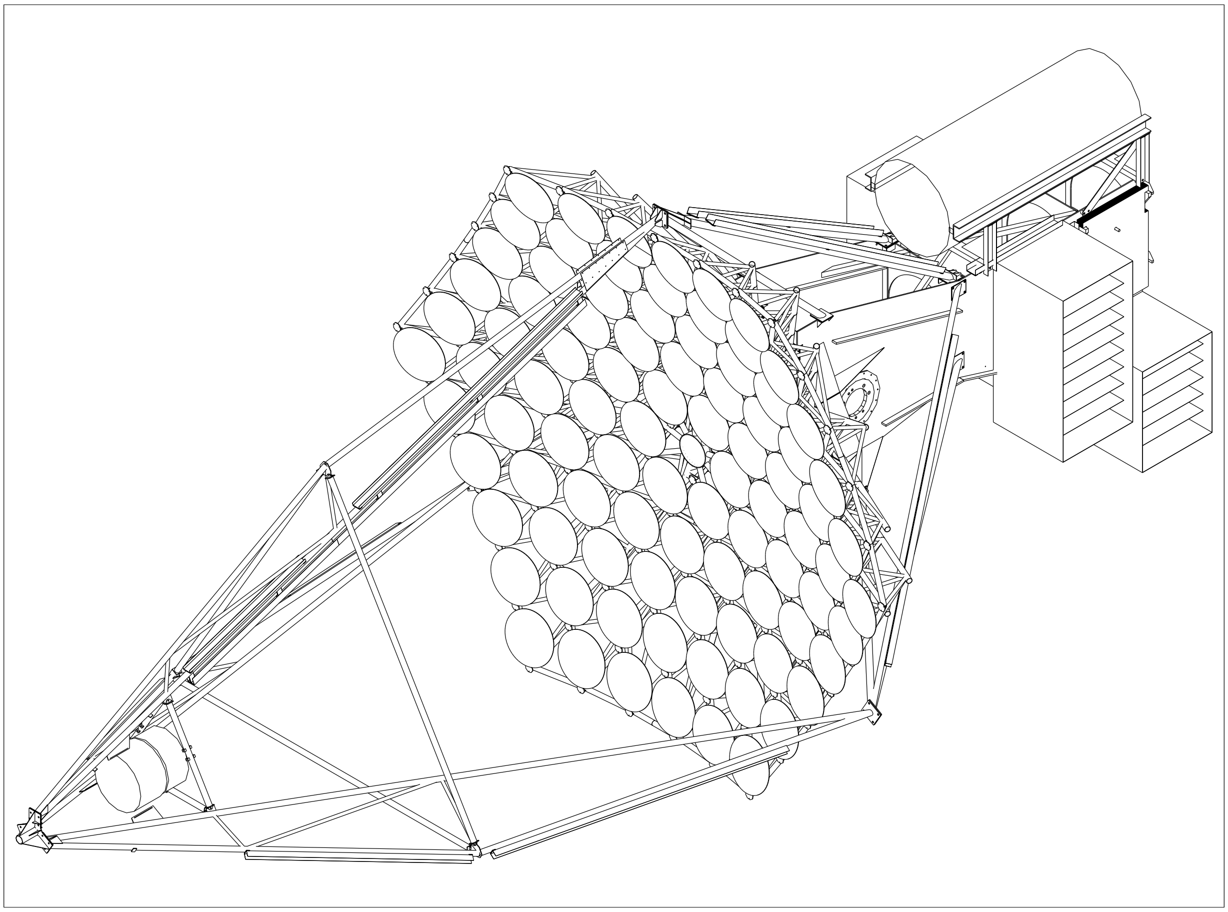

Figure 2: *Le bidon à muons sur le contrepoids (G. Morinaud).*

2.0.2 Construction du bidon

La mécanique de base sera celui des bidons de Thémistocle, construite *ex nuovo*. Le mécanisme d'ouverture automatique sera remplacé par un couvercle fixe. La "peau" extérieure du bidon sera un demi-cylindre (une *'coque'*) que l'on pourra enlever pour accèder à l'intérieur. Deux longues barres, une de chaque côté, assureront la rigidité de l'ensemble. Un système de fixation au contre-poid est à définir (figure 1).

Nous estimons un poids total d'environ 130 kg.

