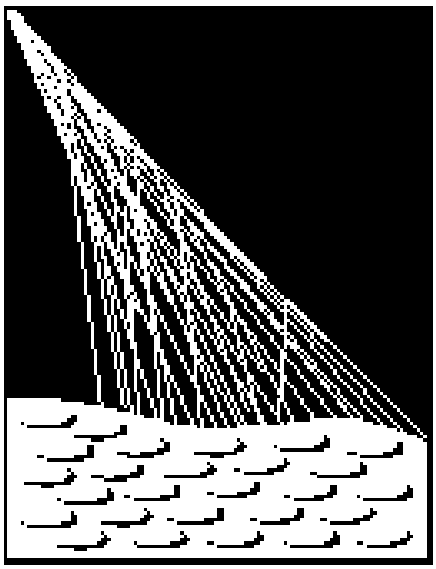


PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Les rayons cosmiques d'énergie extrême

Benoît Revenu, PCC Collège de France

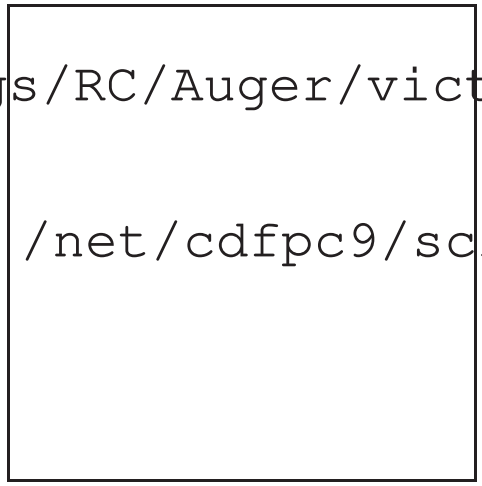
Plan

1. Présentation des rayons cosmiques
   (a) propriétés générales
   (b) état des lieux de nos connaissances

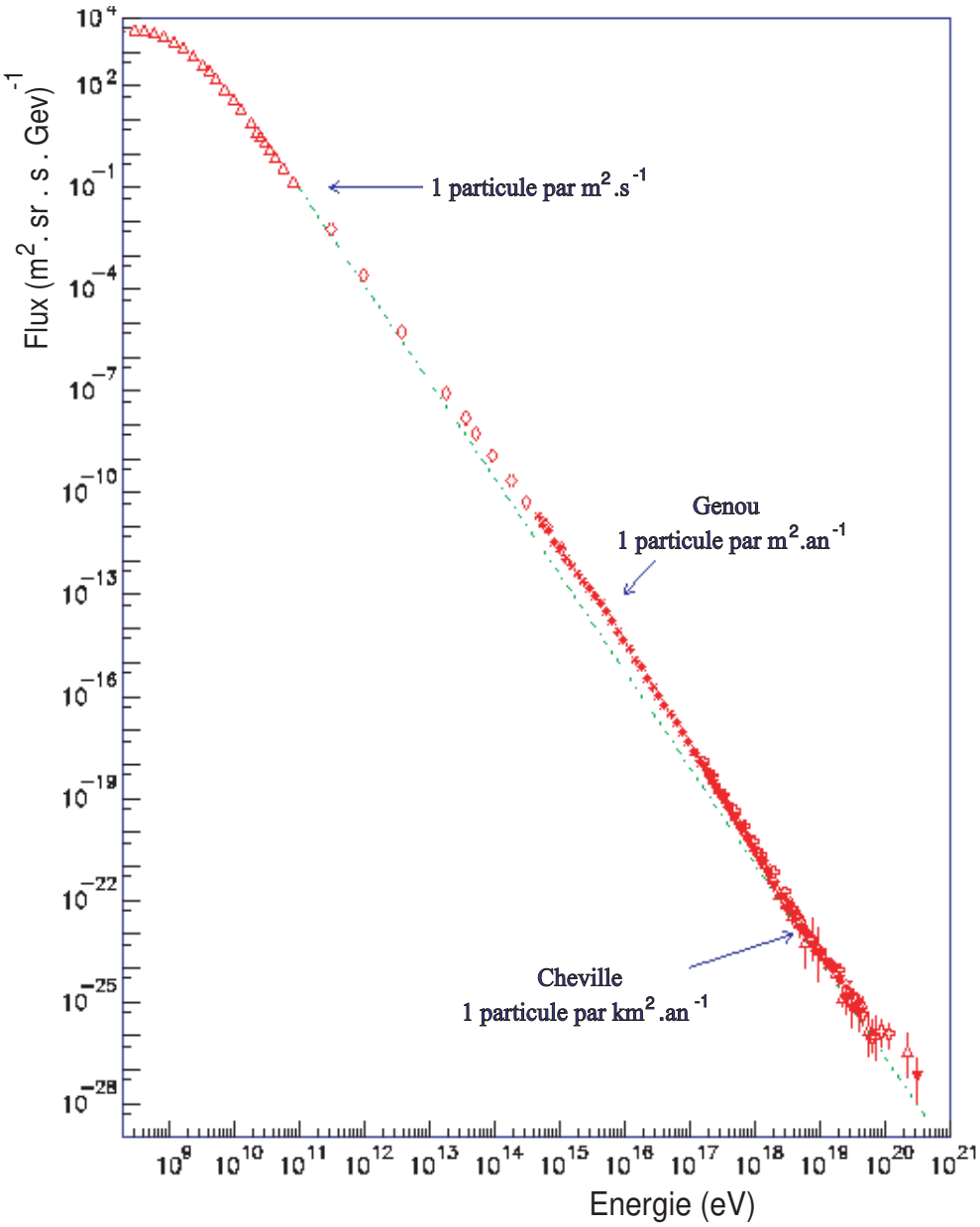
2. Phénoménologie des rayons cosmiques
   (a) détection au sol
   (b) lumière de fluorescence

3. L'expérience Pierre Auger (détecteur hybride)
   (a) détecteur de surface
   (b) détecteur de fluorescence
   (c) premier regard sur les données de surface

Qu’est-ce qu’un rayon cosmique ?



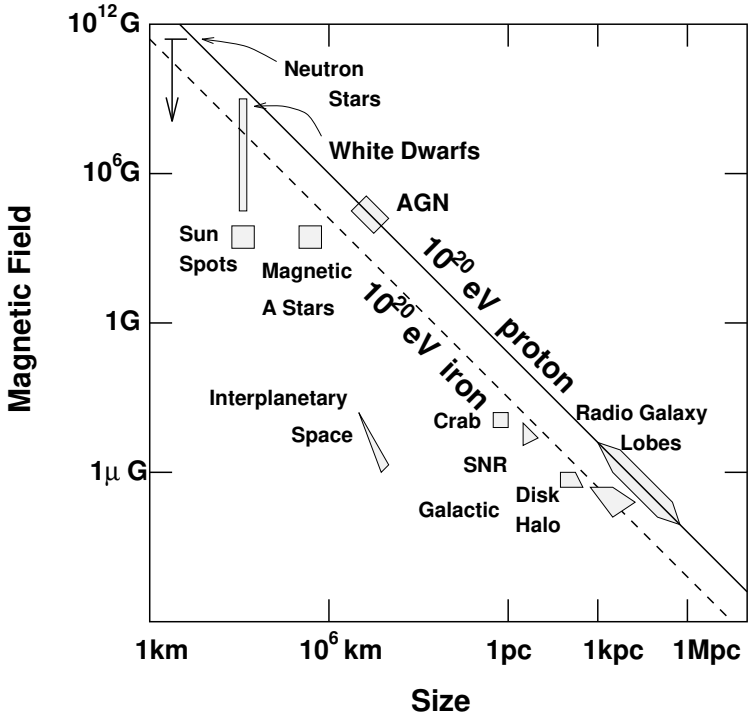
Le spectre en énergie



1. 32 ordres de grandeur en flux
2. régulier sur 12 ordres de grandeur en énergie
3. 2 ruptures de pente (vers 3×10^{15} eV et vers 10^{18} eV)
4. spectre inconnu aux énergies extrêmes

État des lieux (1)

- accélération des RC par mécanismes de Fermi I (onde de choc) et II (stochastique) : valable jusqu'à 10^{15} eV
- accélération par interaction avec $\boldsymbol{E}$ et $\boldsymbol{B}$ (étoiles à neutrons, trous noirs, champs en mouvements...) $E = ZBL$



- déviation faible dans les champs magnétiques

rayon de Larmor : $r_L \sim \dfrac{E}{ZB_\perp}$

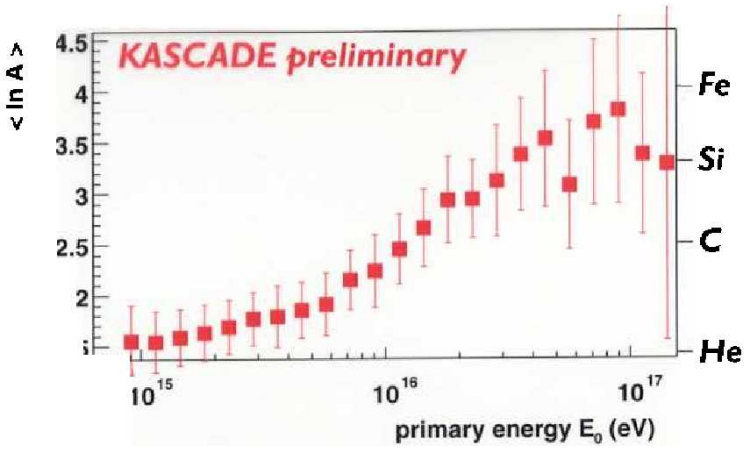
$$\theta(E,d) \sim 0.8^\circ Ze \left(\frac{E}{10^{20}\text{ eV}}\right)^{-1} \left(\frac{d}{10\text{ Mpc}}\right)^{1/2} \left(\frac{\ell_c}{1\text{ Mpc}}\right)^{1/2} \left(\frac{B_\perp}{10^{-9}\text{ G}}\right)$$

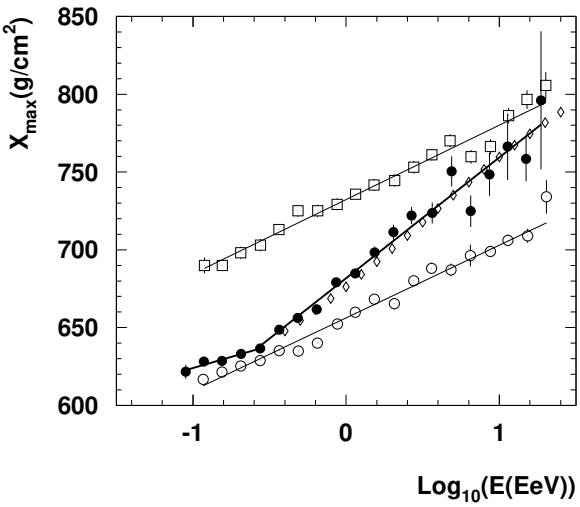
$$\tau(E,d) \sim 1.5 \times 10^3 q^2 \left(\frac{E}{10^{20}\text{ eV}}\right)^{-2} \left(\frac{d}{10\text{ Mpc}}\right)^{2} \left(\frac{\ell_c}{1\text{ Mpc}}\right) \left(\frac{B_\perp}{10^{-9}\text{ G}}\right) \text{ ans}$$

mais les champs magnétiques sont mal connus

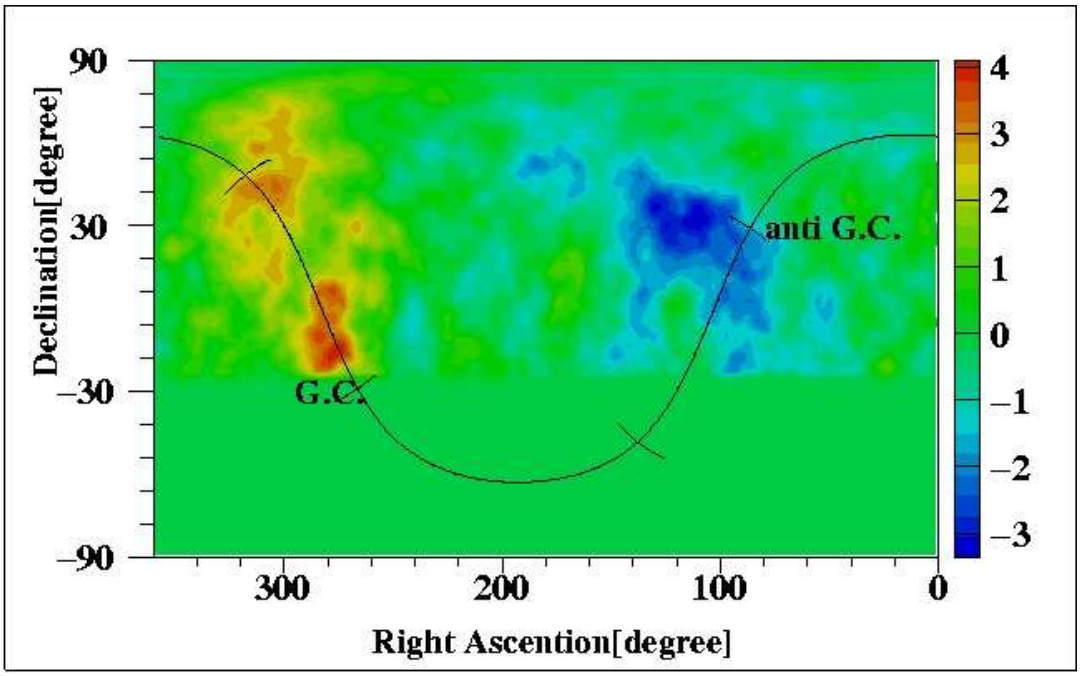
État des lieux (2)

- nature : léger, puis lourd au niveau du genou ;
  lourd puis léger à 10^{18} eV (HiRes, AGASA, Kascade)





- provenance des RC d'énergie $\leqslant 10^{18}$ eV : galactique (4 σ)



- existence de la coupure GZK (Greisen, Zatsepin, Kuzmin)

La coupure GZK

interaction des RC avec le rayonnement fossile à 3 K

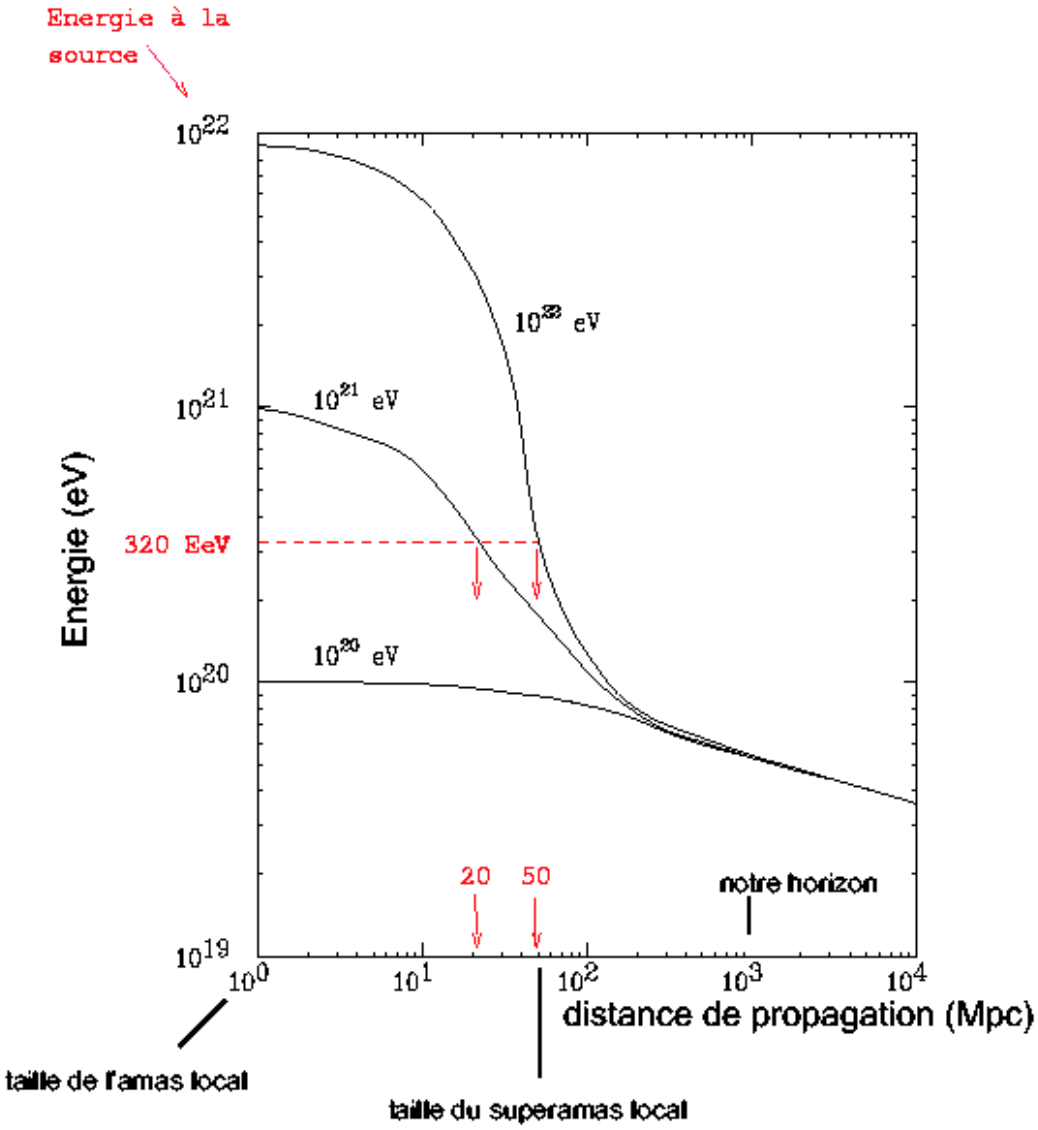
(6×10^{-4} eV, 400 cm^{-3}) : existence d'une énergie seuil

permettant la photoproduction de pions (cas d'un hadron)

par exemple, pour un proton (pire pour un noyau),

$$E_{\text{seuil}} = 4 \times 10^{19} \text{ eV}$$

mfp $\sim$ 6 Mpc



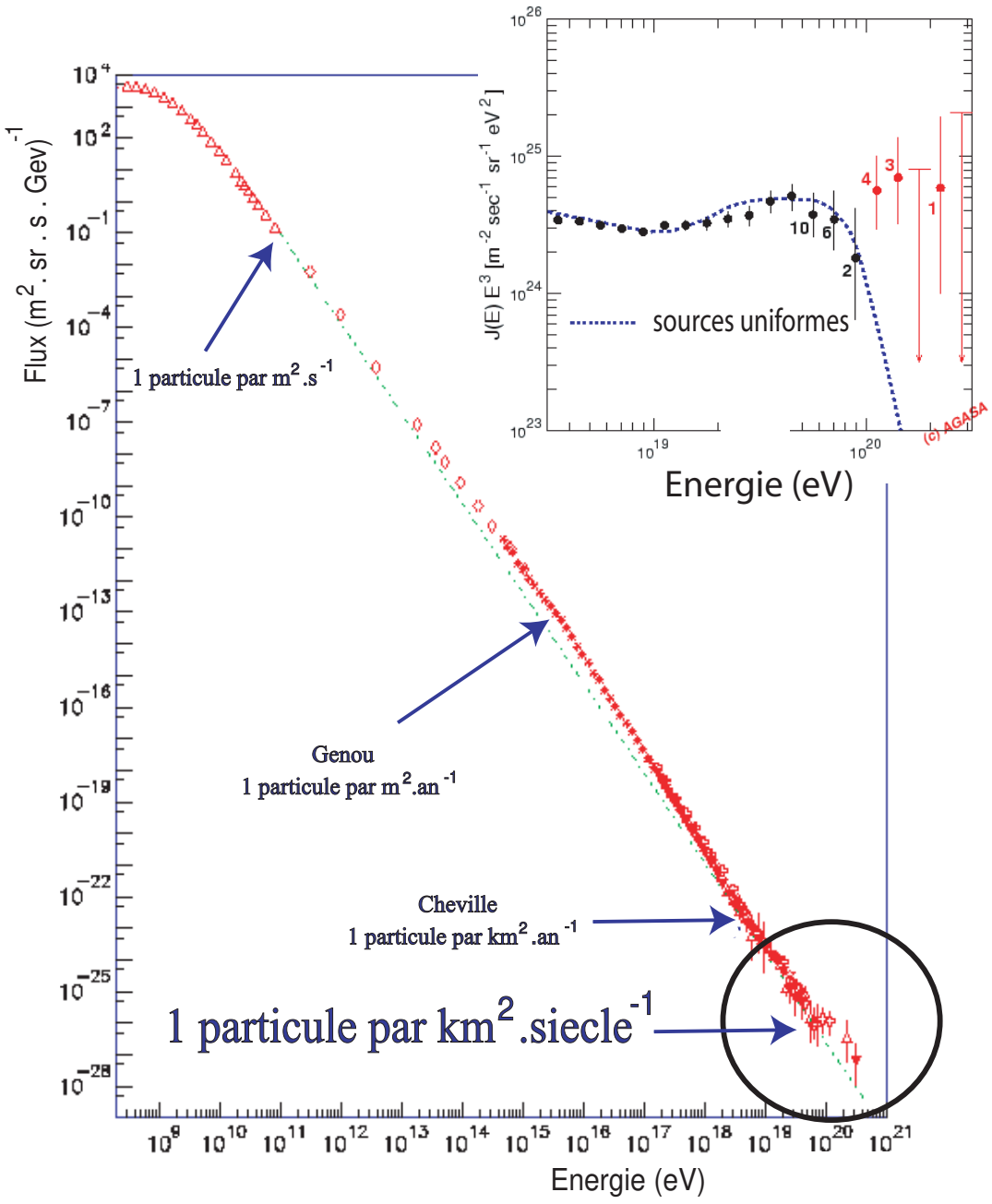
cas du photon : production de paires à partir de 4×10^{14} eV