2.0.3 Photoelectrons par muon

Nous avons

$$\frac{d^2N}{dEdx} \simeq 370 \sin^2 \theta_c \; eV^{-1}cm^{-1}.$$

L'angle Cherenkov dans l'air aux altitudes d'intérêt est de $\theta_c \simeq 20$ mr, pour $\beta \to 1$. Nous choisissons le photomultiplicateur XP2020 parce que nous en avons en main et il fera l'affaire. La version "Q" (fenêtre quartz) est préferable parce que la longueur du bidon est

What	How much	So?
Longueur totale	220 cm	
Diamètre total	87 cm	
Axe télescope $\leftrightarrow$ axe bidon	115 cm	place aux câbles!
Poids	$\sim$ 130 kg	
Focale miroirs	40 cm	
Acceptance XP2020	$\pm$63 mr	
Acceptance diaphragm	$\pm$45 mr	3.6 cm diamètre
Diamètre miroirs	80 cm	
Surface utile par miroir	0.45 m^2	
Parcours muon	95 cm (haut), 110 cm (bas)	
<Ph.e./muon>	12 & 7 Ph.e.	"Q" & "normal"
Seuil discriminateur	2 Ph.e.	
Temps de transit du PM	30 ± 1 ns	
Taux muons	220 & 180 /heure	"Q" & "normal"
Taux muons > 10 GeV	100 /heure	
Taux fortuits	< 1/heure	

Table 1: Paramètres des bidons à muons

limitée par la place disponible. L'efficacité quantique (Q.E.) d'un PM XP2020Q est au-dessus de 10% dans la gamme de longueur d'onde de $200 < \lambda < 550$ nm, d'où $\Delta E = 3.9$ eV. (Sur un parcours d'un mètre l'absorption par l'oxygène est négligeable.) La (reflectivité x Q.E.) moyennée sur cette gamme est de 20% et nous obtenons 12 photoelectrons par mètre (toujours pour $\beta \rightarrow 1$). Des parcours de 95 cm (miroir supérieure) et de 110 cm (miroir inférieure) sont prévus.

Si par contre nous utilisons un 2020 "normal" (sans quartz), nous aurons Q.E. > 10% pour $280 < \lambda < 520$ nm, soit $\Delta E = 2.2$ eV, et nous nous attendrons à 6.5 ph.e. par mètre. Dans la figure 5 sont montrées les courbes d'efficacité quantique de la photocathode d'un XP2020 ainsi que la courbe de transmission du verre du PM, d'où un calcul de $\int \epsilon(E)dE$ donne le même resultat.

2.0.4 Taux de Muons

Le champ de vue du bidon, un peu plus grand que celui de l'imageur, mais que l'on peut reduire par un diaphragme devant le photocathode, assurera l'illumination de toute la caméra sans accumuler trop de triggers "vides". L'ouverture angulaire de l'imageur, avec les PM de garde, est de $\pm$ 40 mr. Les petits PM couvrent la zone $\pm$ 28 mr, et le trigger couvre la zone $\pm$ 20 mr. Pour l'acceptance aux muons il faut ajouter l'angle Cherenkov (20 mr). La distance focale d'un miroir de Thémistocle est de 40 cm. Les XP2020 sont de deux pouces, soit 5.08 cm, mais la photocathode n'est que 4.2 cm de large. Nous proposons un diaphragme de 3.6 cm diamètre de sorte que le bidon couvre largement la

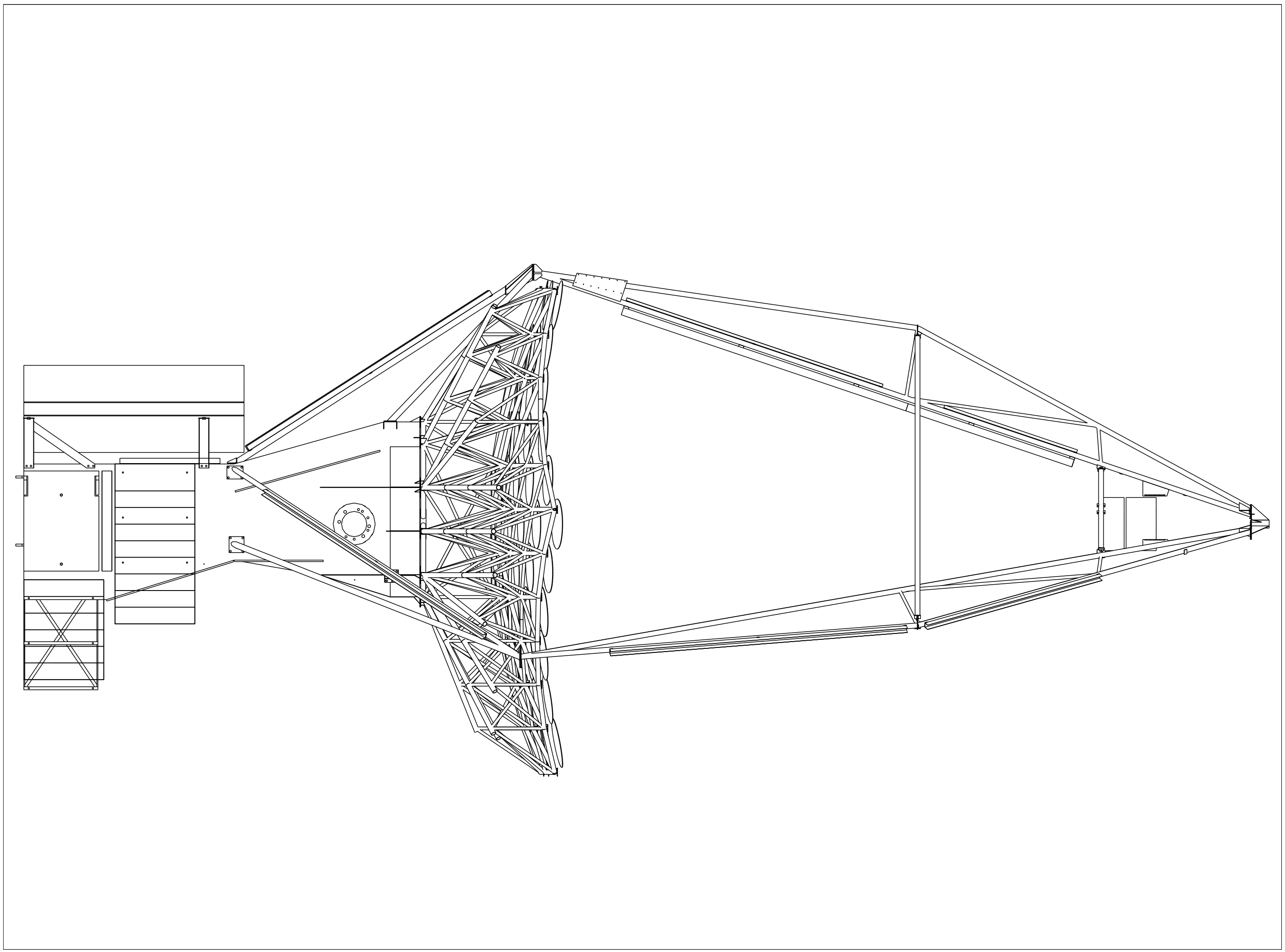

Figure 3: *Vue latérale (G.M.).*

zone de déclenchement de la caméra, d'où l'angle solide d'acceptance du bidon sera de

$$d\Omega = \pi(0.045)^2 = 0.0064 \; sr.$$

A Thémis (1650 m, 850 gm/cm^2), le flux de muons est $\sim 10\%$ plus élevé qu'au niveau de la mer. La figure 6 donne les flux intégraux convolués avec les efficacités de trigger reportées de la figure 7. Cette efficacité est obtenue en supposant une coïncidence entre deux PM chacun avec un seuil à 2 photoelectrons, pour des fluctuations poissoniennes sur les taux moyens de photoélectrons cités ci-dessus. Nous avons négligé les fluctuations gaussiennes sur la hauteur d'impulsion en sortie du PM, qui tendront à diminuer les taux. La superficie utile des miroirs étant de 0.45 m^2, pour le 2020 (2020Q) nous obtenons

$$\sim 180 \; (220) \; muons/heure.$$

Le taux de muons au-dessus de 10 GeV sera de ~ 100 à l'heure.