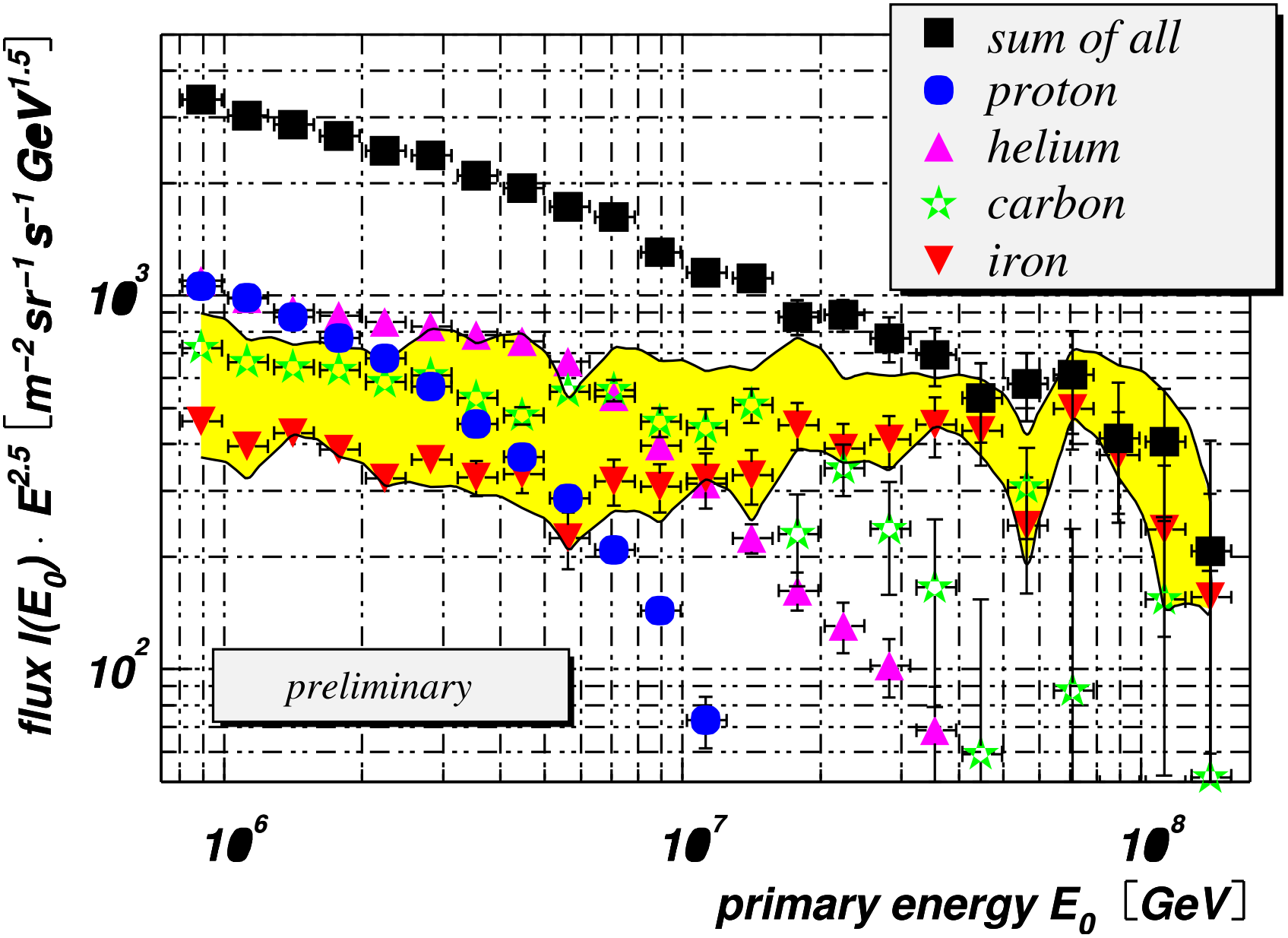
Nos principales lacunes

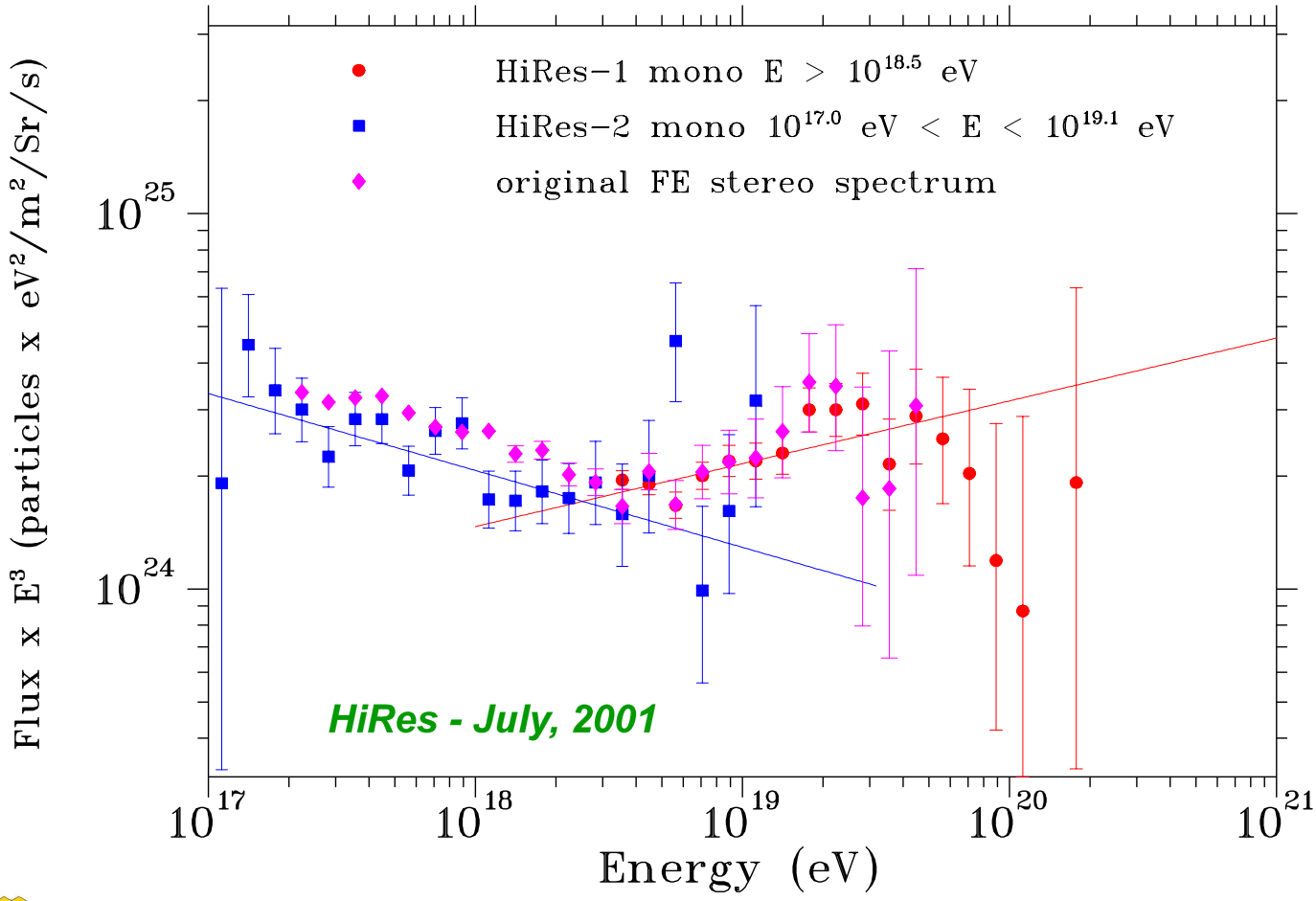
1. le genou à 10^{15} eV : une ou plusieurs contributions ?

   Problème de fine tuning (Kascade). SN proche ?

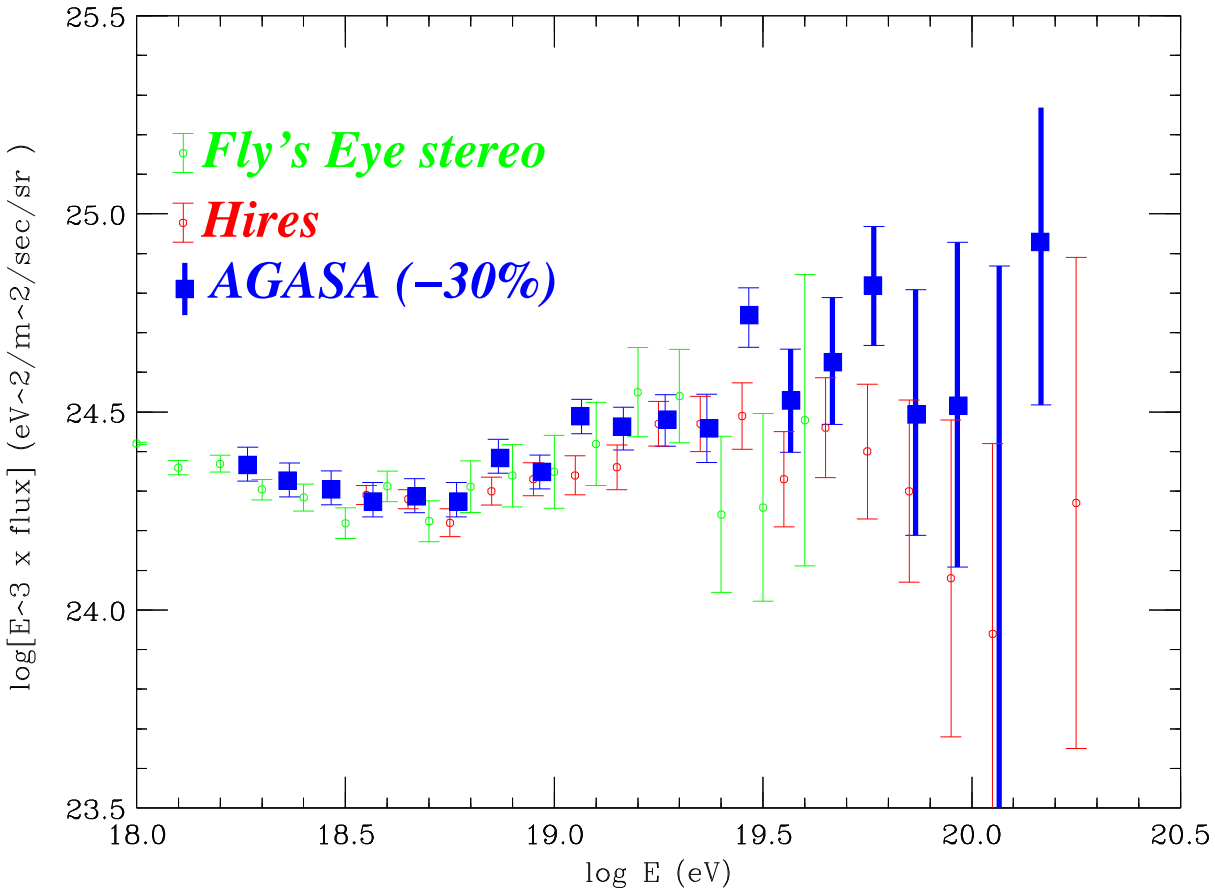
2. on a observé des événements au-delà de la coupure GZK




sum of all
proton
helium
carbon
iron
preliminary
flux $I(E_0) \cdot E^{2.5}$ $[m^{-2} sr^{-1} s^{-1} GeV^{1.5}]$
10^3
10^2
10^6
10^7
10^8
primary energy E_0 [GeV]

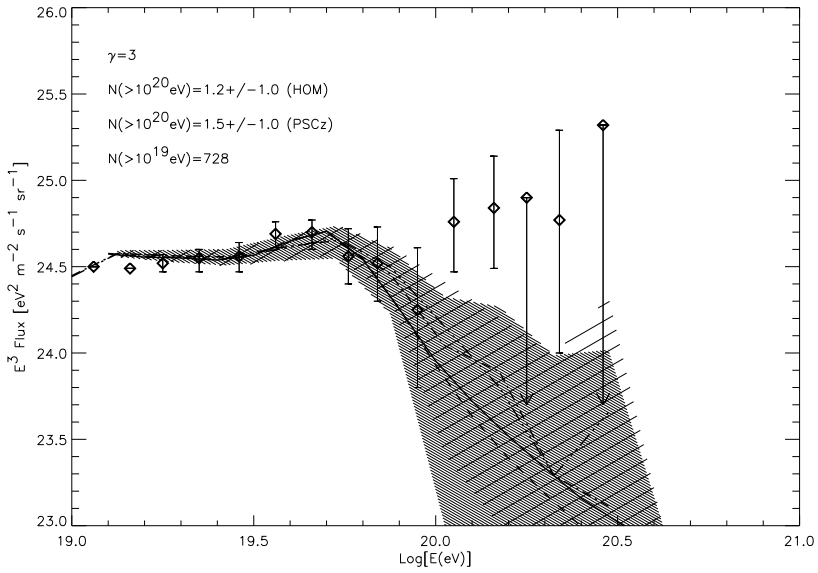

HiRes-1 mono E > $10^{18.5}$ eV
HiRes-2 mono $10^{17.0}$ eV < E < $10^{19.1}$ eV
original FE stereo spectrum
HiRes - July, 2001
Flux x E^3 (particles x $eV^2/m^2/Sr/s$)
Energy (eV)

HiRes


Fly's Eye stereo
Hires
AGASA (–30%)
log[E^3 x flux] (eV^2/m^2/sec/sr)
log E (eV)

Au-delà de GZK : les problèmes

- statistique très faible (environ 1/km^2/siècle, $\sim$ 20 événements en 35 ans)
- origine : corrélation avec des structures galactiques ? extragalactiques ? cosmologiques ? (déviation faible)
- nature du primaire inconnue, contrainte des 50 Mpc
- les mécanismes “classiques” de l’astrophysique ne permettent pas de donner une telle énergie à ces RC :

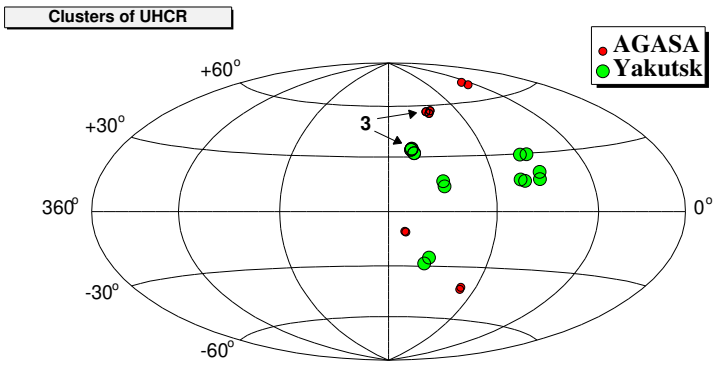


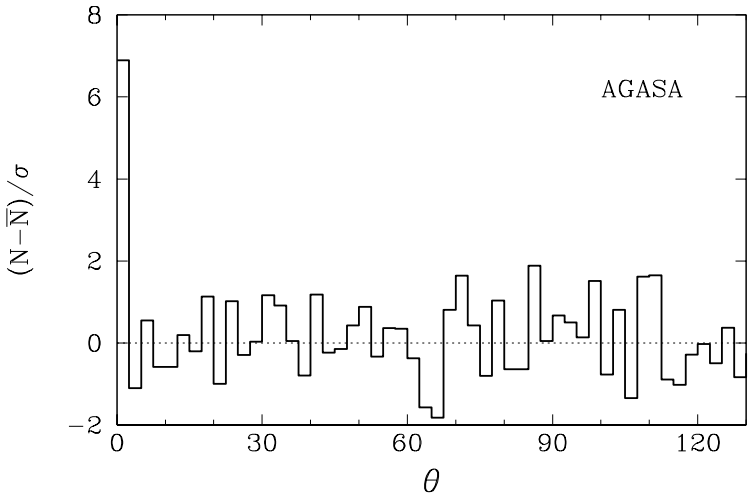
nouvelle physique ?

1. les défauts topologiques post-inflation (photons, ν)
2. annihilation de particules issues des GUT (photons, ν)
3. violation de l’invariance de Lorentz

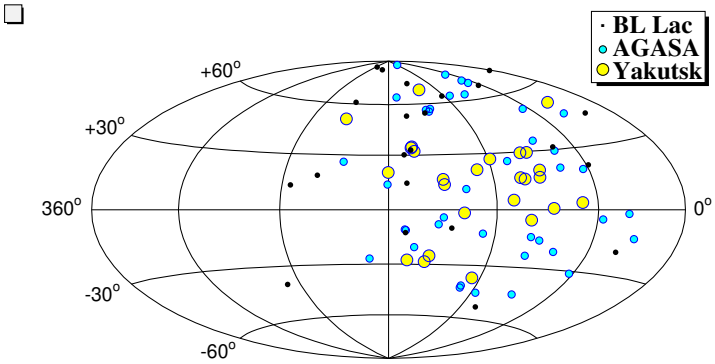
Nouvelles avancées

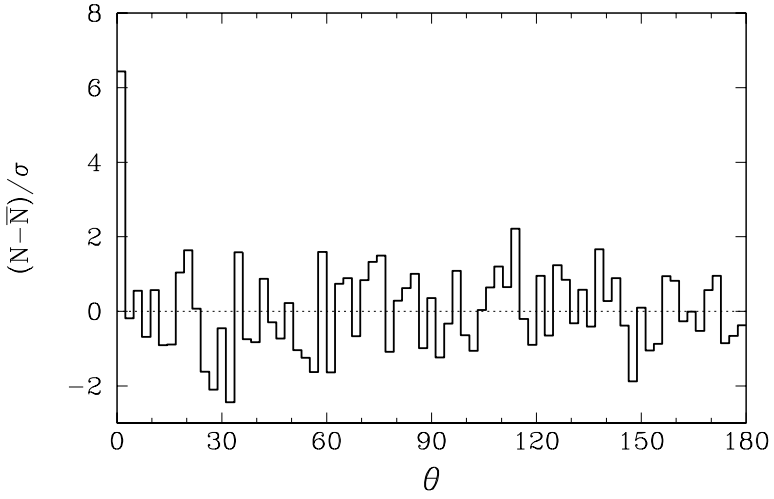
- réanalyse des événements et 8 nouveaux événements découverts par AGASA (ICRC 2001) ; acceptance augmentée de 50 % au-delà de 10^{19} eV
- analyse des multiplets AGASA + Yakutsk les sources compactes sont privilégiées (significatif : $\sim 7\,\sigma$)

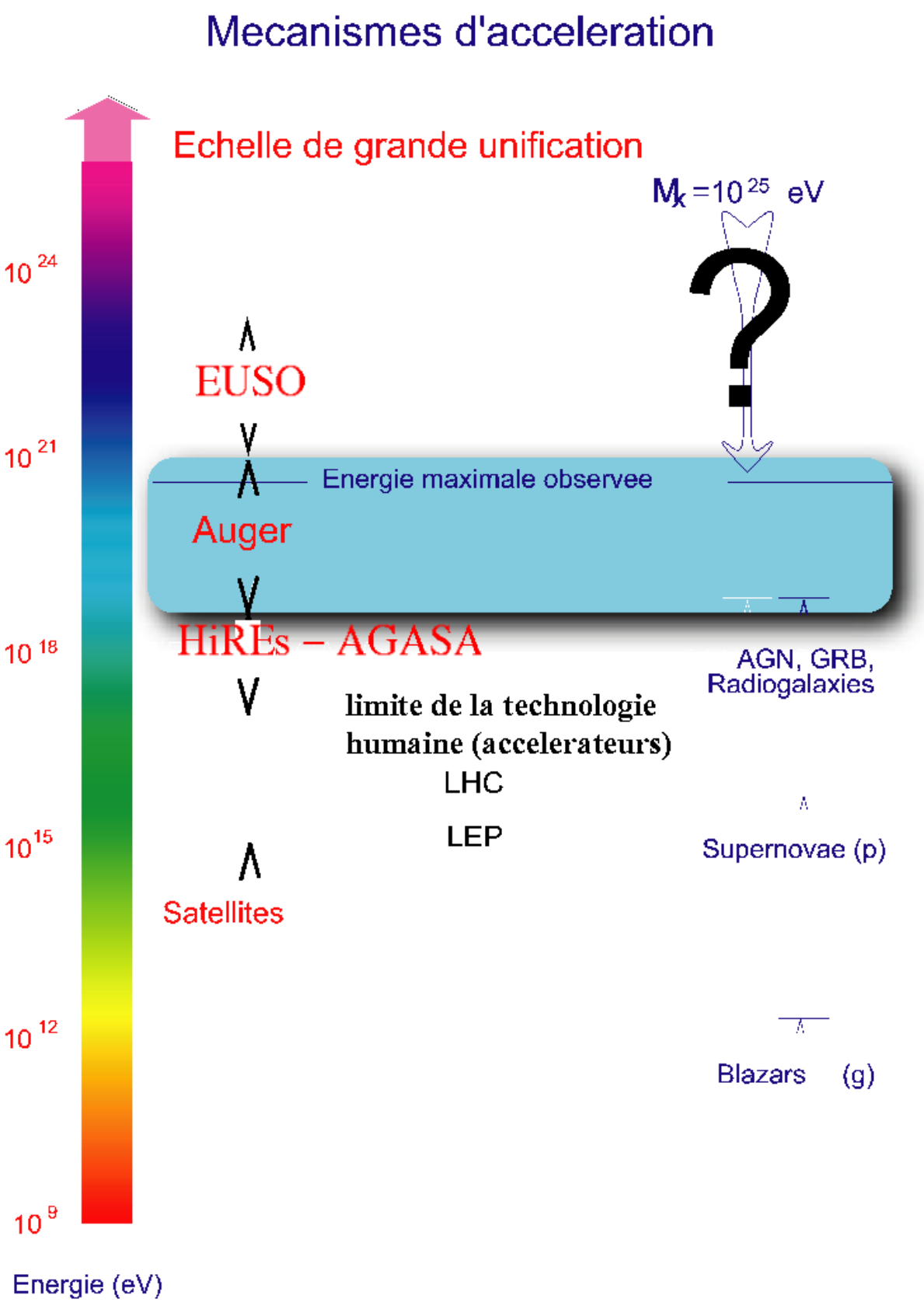




- corrélation avec les BL Lac ?

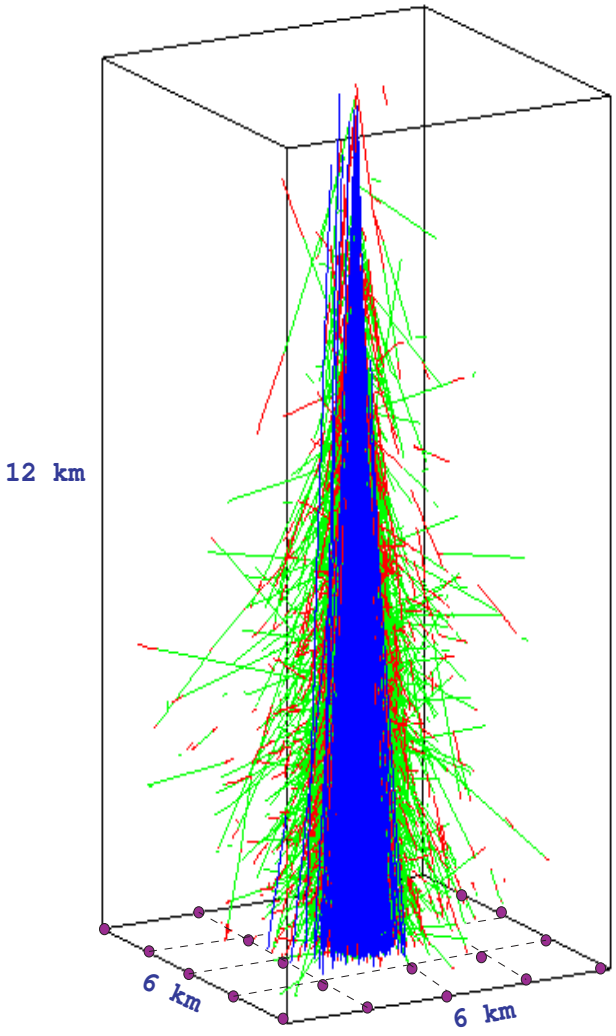





Mecanismes d'acceleration
Echelle de grande unification
$M_X = 10^{25}$ eV
10^{24}
10^{21}
10^{18}
10^{15}
10^{12}
10^{9}
EUSO
Energie maximale observee
Auger
HiREs – AGASA
AGN, GRB,
Radiogalaxies
limite de la technologie
humaine (accelerateurs)
LHC
LEP
Supernovae (p)
Satellites
Blazars (g)
Energie (eV)

Phénoménologie des RC
gerbes atmosphériques (1)

interaction du primaire avec l'atmosphère ($z \sim 12$ km)



pour un proton de 10^{19} eV :

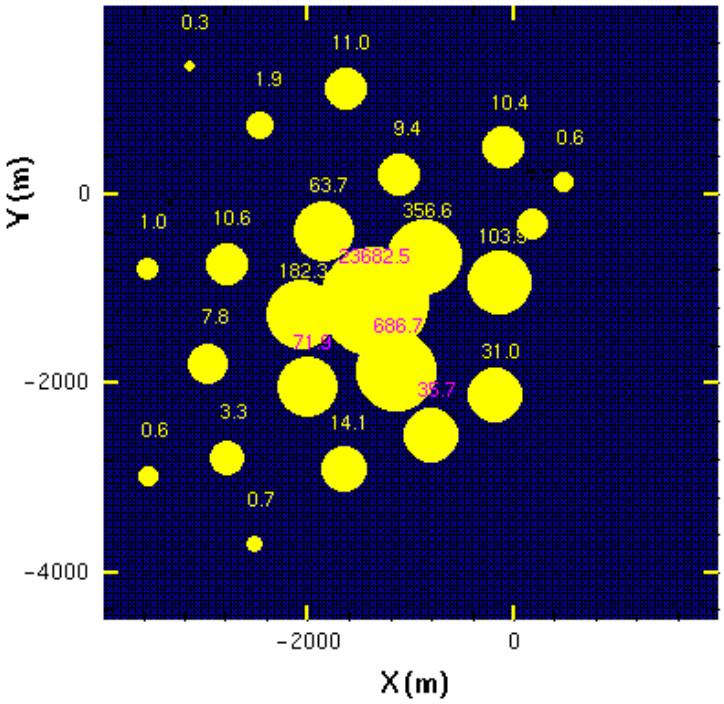
- 3×10^{10} particules secondaires au sol (mer, $E \geqslant 200$ keV)
- 99 % de γ et e^- dans le rapport 6/1, pour 85 % de E_0 ($E \sim 1 - 10$ MeV)
- 1 % de μ (~ 1 GeV, pour 10 % de E_0), $\pi^{0,\pm}$ de quelques GeV (pour 4 % de E_0) puis ν et baryons
- $R_{\text{Molière}} \sim 80$ m
- à 1 km de l'axe de la gerbe, $\gamma/e^-/\mu = 30/2/1$ par m^2
- max. : $\sim 7 \times 10^9$ e^- à $z = 1800$ m

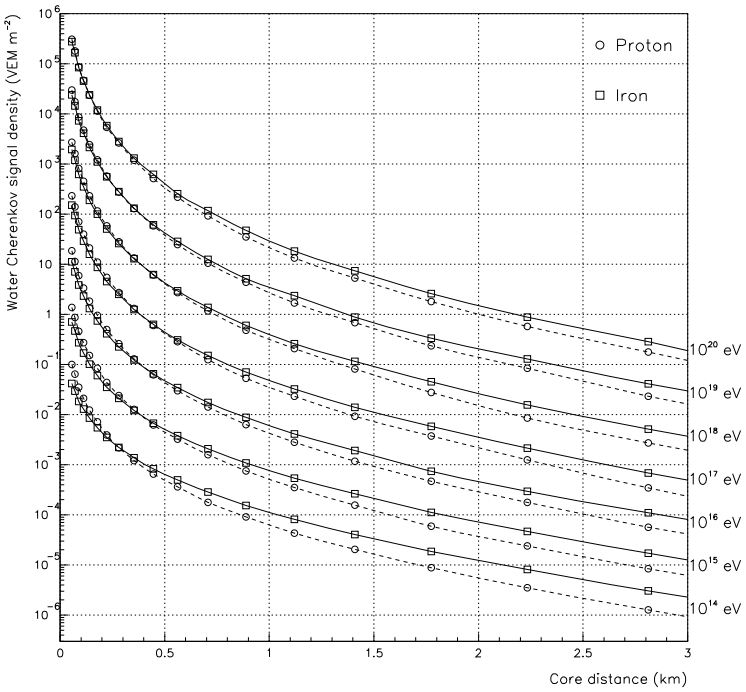
- la composition de la gerbe dépend du primaire ; plus de μ pour Z grand

gerbes atmosphériques (2)

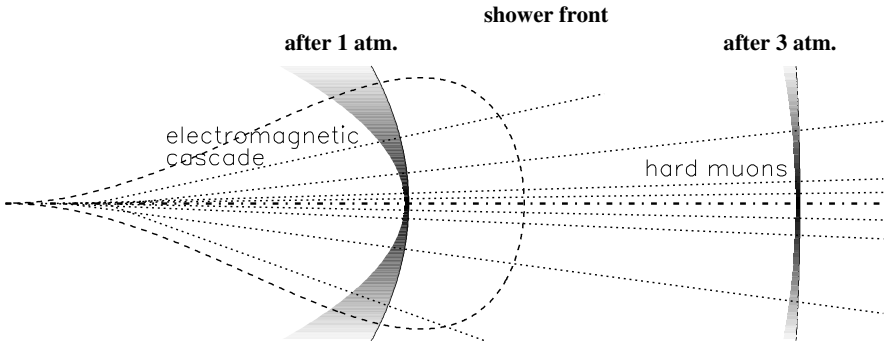
- distribution latérale : loi de NKG (Nishimura, Kamata, Greisen)

$$S(r) = k \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{-(\eta-\alpha)}$$





- le front de gerbe :



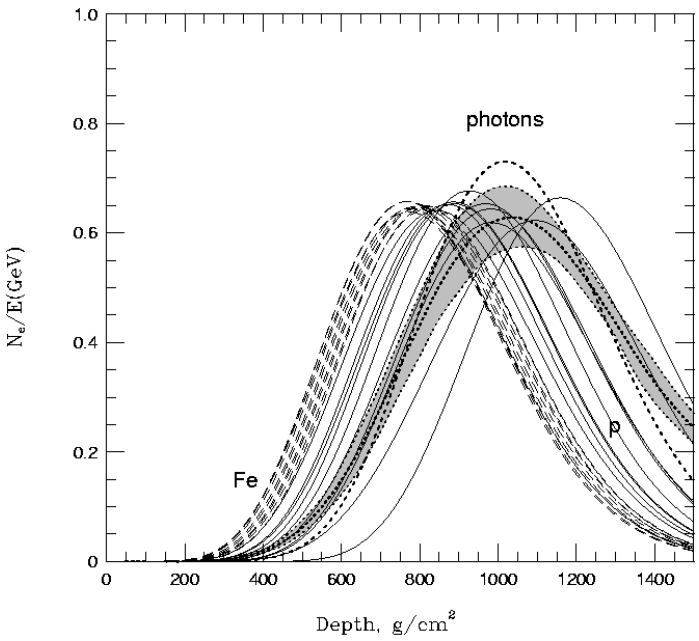
épaisseur de quelques ns au cœur, de quelques μs vers 1 km

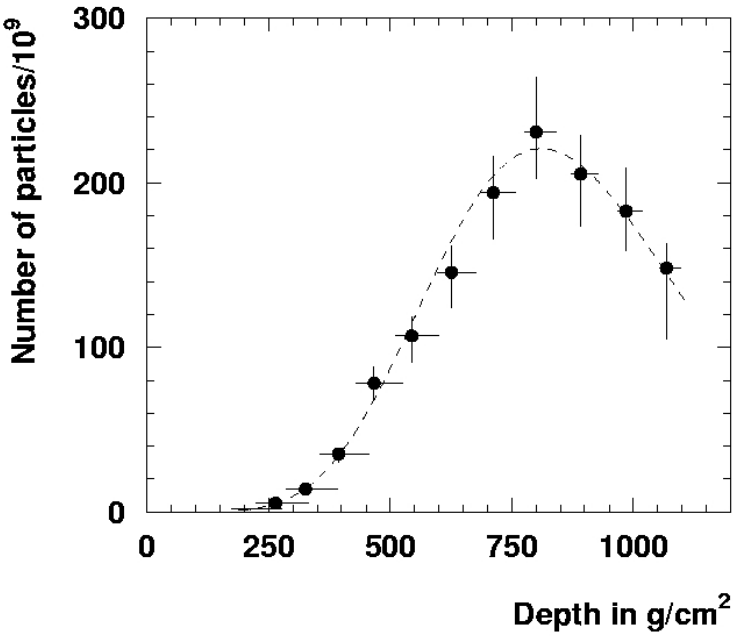
gerbes atmosphériques (3)

particules chargées dans l'air $\Longrightarrow$ Lumière de fluorescence

processus : désexcitation rapide et isotrope du N_2 ; raies à 337.1, 357.7 et 391.4 nm (proche ultraviolet)

profil longitudinal :





Position du maximum :

$$X_{\text{max}} \sim (1-B)X_0\left(\ln\frac{E}{\epsilon} - \ln \text{A}\right)$$

Développement longitudinal :

$$N_e(x) = N_{\text{max}}\left(\frac{x-x_0}{X_{\text{max}}-x_0}\right)^{(X_{\text{max}}-x_0)/\lambda} e^{X_{\text{max}}-x}$$

Bilan

- les gerbes sont statistiquement distinguables
- détection au sol et fluorescence ne donnent pas accès aux mêmes grandeurs.
  réseau de surface : θ (+), ϕ (+), énergie (+)
  fluorescence : X_{max} (++), θ, ϕ
- besoin des 2 techniques
- besoin d'une grande statistique

La collaboration Pierre Auger

/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auge

/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/world_map_gr

19 pays, 295 scientifiques

2 sites, un dans chaque hémisphère

/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/ciaArgentina.ps
/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/ciaArg

Le site

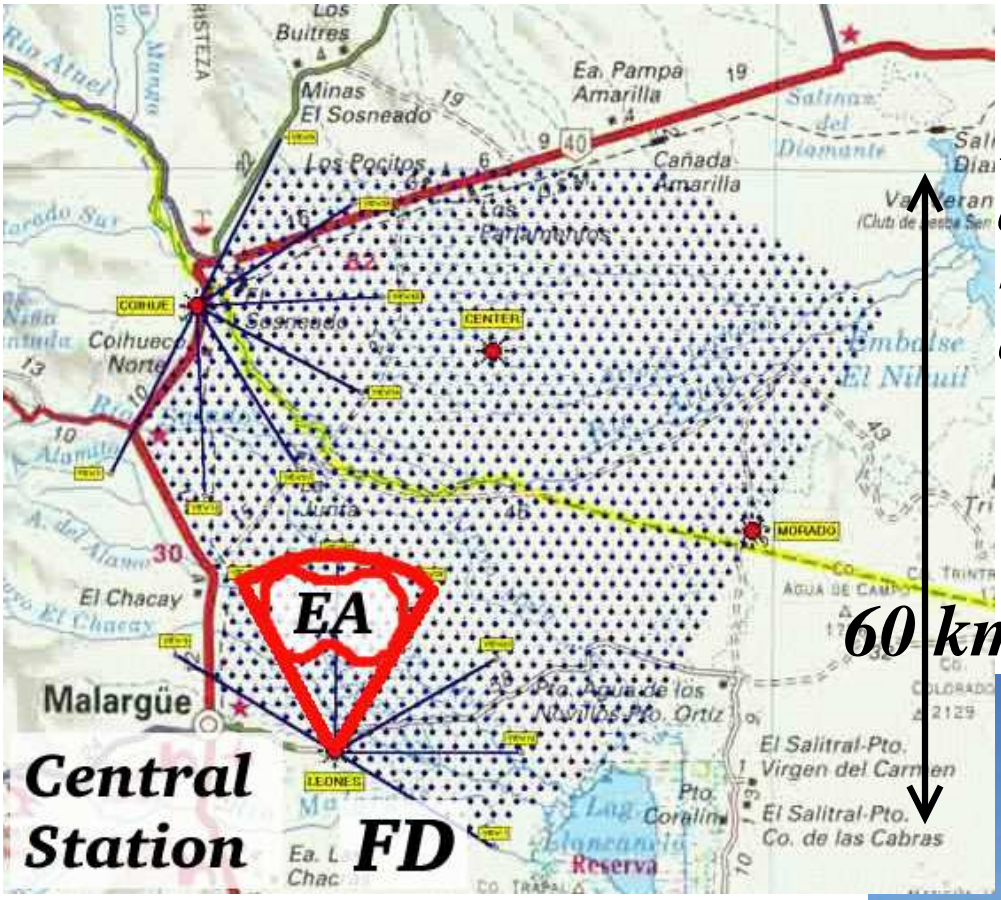
/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/DSCN1141.P

/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/Sdscn0859.

L'expérience

Détection **hybride** des gerbes atmosphériques :

- détecteur de fluorescence
- détection du rayonnement Cerenkov dans l'eau contenue dans des cuves disposées en réseau au sol

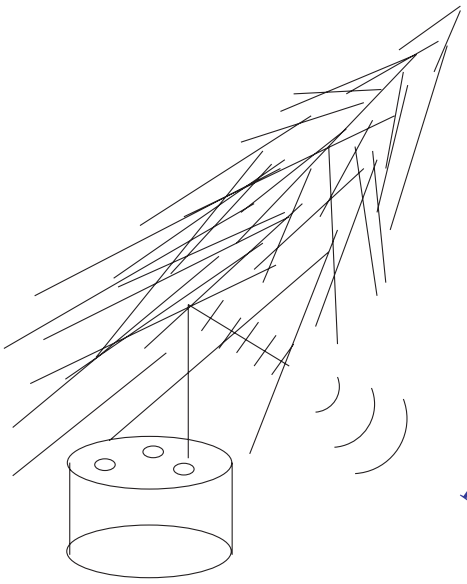


1600 cuves
distantes de 1,5 km
4 détecteurs
de fluorescence

un modem, 3 PMTs
une antenne
12000 litres d'eau
une boîte d'électronique
panneaux solaires et batteries

Le réseau

lecture des FADC
triggers 1 et 2
monitoring
calibration
marquage en temps
télécoms

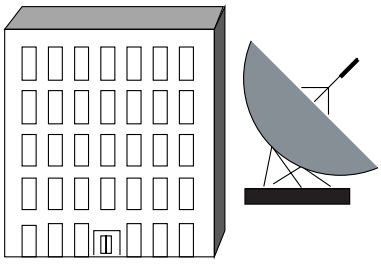


Station locale (pampa)

lien radio

Station de base (pampa)