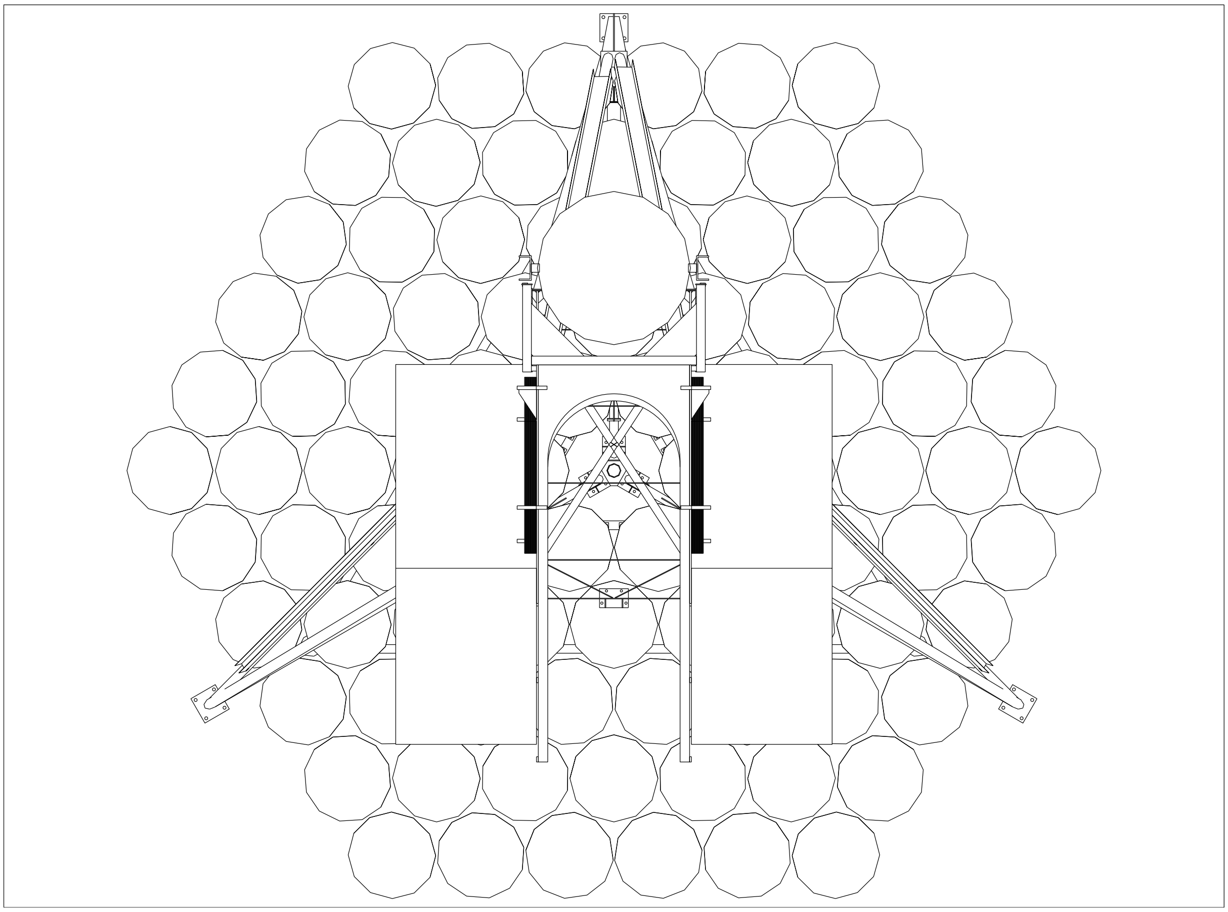

Figure 4: *Vue d'en dessous de l'imageur (G.M.).*

Sur 10 (12) des nouveaux XP2020 récemment installés sur Thémistocle, le taux de comptage au noir est moins de 50 (100) hertz avec un seuil de discriminateur de 2 ph.e. et à un gain de 10^6. L'efficacité pour les muons avec ce seuil sera bon (figure 7) et le taux de fortuits sera de l'ordre de 10^{-4} hz au plus (< 1 par heure).

Le fond dominant viendra des électrons et est décrit dans Urban *et al* (1991).

2.0.5 L'Electronique

A la hauteur de chaque PM sortiront 2 traversées BNC et une traversée haute tension, le deuxième BNC étant conçu pour un éventuel "spare".

Quatre mètres de cable devront suffire pour amener les signaux à un chassis sur le contre-poids. Nous aurons besoin de deux canaux de discriminateur et une coïncidence sur 10 à 30 ns de largeur. Comme les bidons seront étanches à la lumière extérieure on pourra utiliser un gain plus élevé que 10^6 pour éviter la nécessité d'un amplificateur. Toutefois les bases seront identiques à celles de Thémistocle et équipées d'un préamplificateur (LeCroy VV100B, gain $\simeq 10$). Le groupe d'électronique du LPNHE-Paris 6/7 prévoit la réalisation

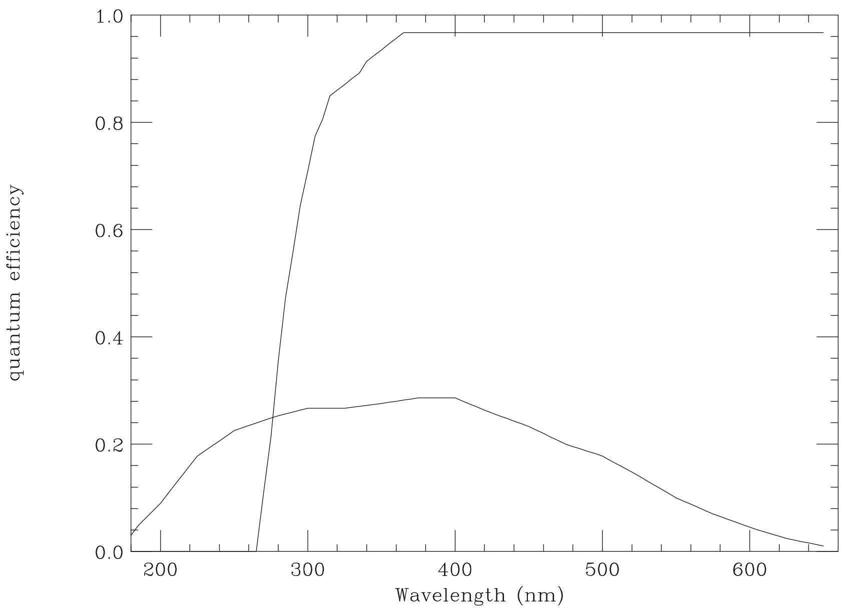

Figure 5: *Efficacité quantique de la photocathode bialkali du XP2020, et transmission du verre du PM.*

des circuits nécessaires au trigger. La sortie de la coïncidence entrera dans le système de trigger de l'imageur où un retard réglable est prévu.

La coïncidence aura deux utilisations : déclenchement et tagging. Pour la plupart des études (les fonds, efficacité de collection de photon) un tag suffira, la lecture de la caméra étant déclenchée par le trigger 'standard' de l'imageur. Le tag consiste en un bit enregistré sur VME et inclus dans le fichier de données comme 'flag' d'évènements à anneau de muons. Pour les études de l'efficacité du trigger 'standard', la coïncidence du bidon à muons déclenchera la lecture de la caméra. (Un bit d'étiquettage du trigger 'standard' est prévu dans les registres stockés sur le fichier de données. Un canal d'échelle serait également souhaitable.) Le déclenchement par le bidon nécessite une mise en temps avec le trigger standard qui implique un delai maximal permis. Compte tenu du temps de transit du XP2020 (30 ± 1 ns) ce délai correspond à 8 à 10 mètres de câble maximum. Ceci ne posera pas de problèmes sauf pour d'éventuelles études du trigger en fonction de la longueur de l'anneau. (Même pour le bidon sur le contrepoids nous aurons des segments courts d'anneau dans la zone de déclenchement de la caméra.)

3 Le bidon fixé au sol

Le bidon au sol sera utilisé pour des runs spéciaux, comme par exemple pour l'étude des muons qui simulent des gerbes gamma. La figure 8 donne la longueur du segment d'anneau, en nombre de pixels de la caméra, en fonction de la distance du muon du centre de l'imageur, d'aprés la formule en Vacanti (1994). Les muons qui contribuent à ce fond tombent entre 6 et 15 mètres. Pour des raisons de mise en temps du trigger (voir ci-dessus)