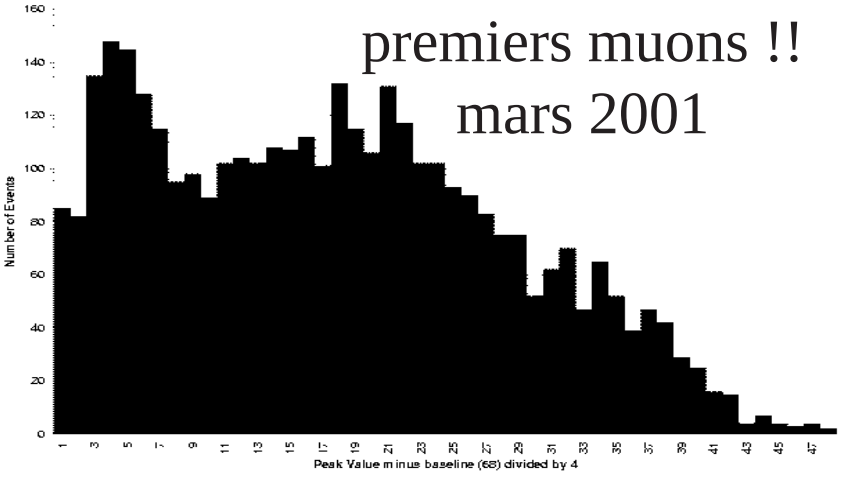
lien micro-ondes



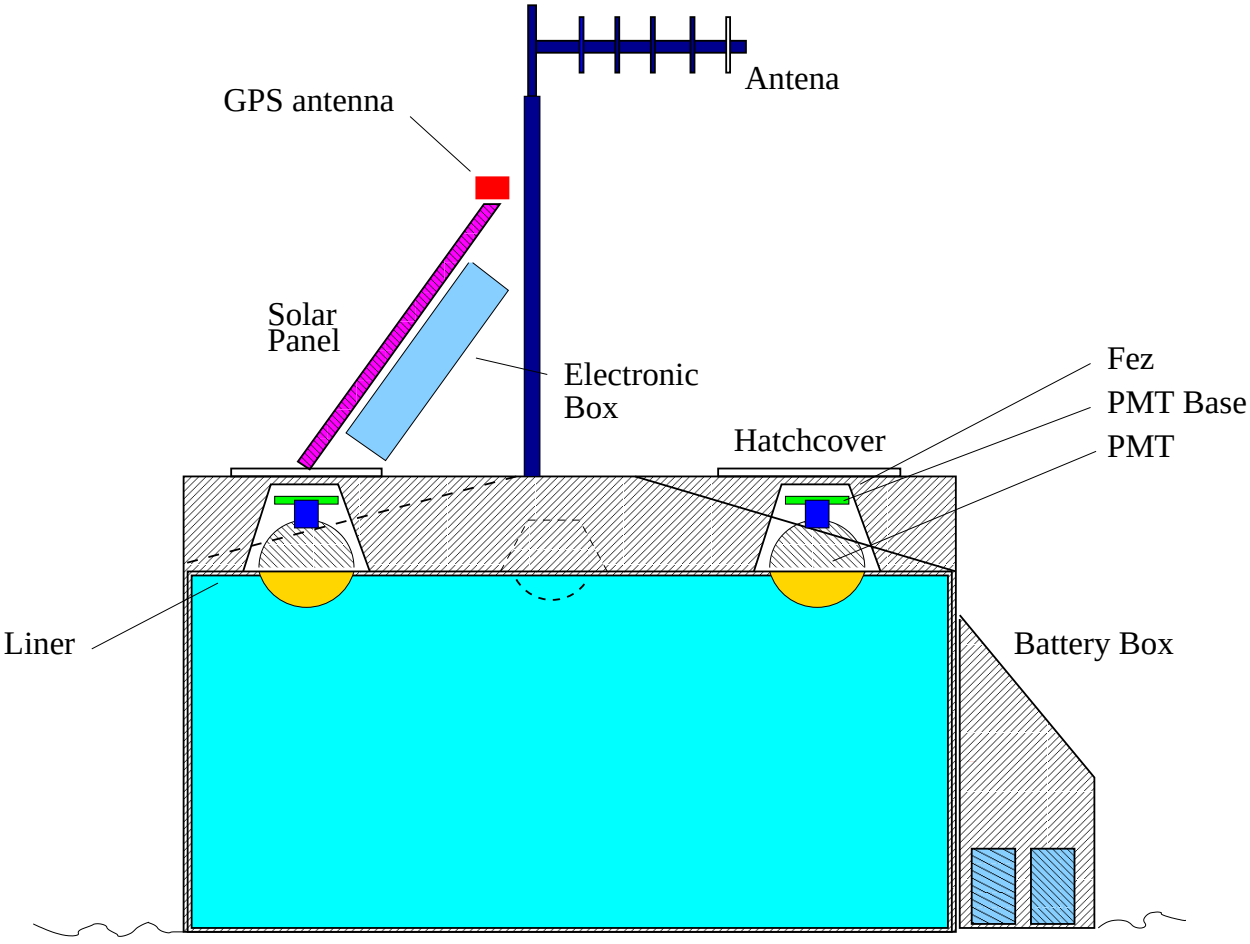
Station centrale (en ville)

échantillonnage
interactions
reconstruction

premiers muons !!
mars 2001

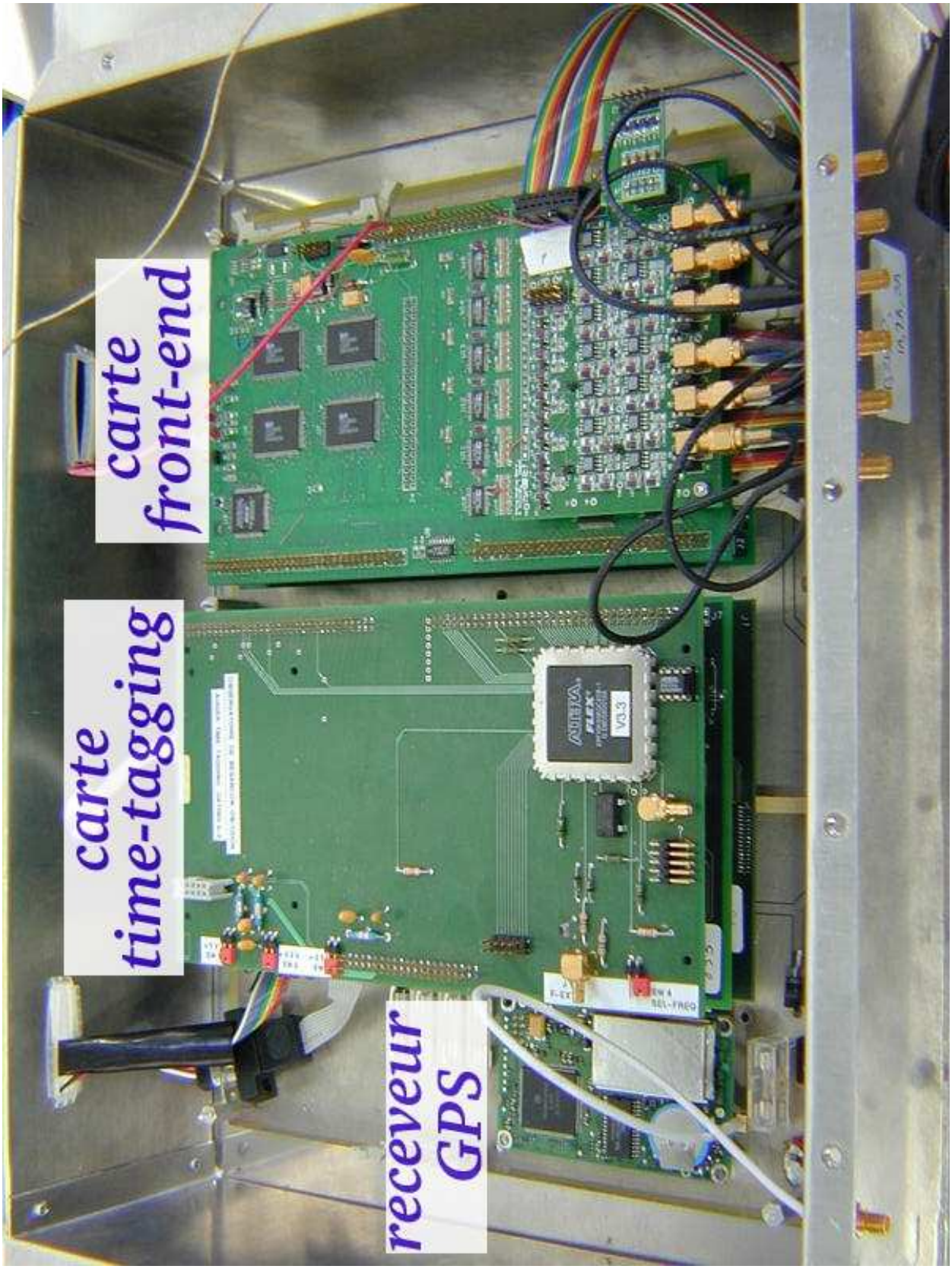


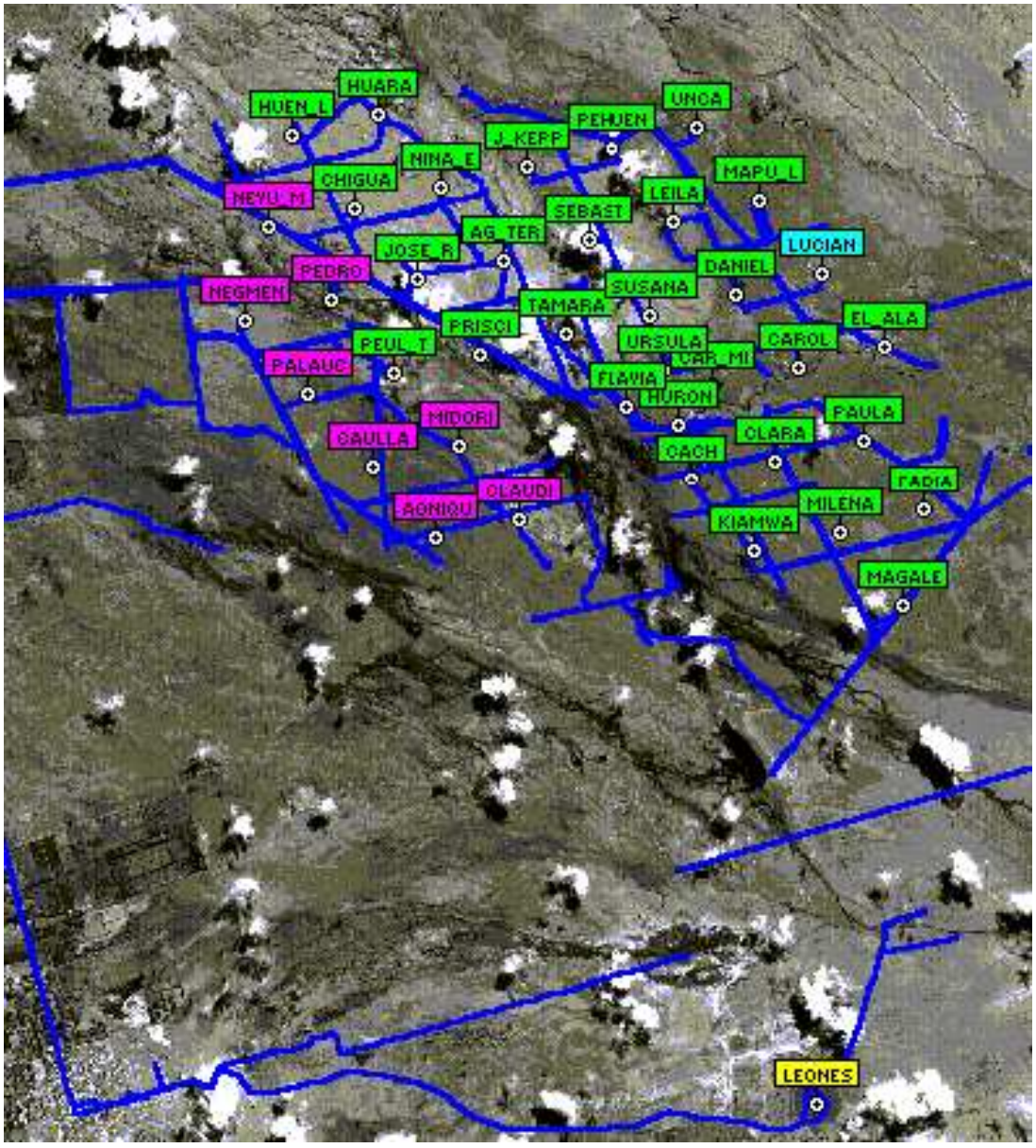
Les détecteurs de surface



/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/SD/telecom_gps_solpan.ps

L'électronique




HUARA
HUEN_L
UNOA
PEHUEN
J_KEPP
NINA_E
MAPU_L
CHIGUA
NEYU_M
LEILA
SEBAST
AG_TER
LUCIAN
JOSE_R
PEDRO
DANIEL
NEGMEN
SUSANA
TAMARA
EL_ALA
PRISCI
URSULA
CAROL
PEUL_T
CAR_MI
PALAUC
FLAVIA
HURON
PAULA
MIDORI
CLARA
CAULLA
CACH
TADIA
CLAUDI
AONIQU
MILENA
KIAMWA
MAGALE
LEONES

/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/los_leones_building.ps

/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/filter.ps

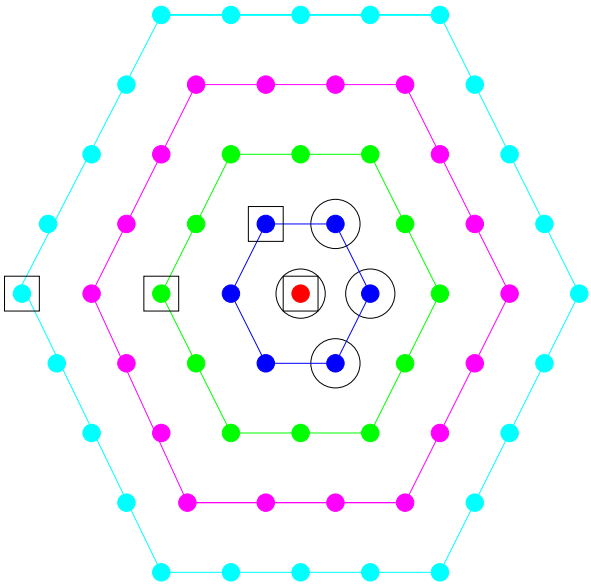
Les triggers et les données

T1 (carte front-end, 100 Hz), T2 (station locale, 20 Hz)

et T3 (le CDAS)

algorithme de T3 pour l'EA :

- triple coïncidence dans 6 km (6×10^{-2} Hz, trigger EA)
- T3 aléatoire toutes les 3 minutes (avec un T2 unique, trigger R)
- coïncidences aléatoires Carmen-Miranda toutes les 3 minutes (trigger CM)



Données :

- 10 (bits) $\times$ 1024 (samples) $\times$ 6 (PM) $\times$ 5 (stations) / 6 (compression) $\times$ 0.02 Hz (T3 rate) $\times$ 2 (calib) = 0.25 kb/s

  22 Mb par jour, 144 Mb pour le monitoring

- contrôle total des stations à distance (seuils, soft...)

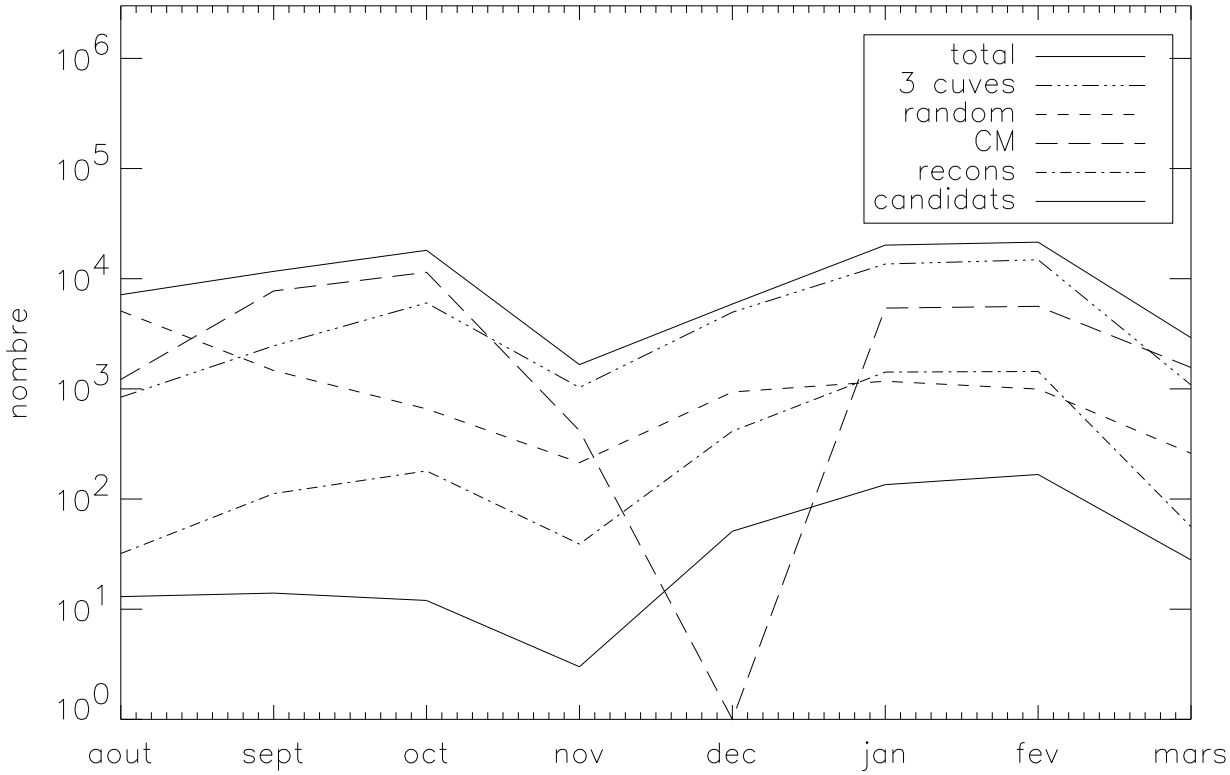
La station centrale, le CDAS

/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auger/TDR/XIk.eps

/net/cdfpc9/scr/Figs/RC/Auge

Regard sur les premières données

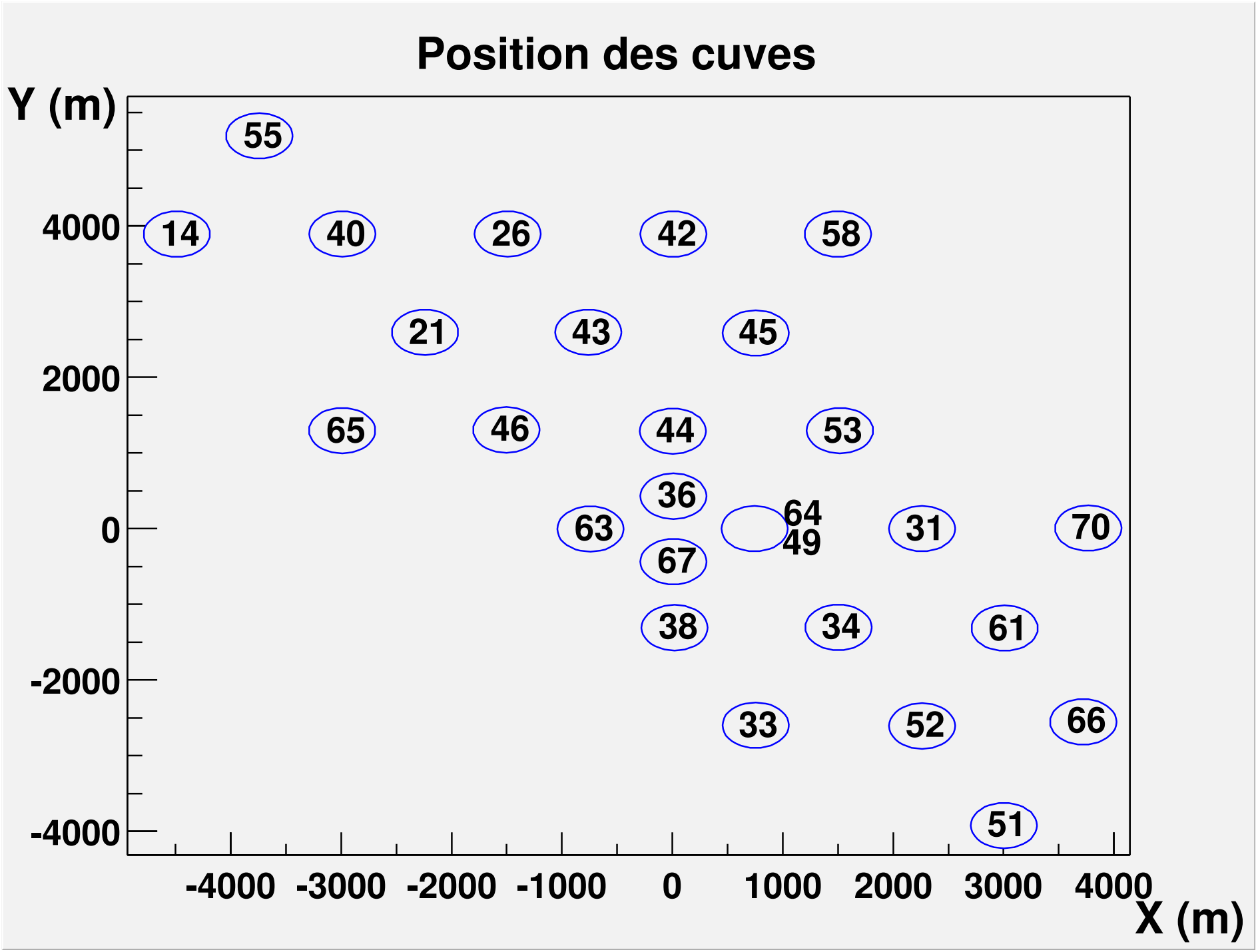
- acquisition en dents de scie depuis juillet 2001
- environ 1 Gb au total (pour ~ 30 cuves)
- tri des événements et reconstruction



- nombre total d'événements : 96 666
- Carmen-Miranda : 31 835
- événements à au moins 3 cuves : 43 759
- random : 10 536
- événements reconstruits : 3 636
- candidats : 423