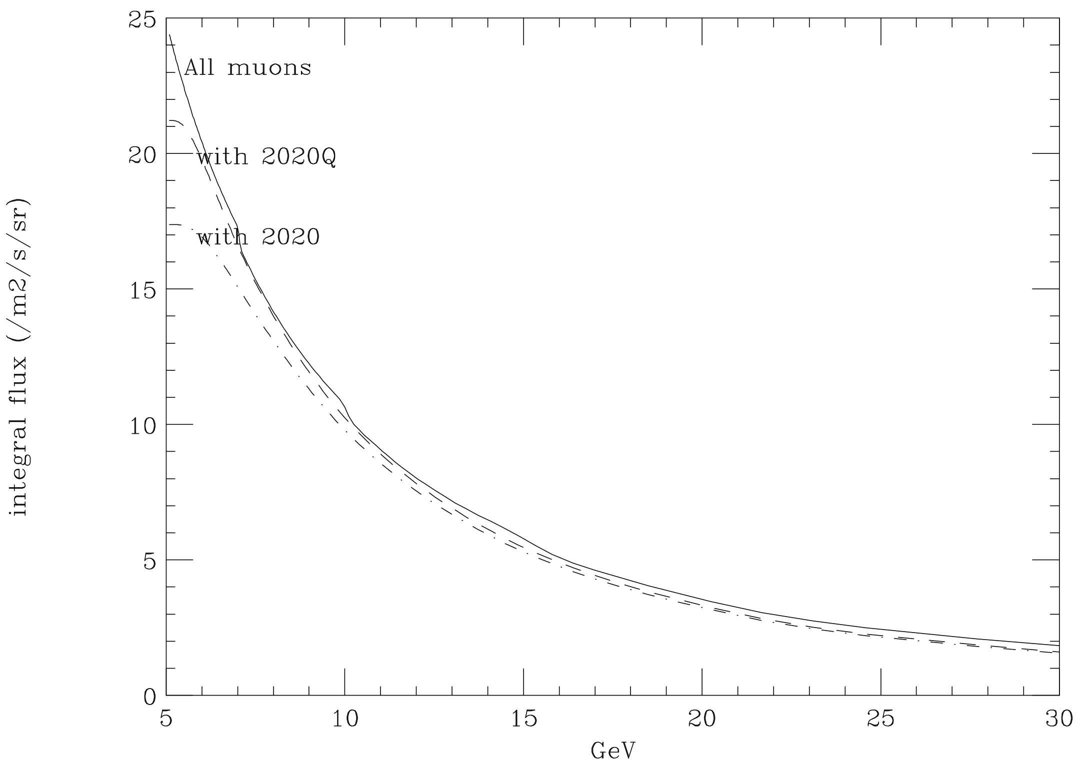

Figure 6: *Flux intégral à l'altitude de Thémis, convolué avec l'efficacité du bidon à muons, pour les deux choix de PM.*

il sera difficile de déclencher avec un bidon au-delà d'une petite dizaine de mètres. En tout cas, le bidon 'fixe' sera en fait transportable sur quelques mètres et orientable sur quelques degrés.

Le bidon au sol est prévu d'être presque identique à celui sur le contrepoids. Ceci dit, les raisons citées contre les miroirs DCA au début de ce memo sont moins fortes. On pourrait donc imaginer de gagner un facteur 3.5 en taux à l'avenir si le bidon fixe se revèle être d'une grande utilité.

Reférences:

1. Les bidons à muons ont évolué depuis les premiers essais Artémis/Clue au Gran Sasso :
"Čerenkov Ring Images of Cosmic Ray Muons", P. Fleury *et al*, Dublin ICRC (1991) OG 10.3.2
"Muon Trigger Barrels", M. Urban *et al*, note interne LPNHE-X/Artémis (Mai 1991).
"Calibration of Gamma Ray Telescopes with Single Muon Čerenkov Pulses", G.P. Rowell *et al*, Dublin ICRC (1991) OG 10.3.15
"Absolute Calibration of an Atmospheric Cherenkov Telescope Using Muon Ring Images", Y. Jiang *et al*, Calgary ICRC (1993).
"Observation de la nébuleuse du Crabe par gerbes atmosphériques en lumière UV", X. Sarazin thèse (1995).
"Muon Ring Images with an Atmospheric Čerenkov Telescope", G. Vacanti *et al*, Astroparticle Physics **2** (1994) pp. 1-11.