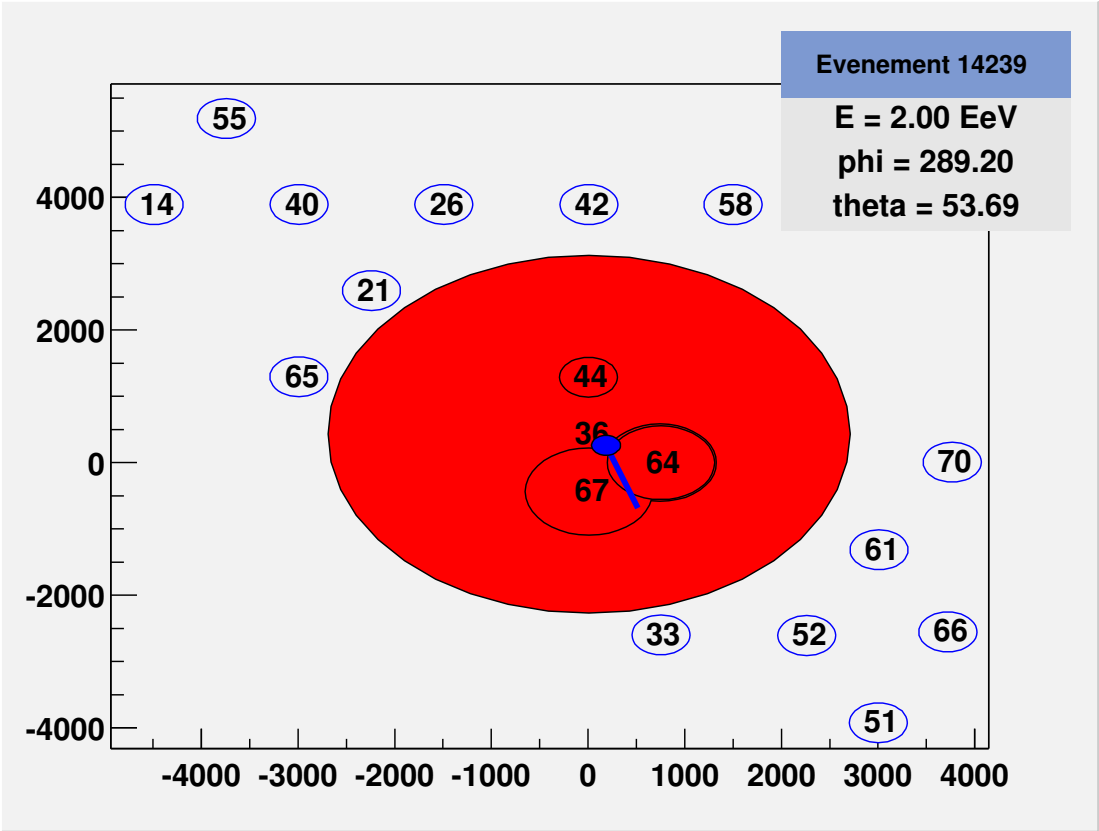
(274 à 3 cuves, 122 à 4, 18 à 5,

3 à 6, 2 à 7, 3 à 8 et 1 à 11)

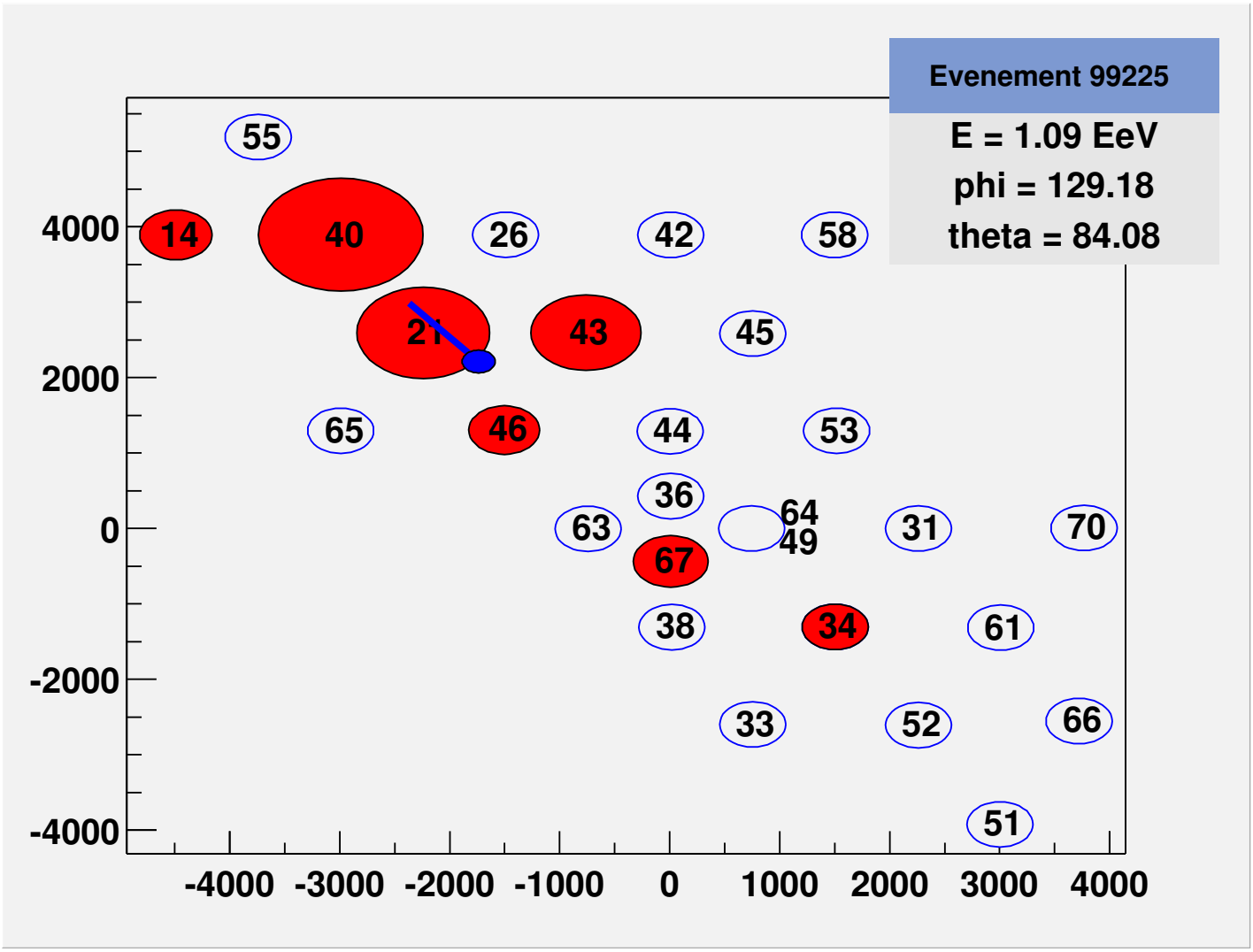

Position des cuves
Y (m)
X (m)
55
14
40
26
42
58
21
43
45
65
46
44
53
36
63
64
49
31
70
67
38
34
61
33
52
66
51
4000
2000
0
-2000
-4000
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
2000
3000
4000

Premier événement à 5 cuves

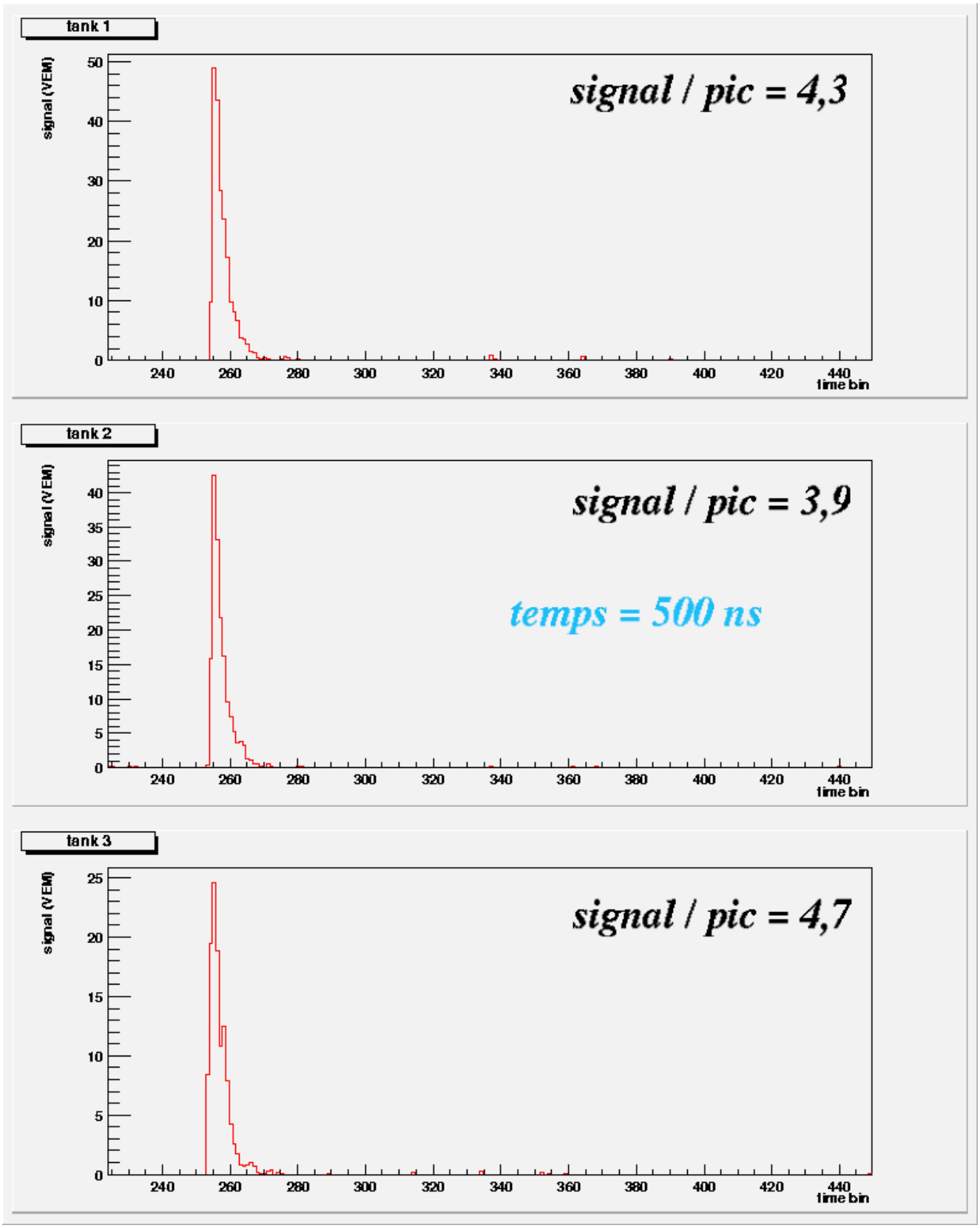
- cuves touchées : LSid = 49 44 36 67 64
- seconde = 682223609
- temps = 0.473562106 0.473566114 0.473563745 0.473561729 0.473562128
- signaux = 125 33 2683 159 113
- position du cœur : $X = 146$ m, $Y = 249$ m
- $\theta = 53°, \quad \phi = 289°$
- $E \sim 2$ EeV

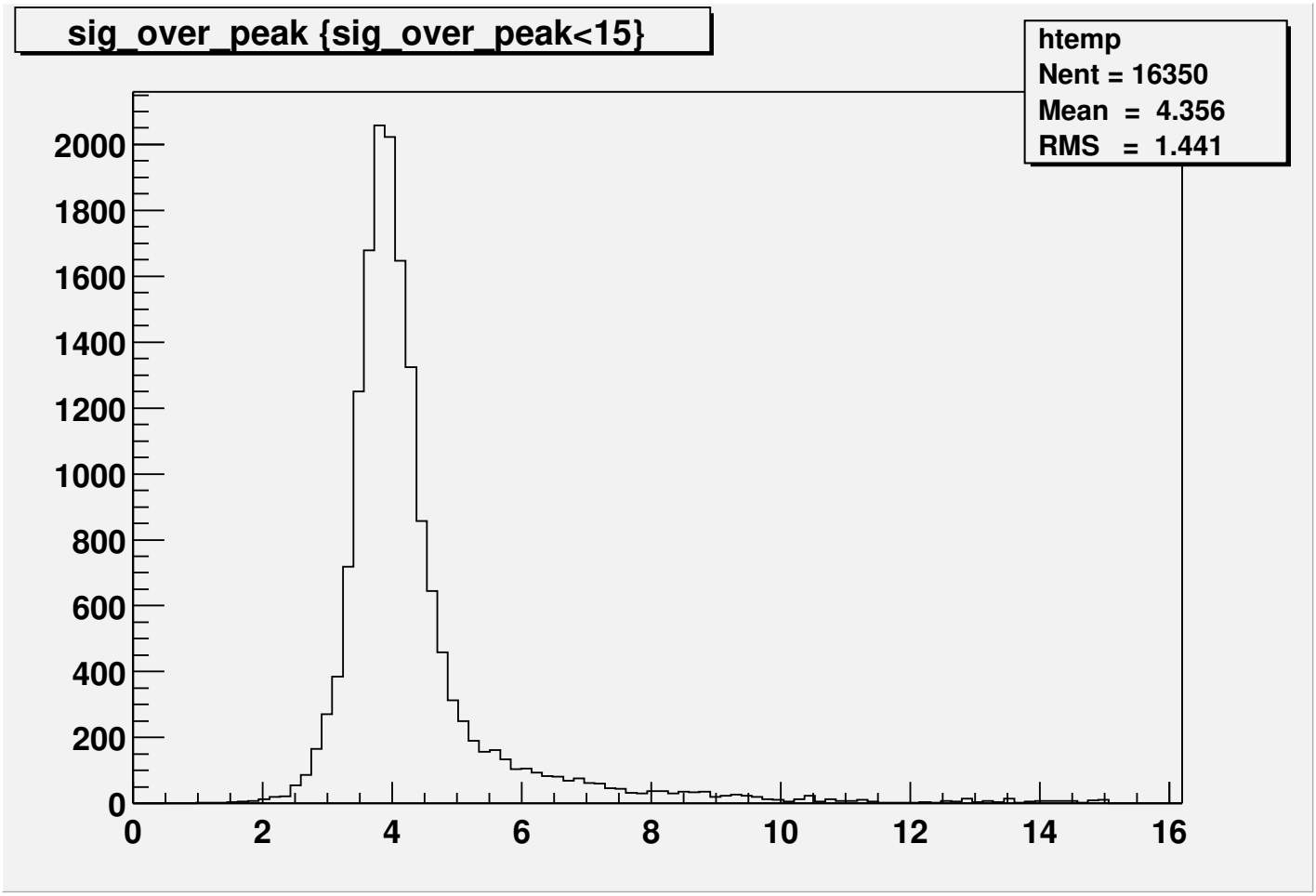


Record : événement à 7 cuves
6 janvier 2002

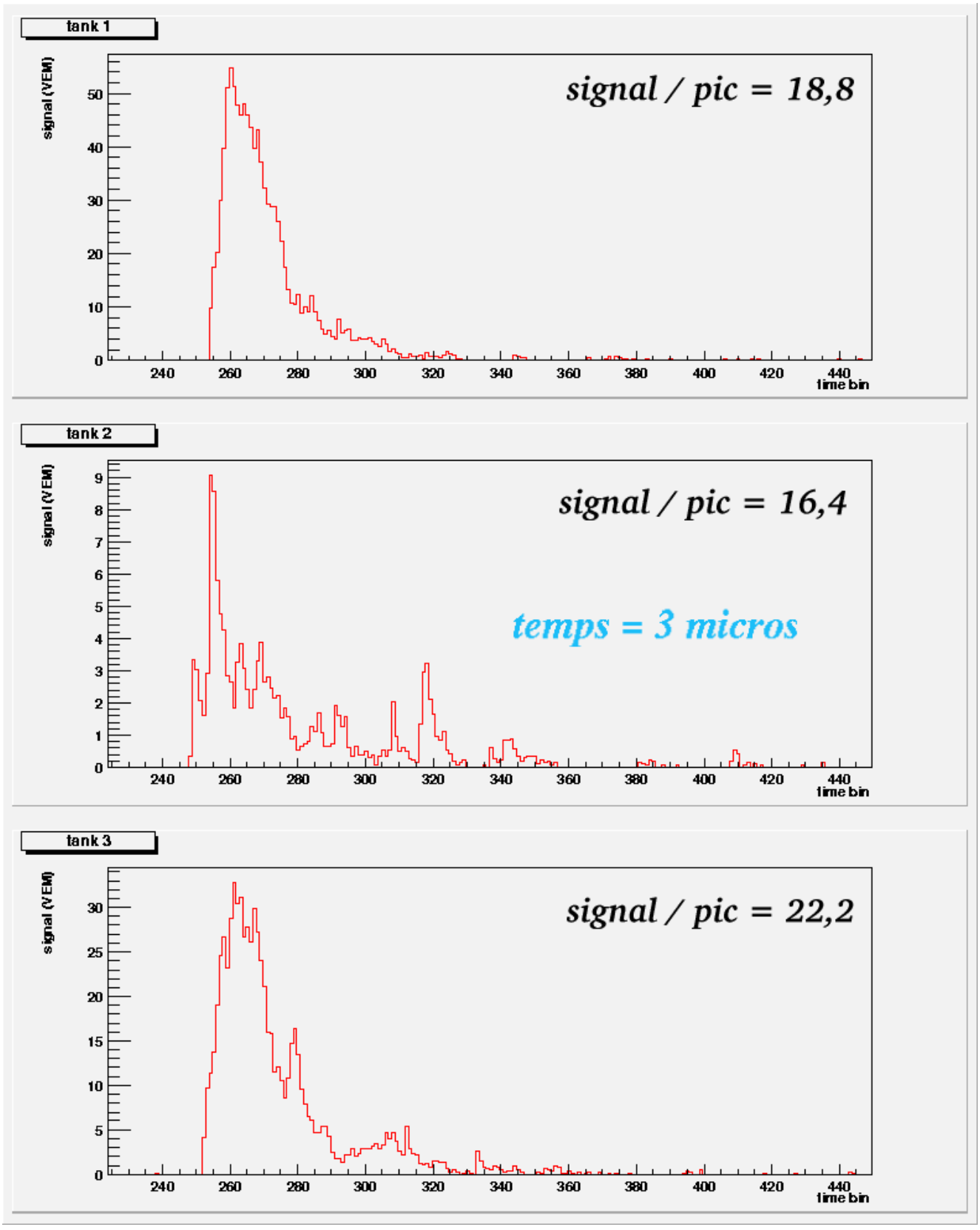


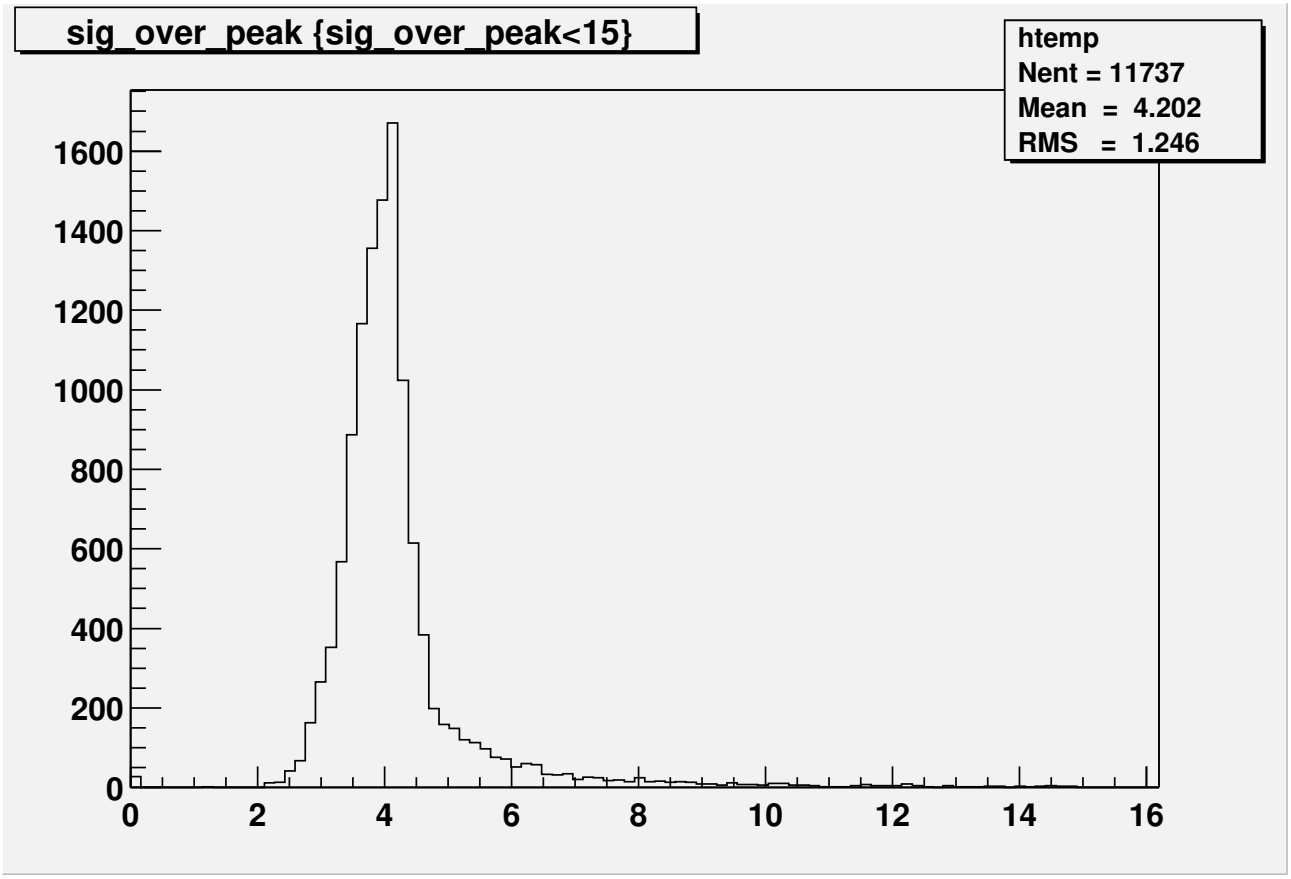
Coïncidence aléatoire de 3 cuves

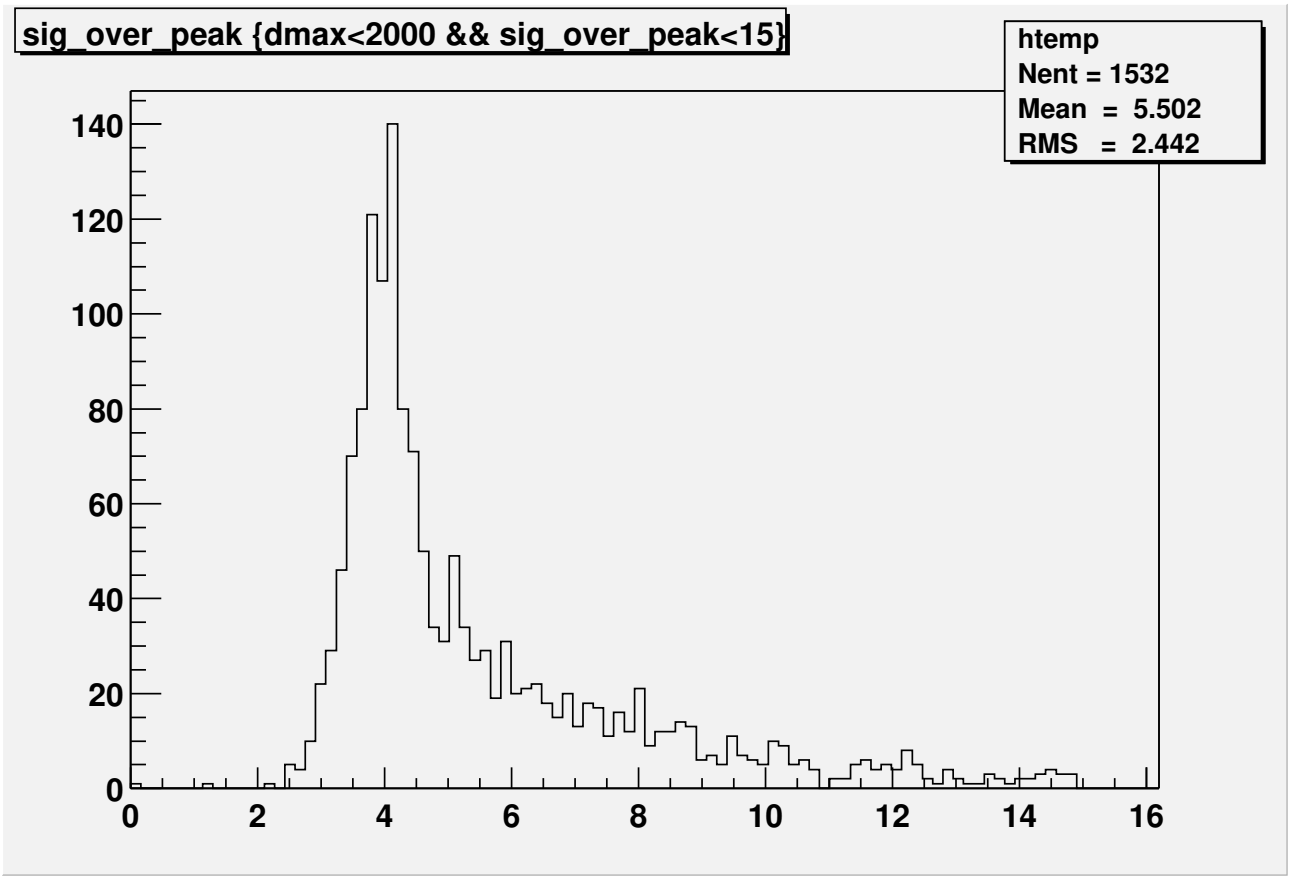


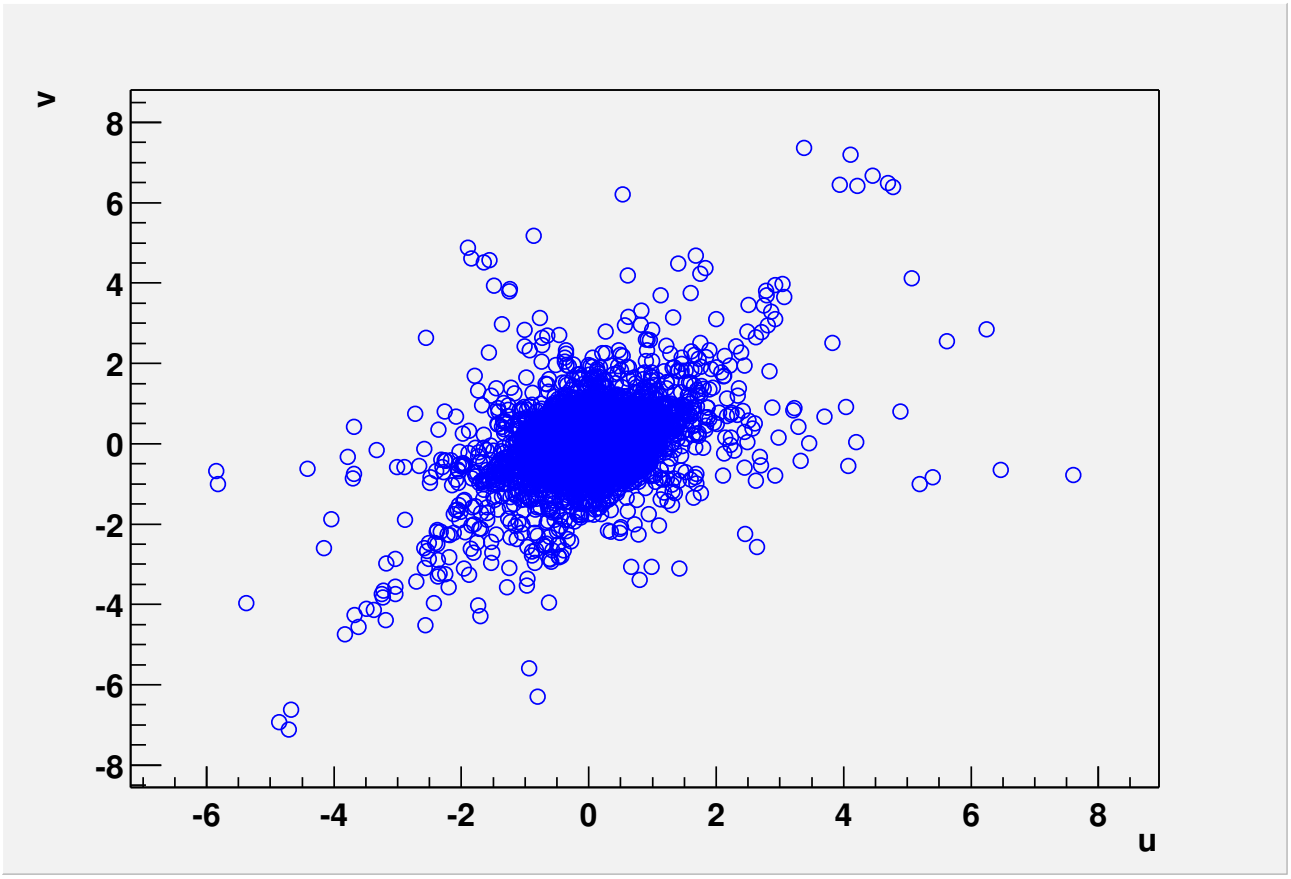

sig_over_peak {sig_over_peak<15}
htemp
Nent = 16350
Mean = 4.356
RMS = 1.441
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16

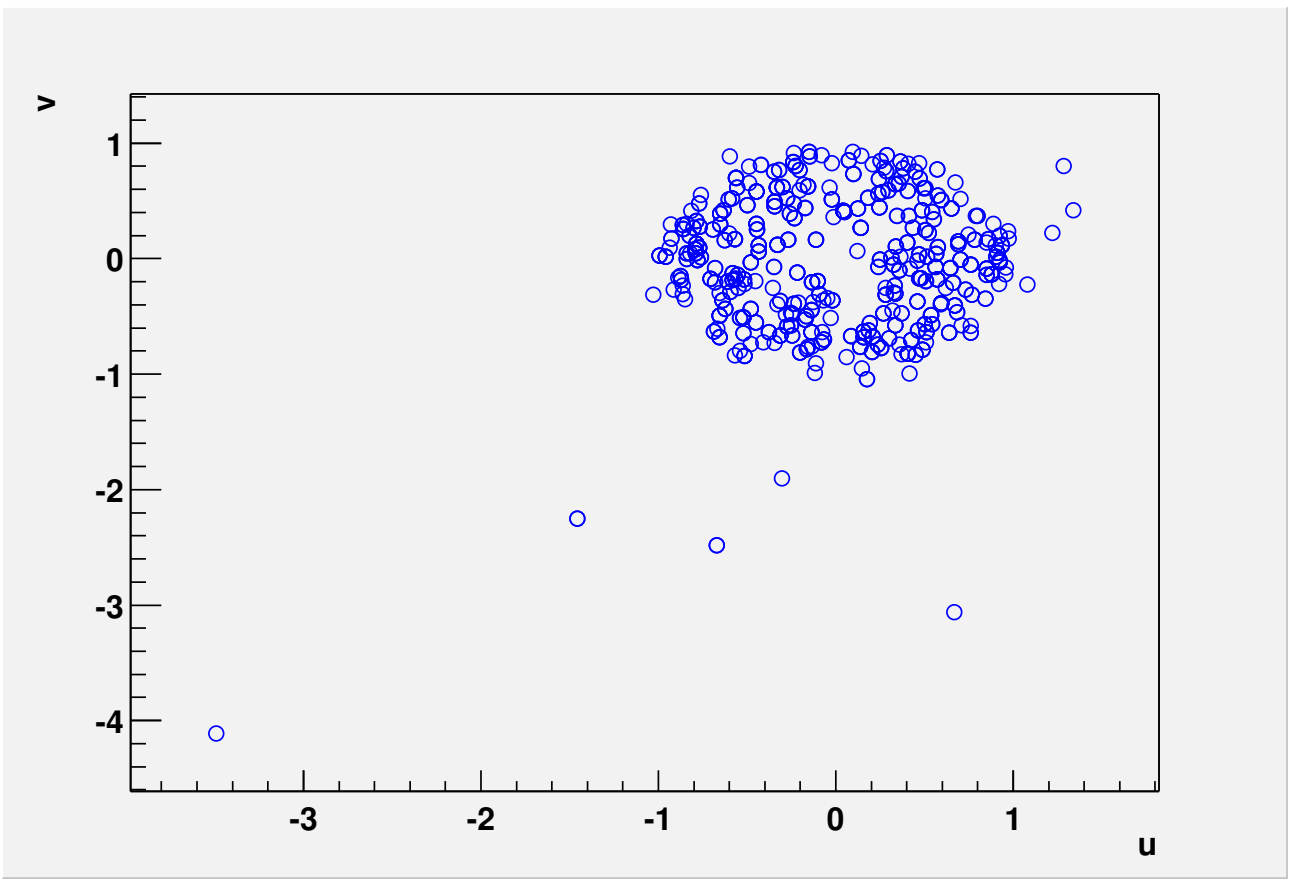
Evt 22474, 6 EeV, $\theta = 10°, \phi = 325°$

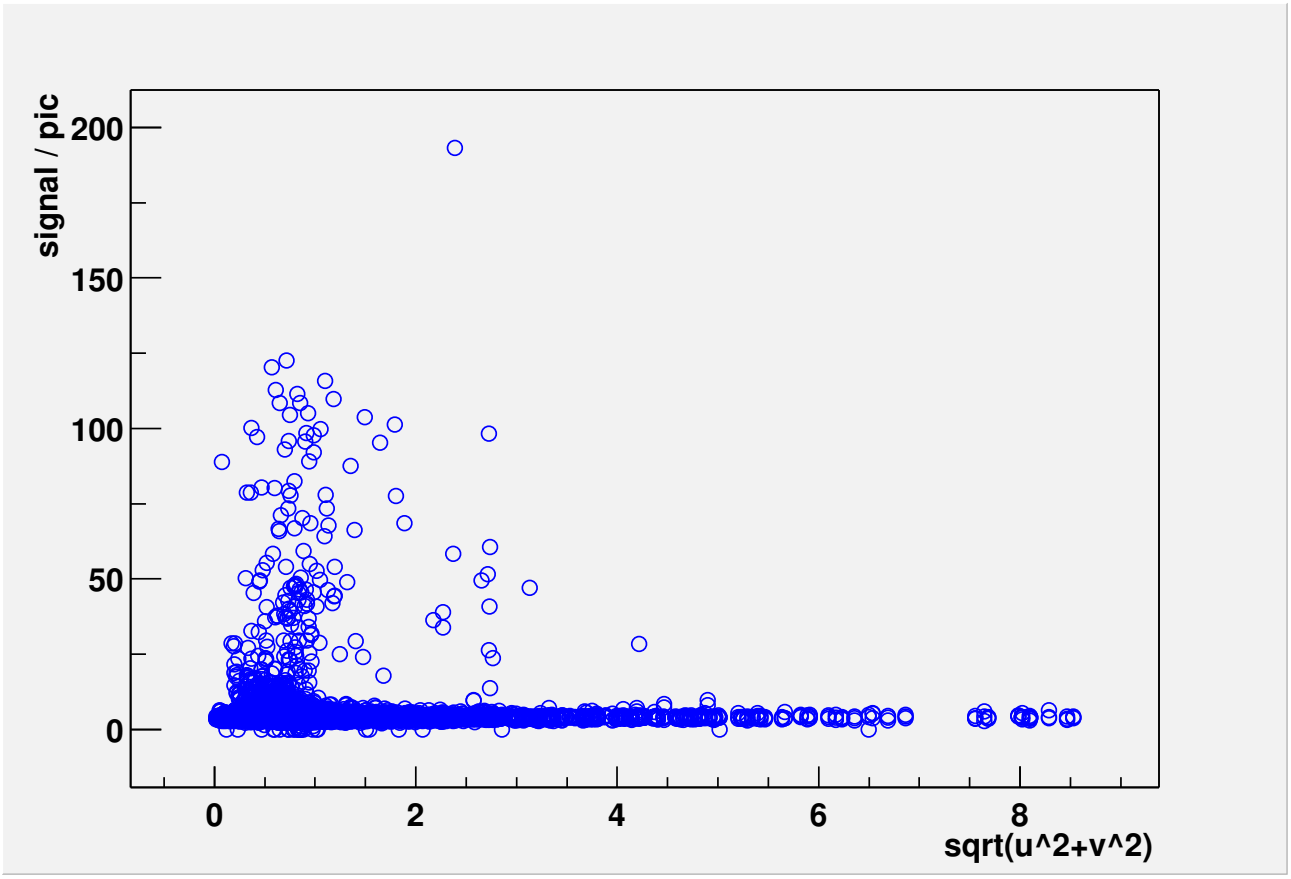


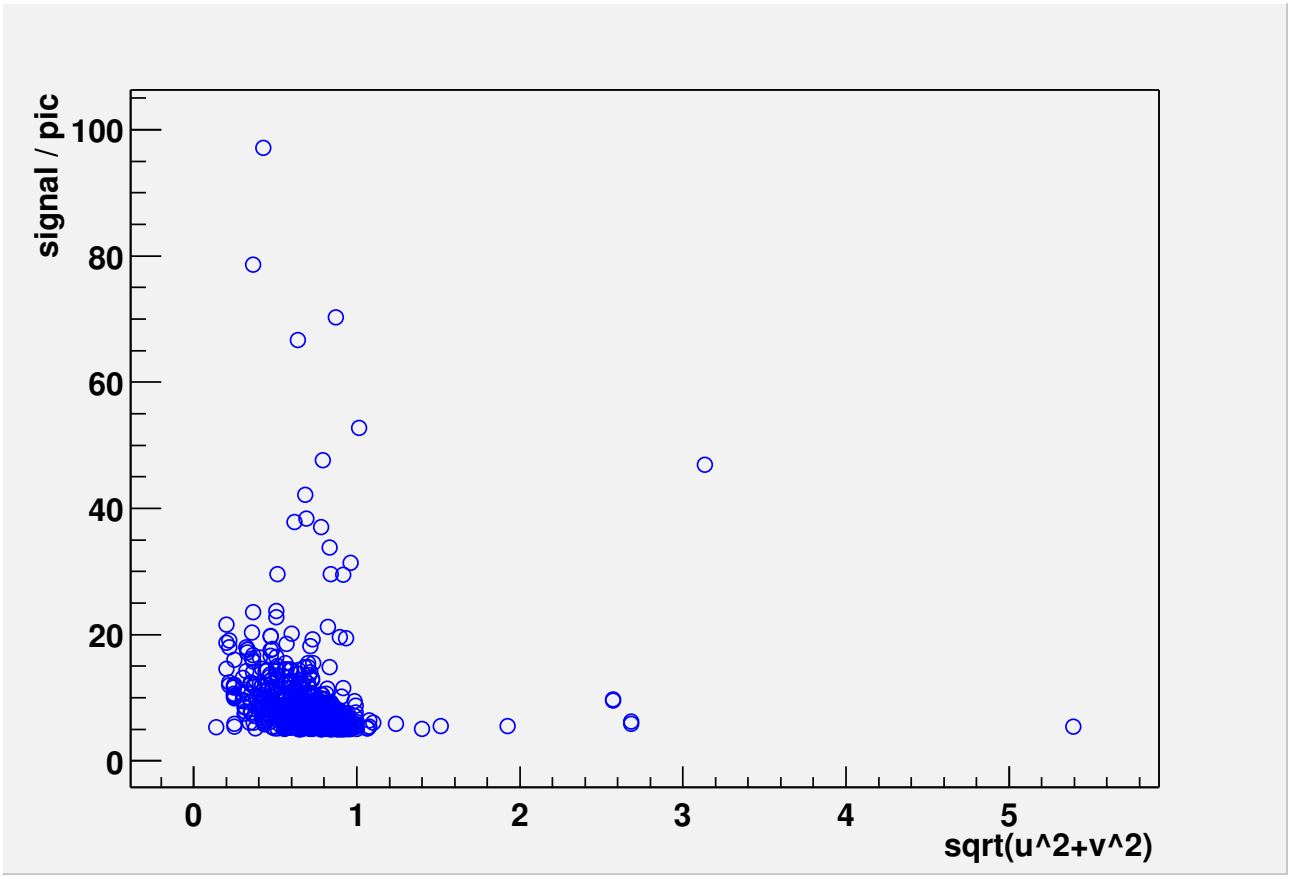

sig_over_peak {sig_over_peak<15}
htemp
Nent = 11737
Mean = 4.202
RMS = 1.246
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16

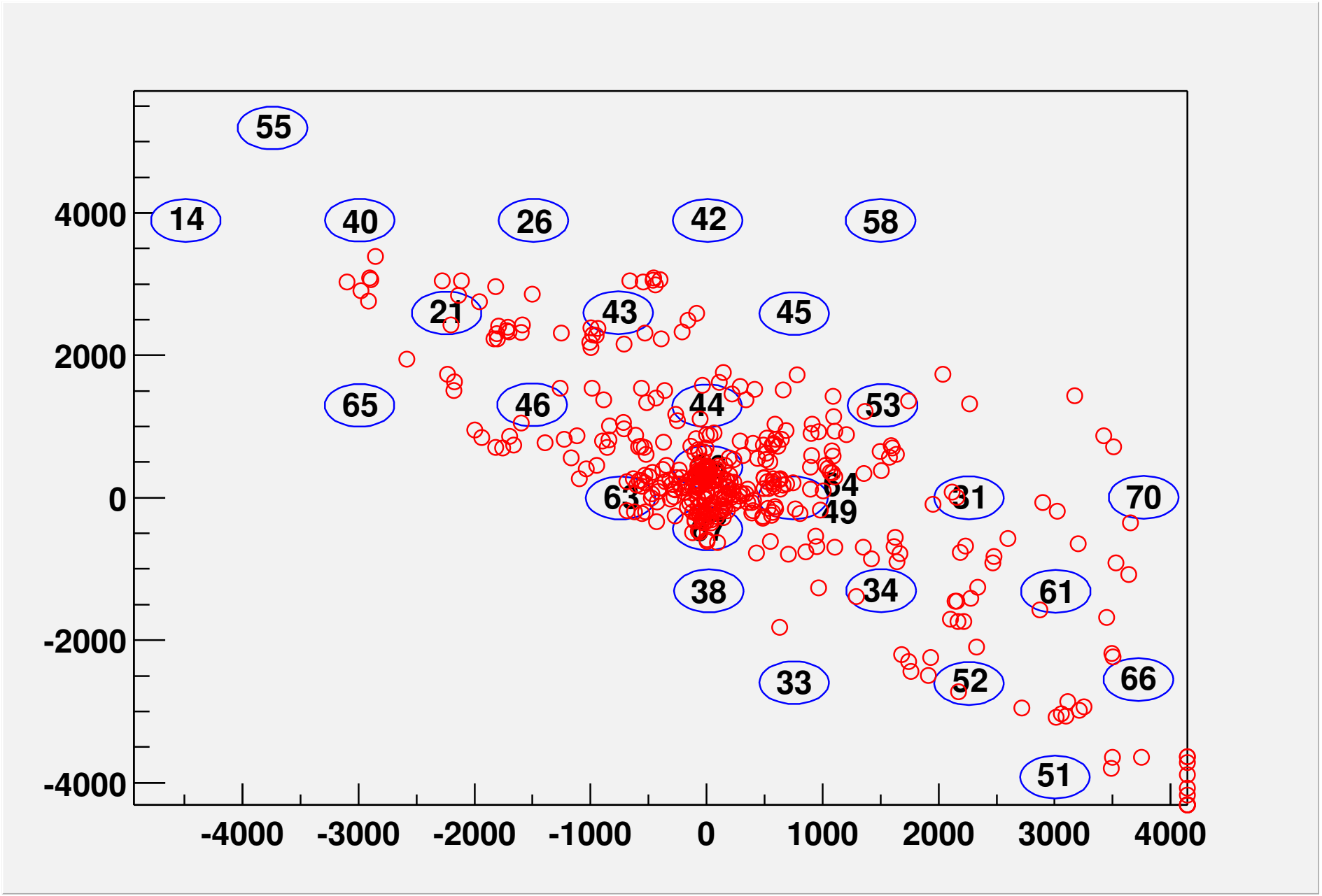

sig_over_peak {dmax<2000 && sig_over_peak<15}
htemp
Nent = 1532
Mean = 5.502
RMS = 2.442
140
120
100
80
60
40
20
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16