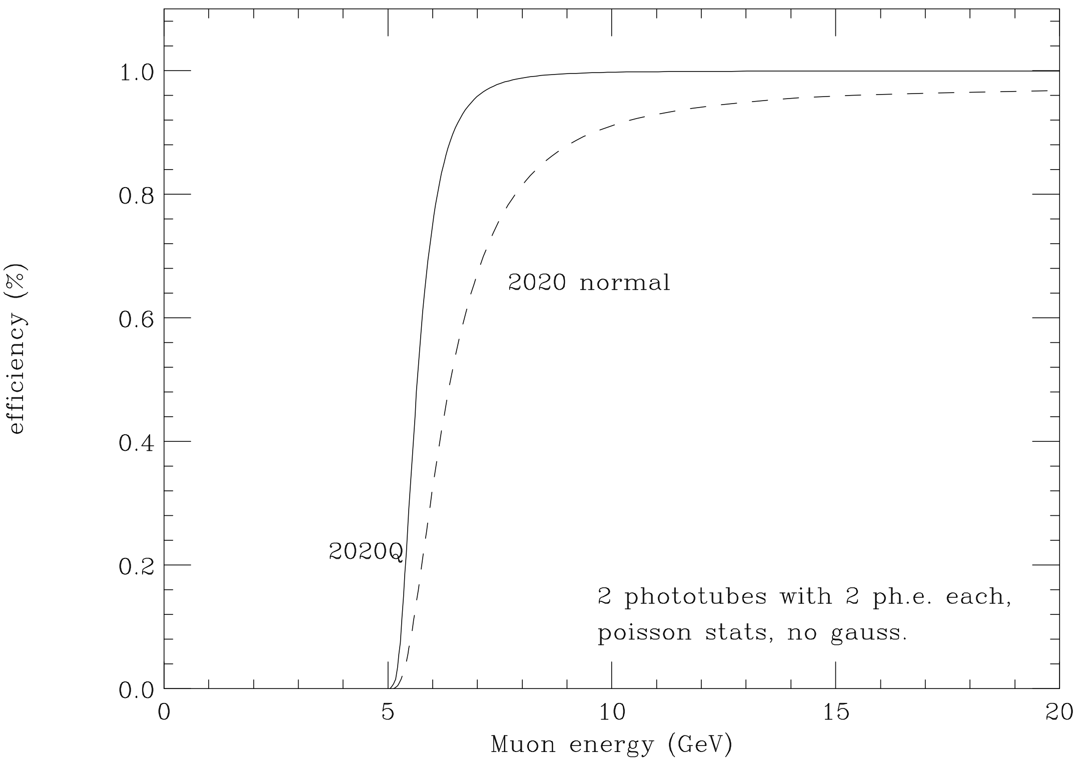

Figure 7: *Efficacité de déclenchement par un muon de la coïncidence des deux phototubes, en fonction de l'énergie du muon, pour les 2020Q (solide) et les 2020 (pointillé).*

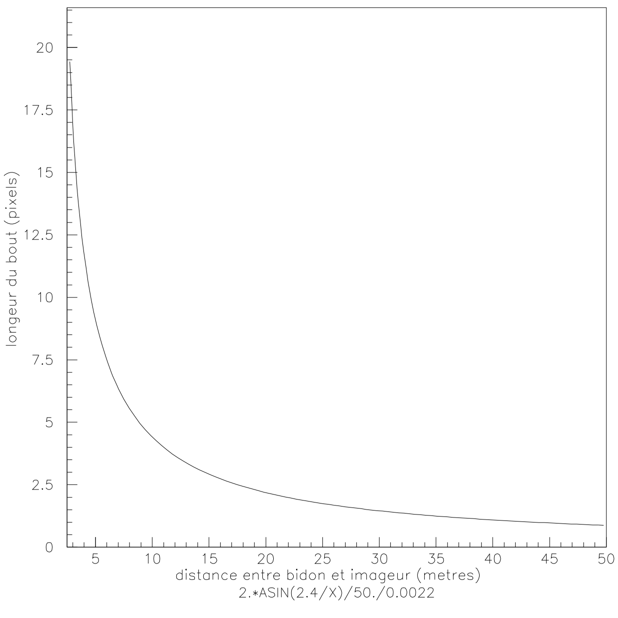

Figure 8: *Longueur du segment d'anneau de muon visible dans la caméra, en pixels, en fonction de la distance du muon de l'axe de l'imageur.*