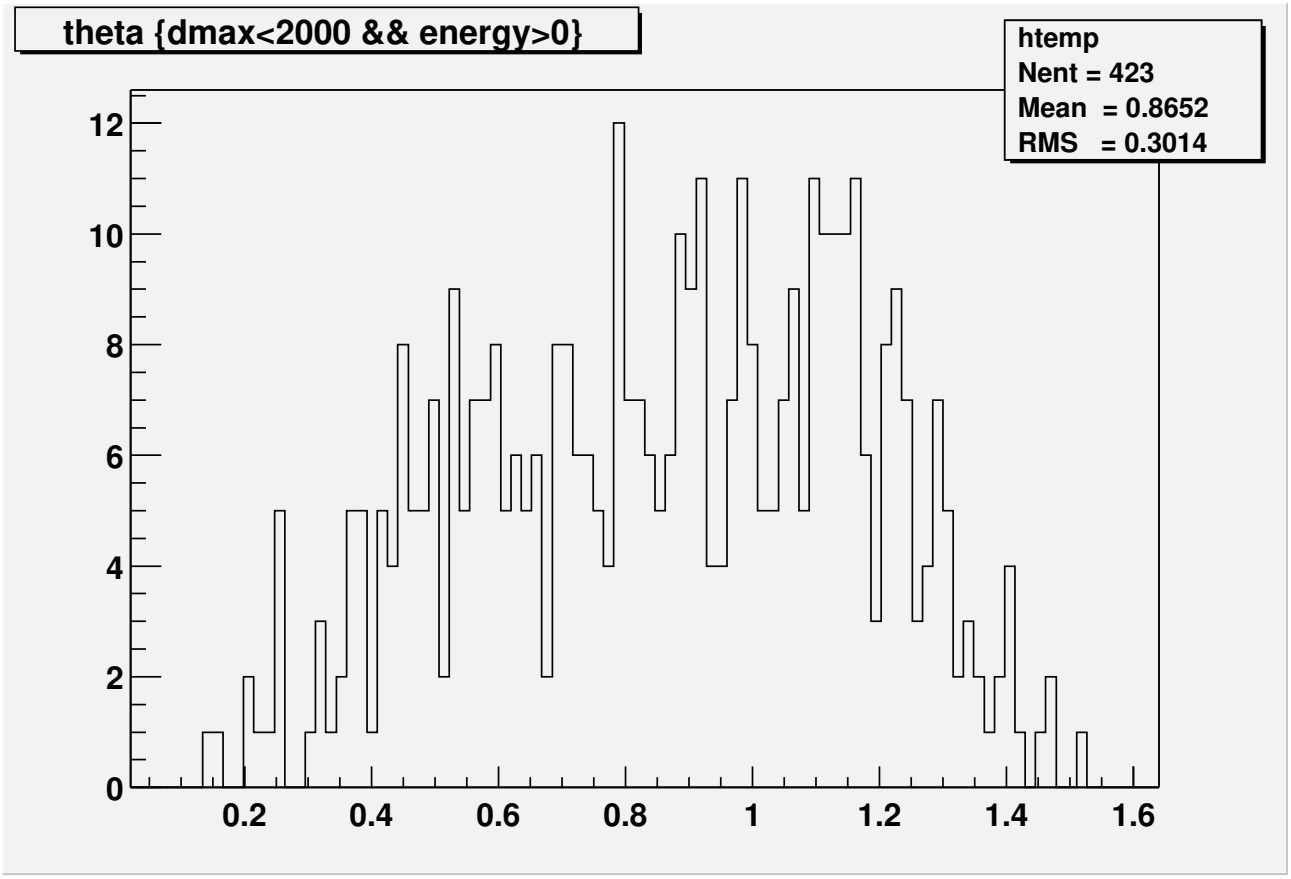

v
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
u

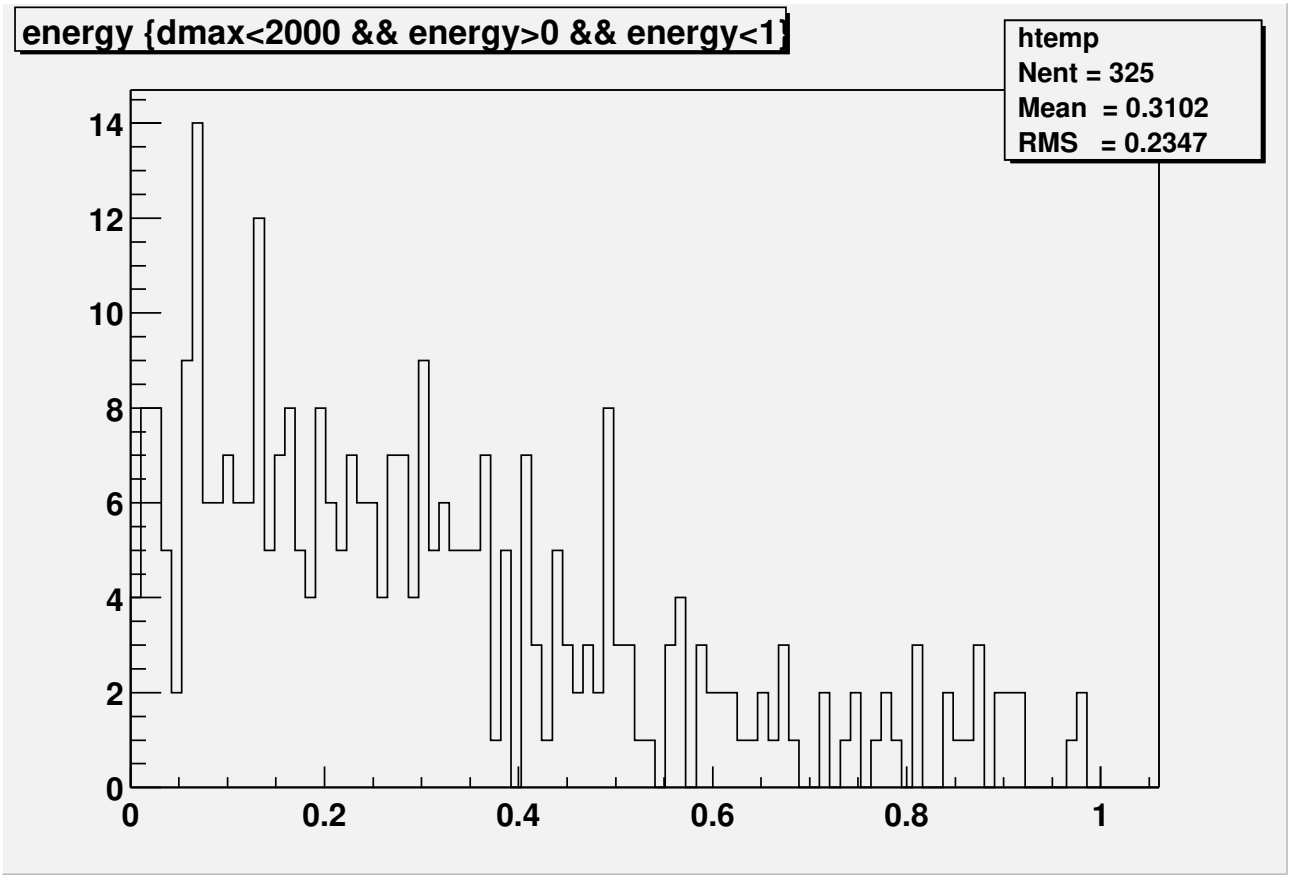

v
1
0
-1
-2
-3
-4
-3
-2
-1
0
1
u

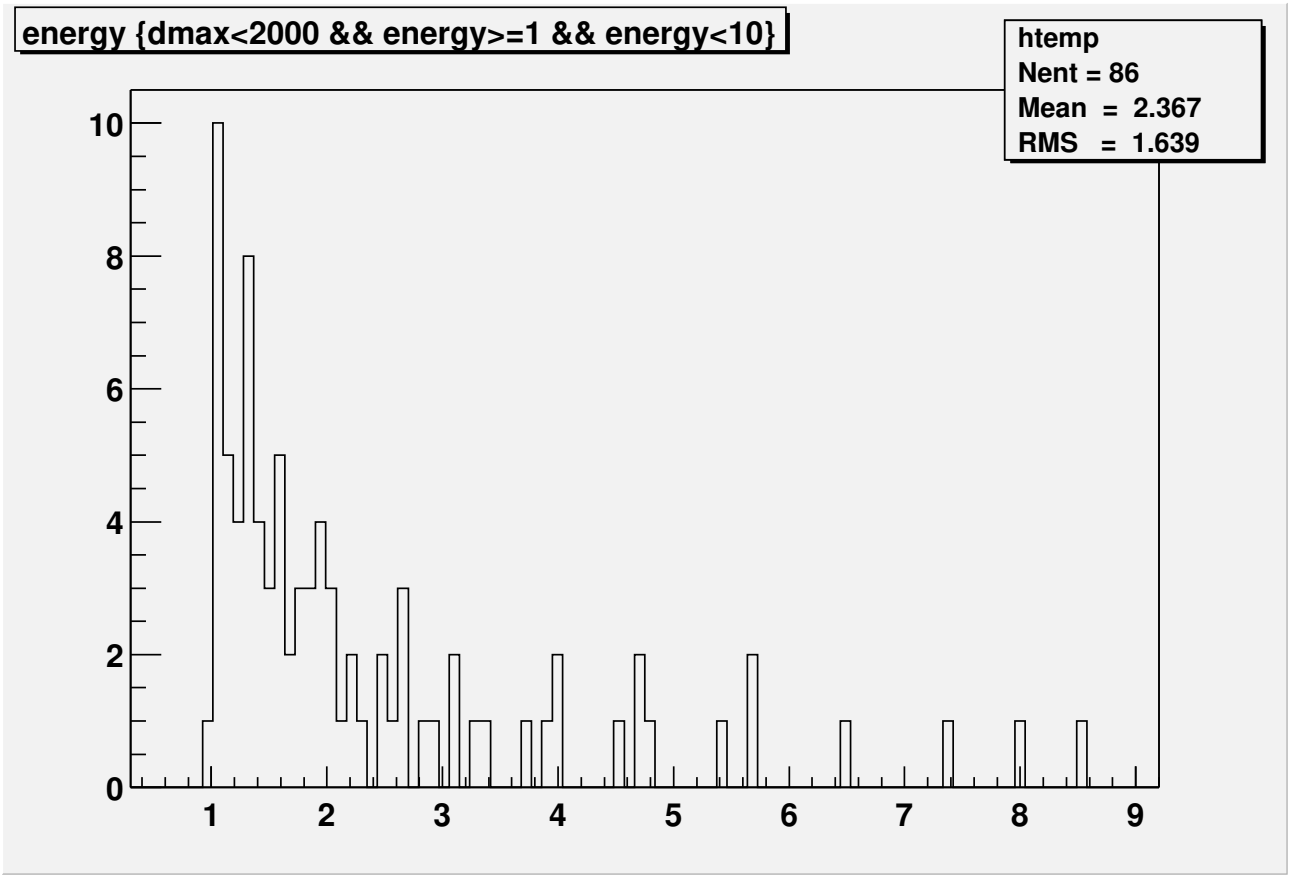

signal / pic
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
sqrt(u^2+v^2)

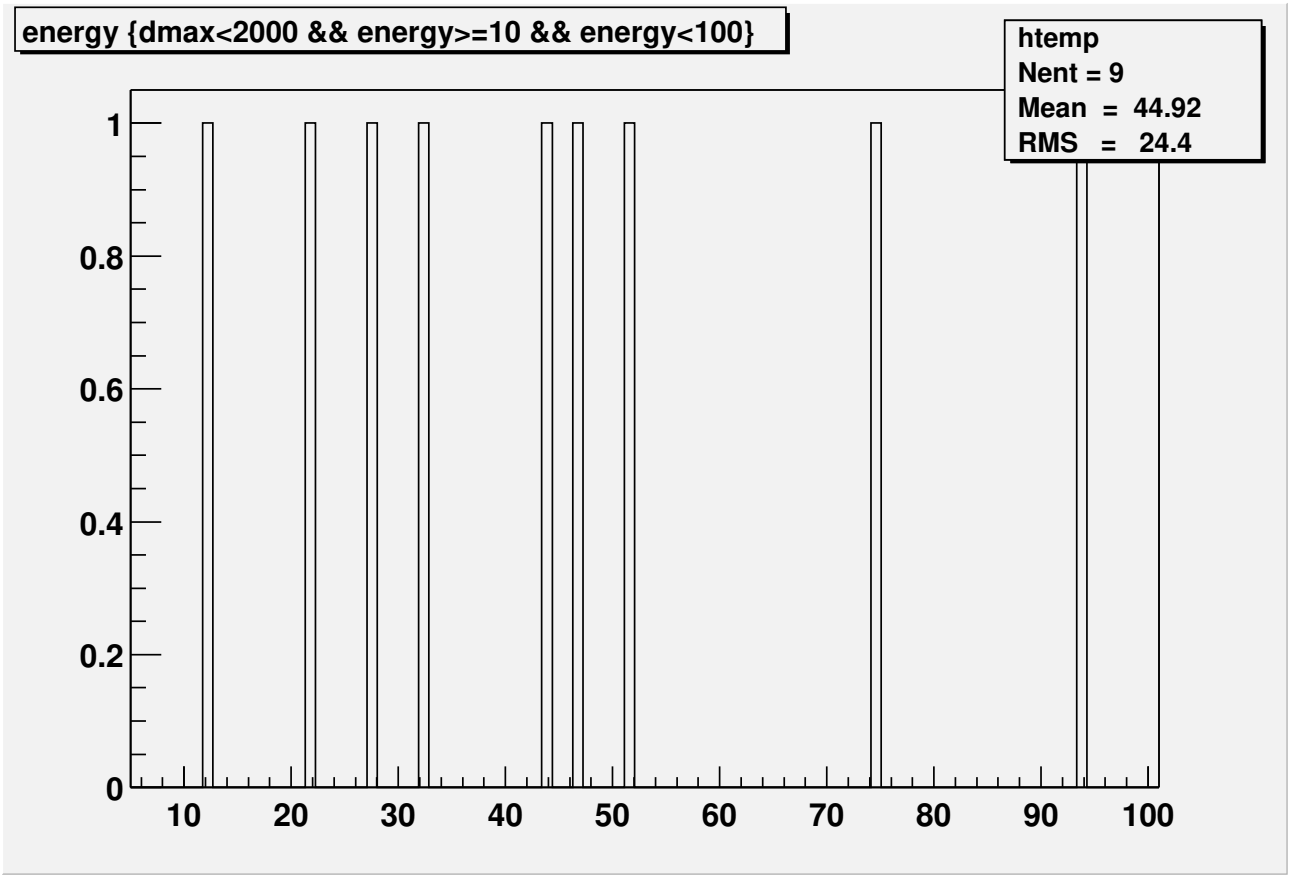

signal / pic
100
80
60
40
20
0
0
1
2
3
4
5
sqrt(u^2+v^2)


55
14
40
26
42
58
21
43
45
65
46
44
53
63
64
49
31
70
38
34
61
33
52
66
51
4000
2000
0
-2000
-4000
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
2000
3000
4000

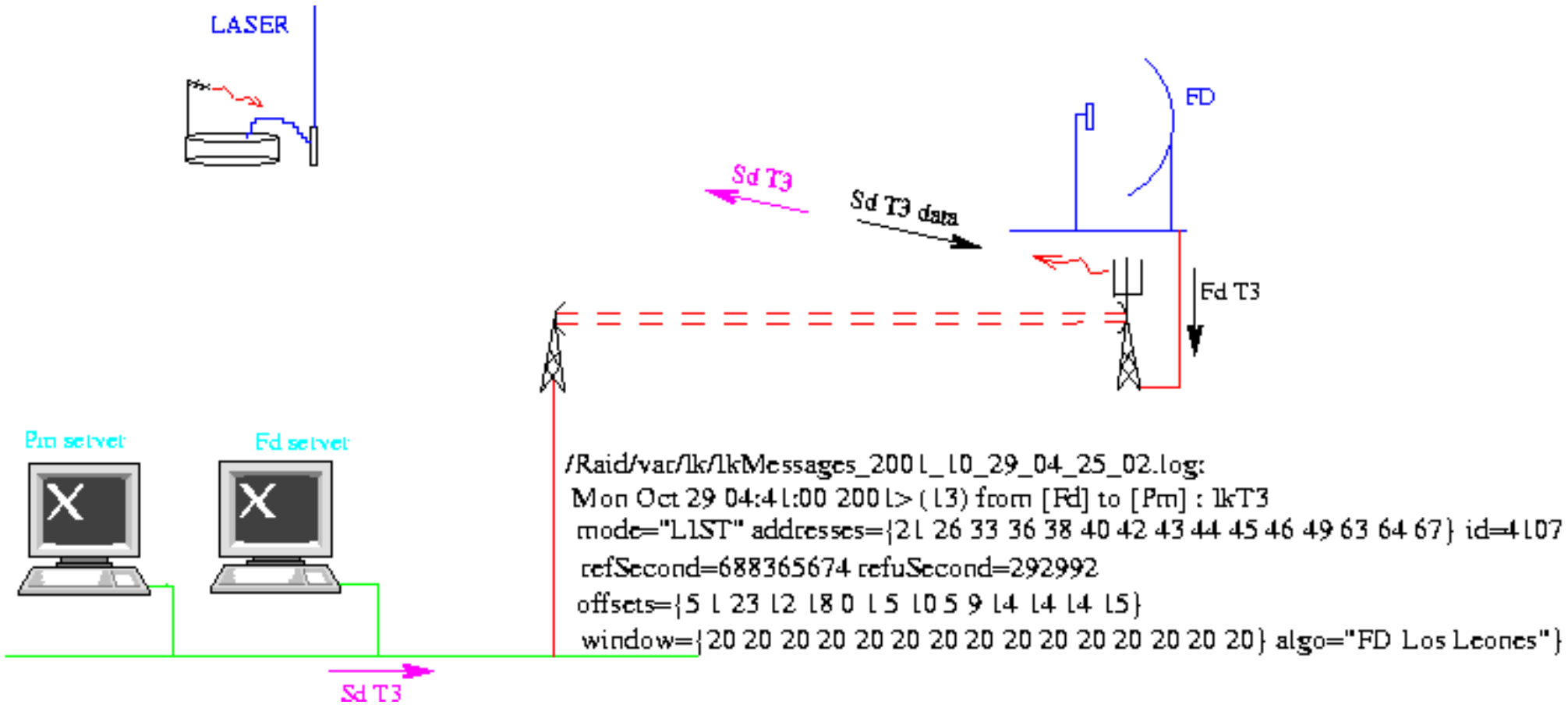

theta {dmax<2000 && energy>0}
htemp
Nent = 423
Mean = 0.8652
RMS = 0.3014
0
2
4
6
8
10
12
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6


energy {dmax<2000 && energy>0 && energy<1}
htemp
Nent = 325
Mean = 0.3102
RMS = 0.2347
0
2
4
6
8
10
12
14
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1

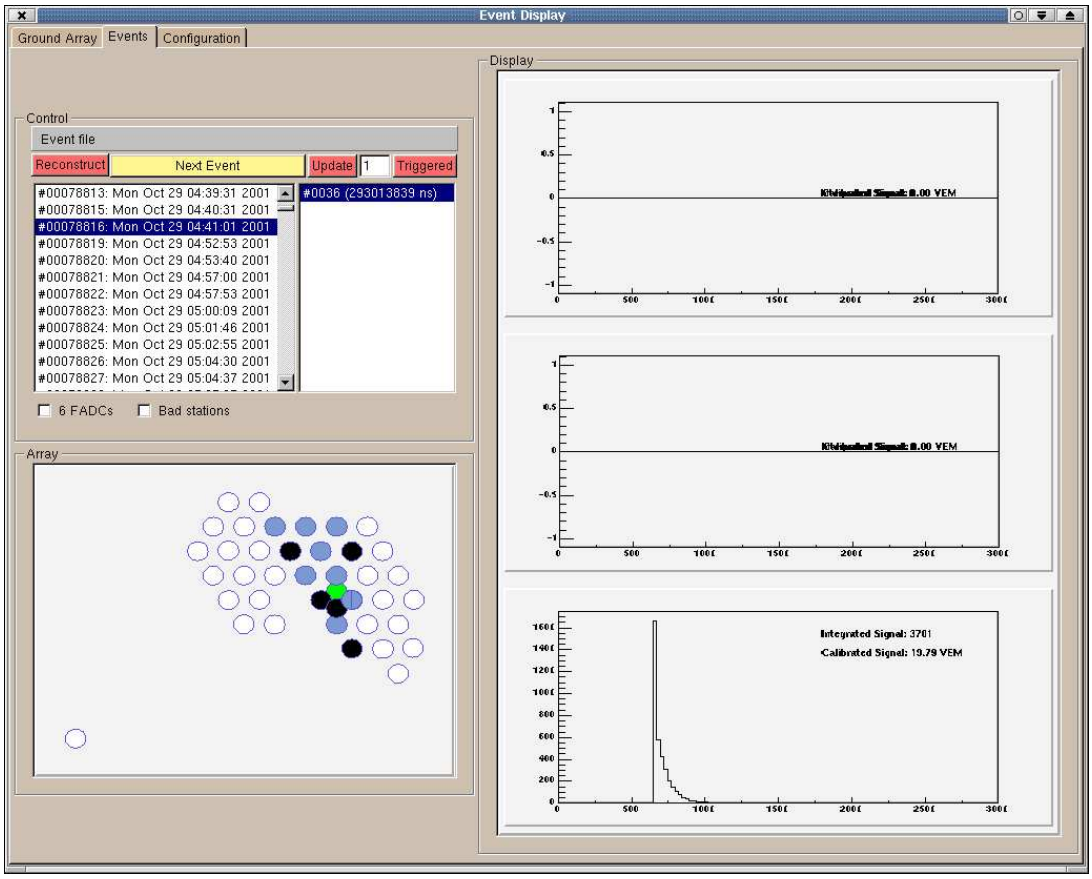

energy {dmax<2000 && energy>=1 && energy<10}
htemp
Nent = 86
Mean = 2.367
RMS = 1.639
0
2
4
6
8
10
1
2
3
4
5
6
7
8
9

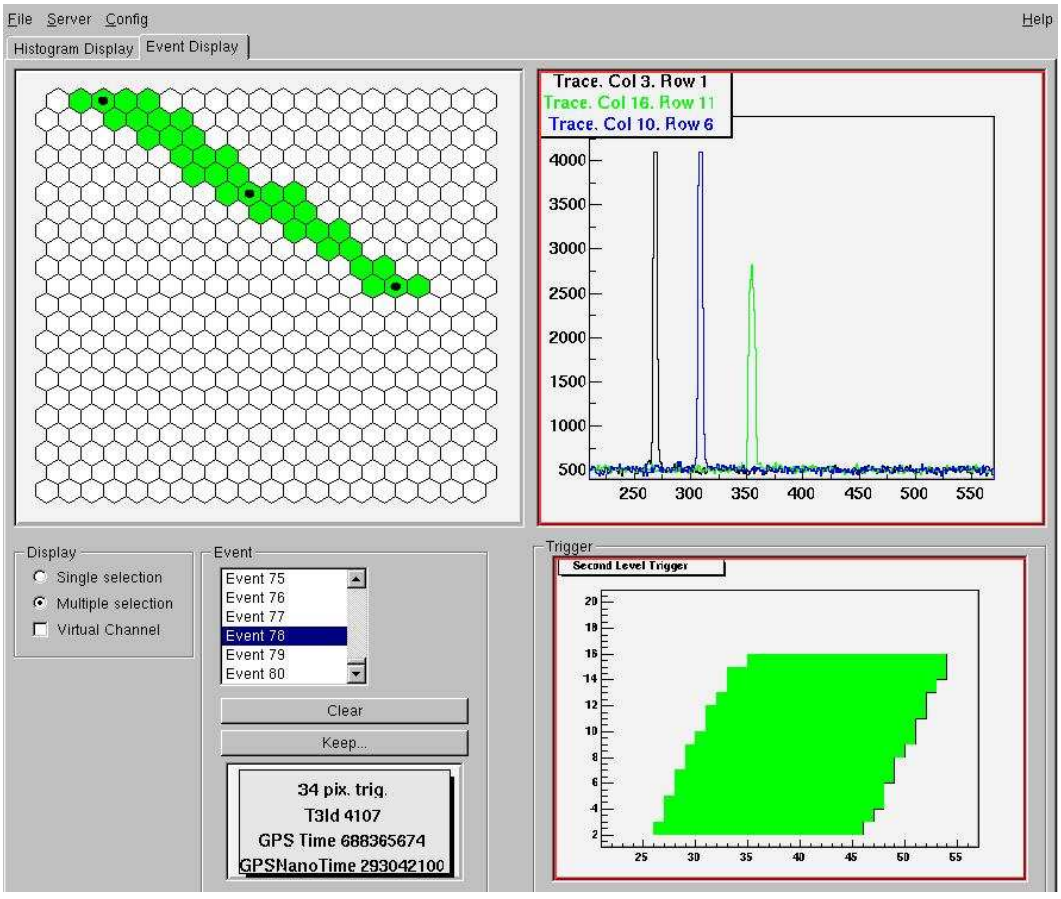

energy {dmax<2000 && energy>=10 && energy<100}
htemp
Nent = 9
Mean = 44.92
RMS = 24.4
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

Premier événement (artificiel) hybride

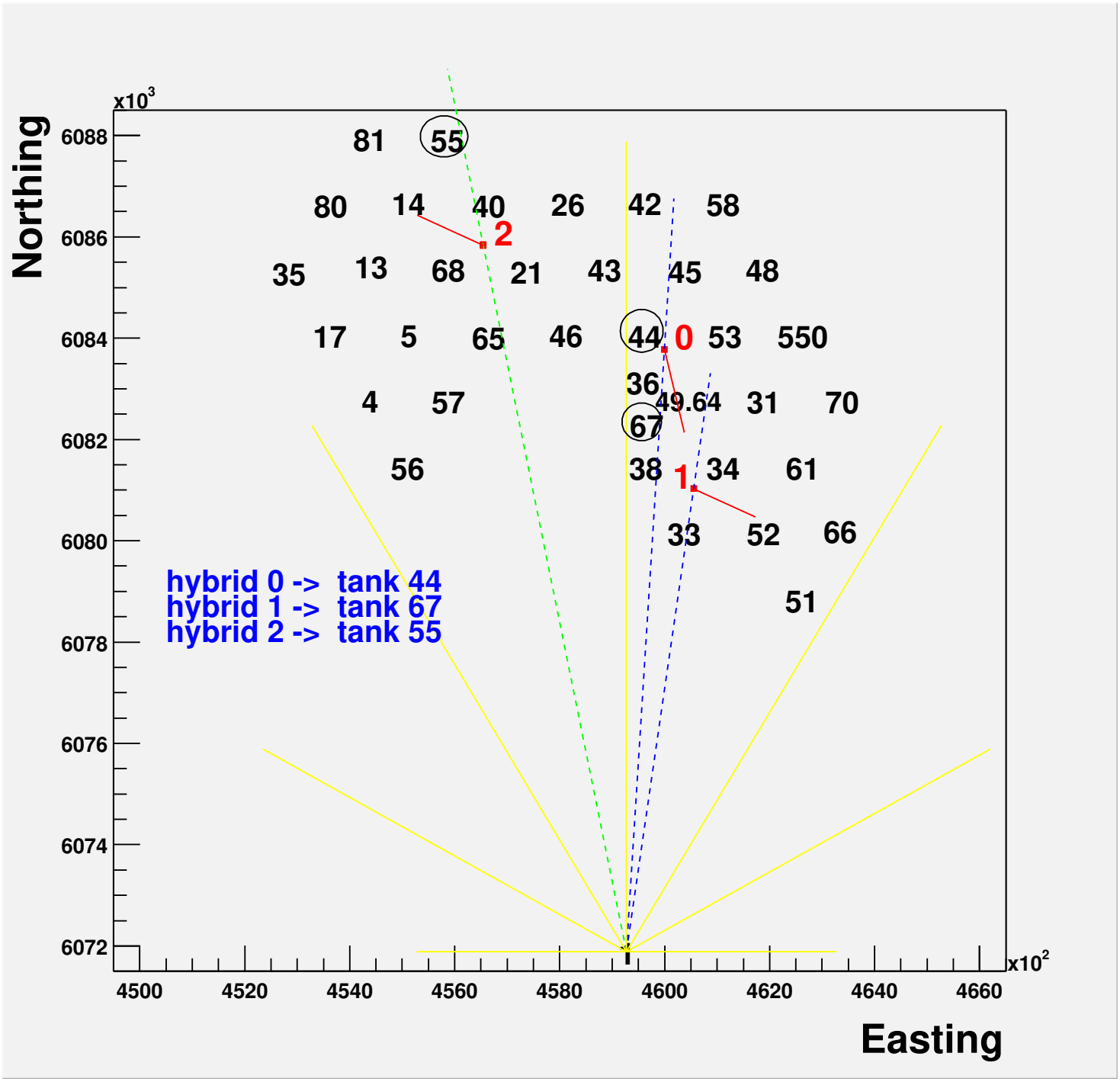


Premier événement (artificiel) hybride

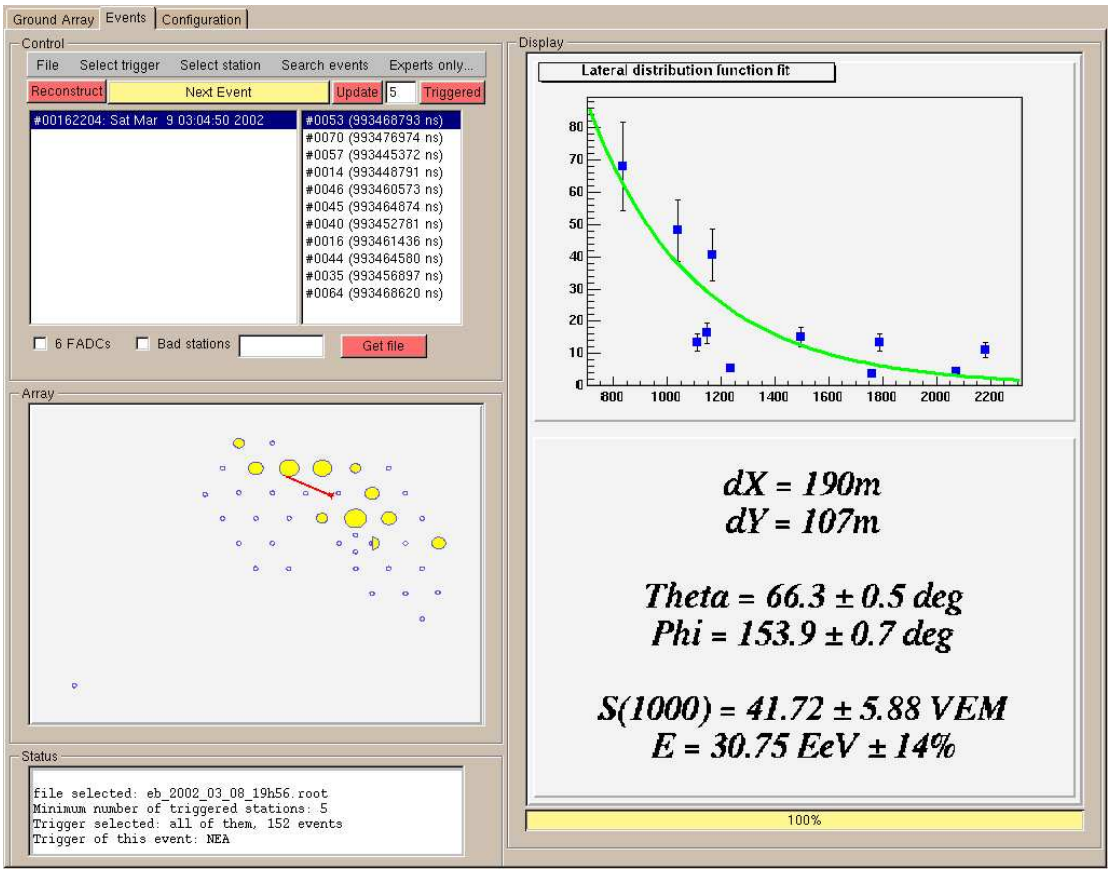


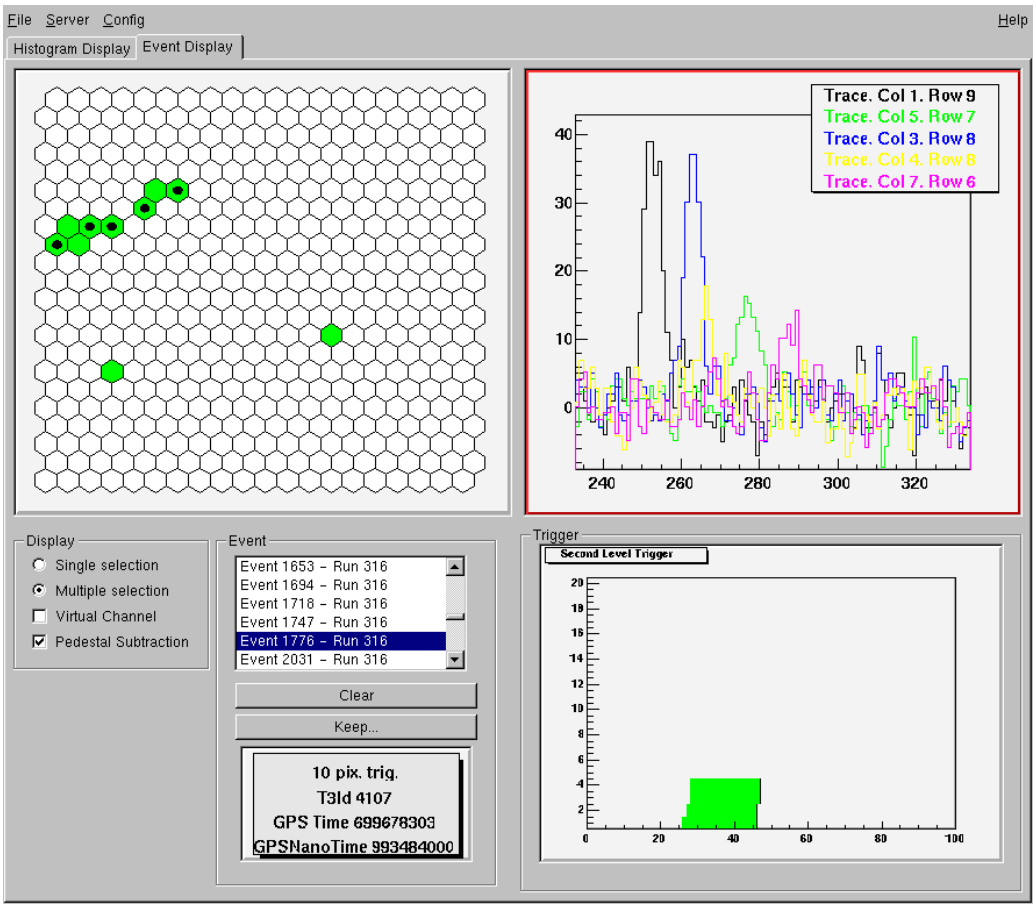


Premiers événements hybrides (9/12)



Événement hybride à 11 cuves !





Caractéristiques et performances

- (SD) ouverture de $7\,350$ km^2.sr pour $\theta \leqslant 60^\circ$
- (SD) efficacité de détection de 1 au-delà de 10^{19} eV
- (SD) résolution en énergie autour de 10% ($E \geqslant 10^{19}$ eV)

Précisions (SD seul)

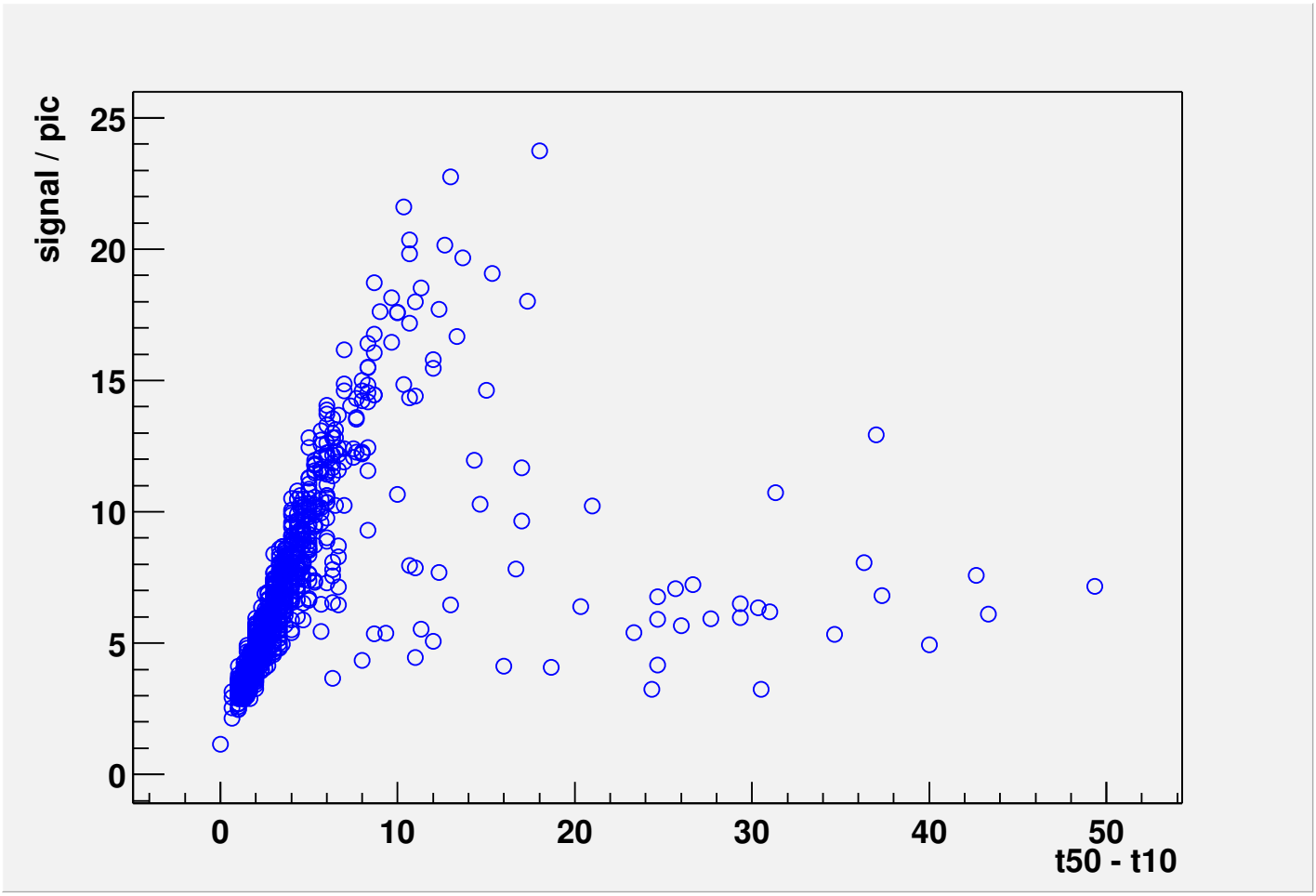
θ (deg)	$\delta\theta_{\text{photon}}$ (deg)	$\delta\theta_{\text{proton}}$ (deg)
20	1.1	0.6
40	0.6	0.5
60	0.4	0.3
80	0.3	0.2

- on attend ~ 30 événements par an ($\geqslant 10^{20}$ eV)
- (FD+SD) erreur sur $X_{\text{max}} \sim 25 - 30$ g.cm^{-2}

Conclusions

- le réseau test est terminé (30 cuves, pas d'autres protos)
- démarrage de la phase de préproduction (100 cartes unifiées d'ici fin juin 2002)
- fluorescence : 2 baies complètes sur 6 dans le premier bâtiment. Les fondations du second bâtiment sont terminées ; fin prévue fin de l'été
- test hybride : ok !
- ~ 30 événements hybrides dont 3 à 2 cuves
- ~ 10 événements hybrides à 2 T3 !! (au moins 4 cuves)
- l'étude des premières données, bien que peu précise, montre que le réseau de surface voit des événements

Auger, c'est parti !!!


signal / pic
25
20
15
10
5
0
0
10
20
30
40
50
t50 - t10