PIERRE AUGER OBSERVATORY

Les rayons cosmiques d’énergie extrême

Benoît Revenu, PCC Collège de France

Plan

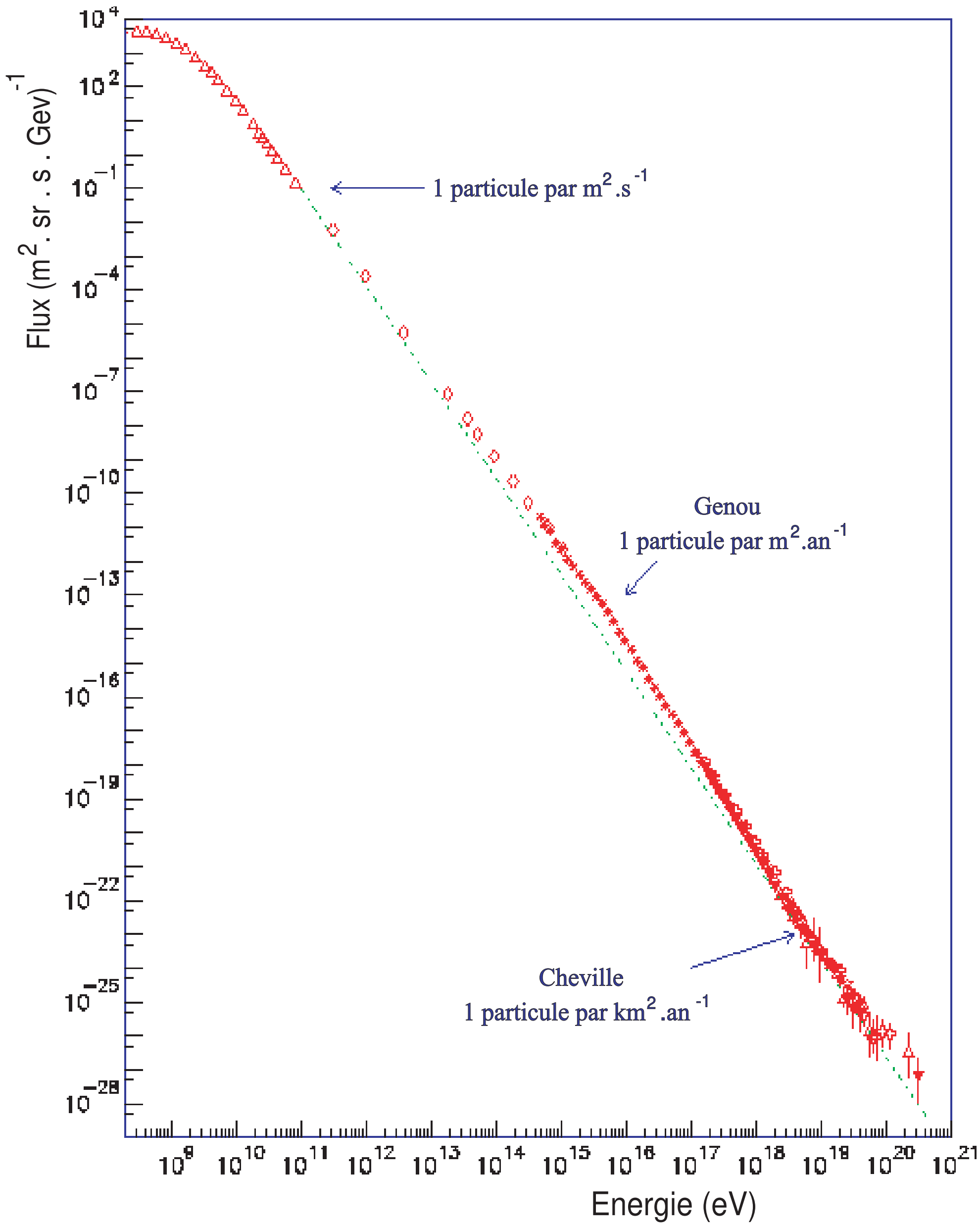
1. Présentation des rayons cosmiques
   (a) propriétés générales
   (b) état des lieux de nos connaissances

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

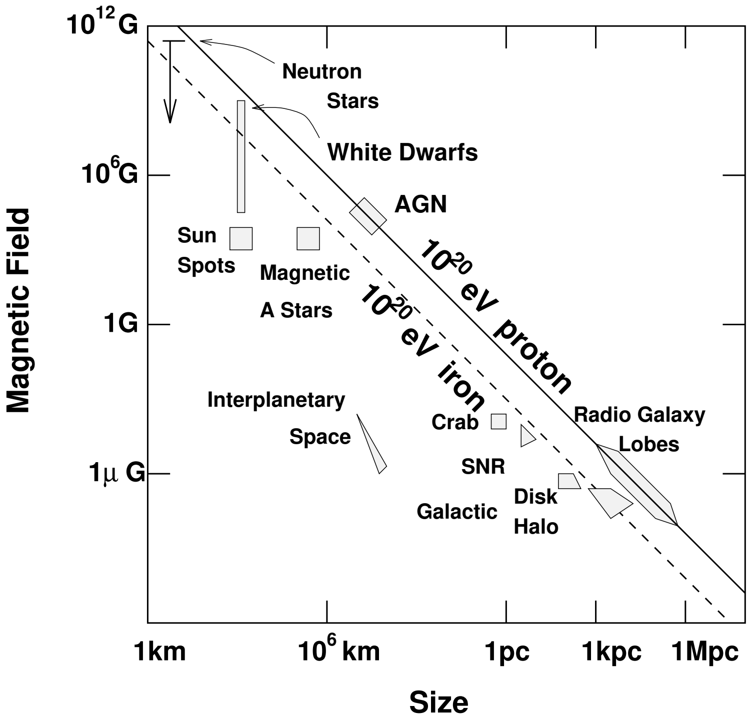
2. régulier sur 12 ordres de grandeur en énergie

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 E et B (étoiles à neutrons, trous noirs, champs en mouvements...) $E = ZBL$



- déviation faible dans les champs magnétiques

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

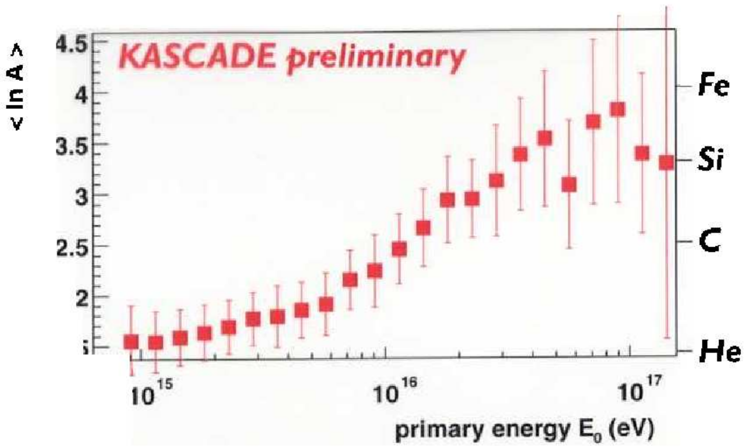
$$\theta(E,d) \sim 0.8^\circ Ze \left(\frac{E}{10^{20}\text{ eV}}\right)^{-1} \left(\frac{d}{10\text{ Mpc}}\right)^{1/2} \left(\frac{\ell_c}{1\text{ Mpc}}\right)^{1/2} \left(\frac{B_\perp}{10^{-9}\text{ G}}\right)$$

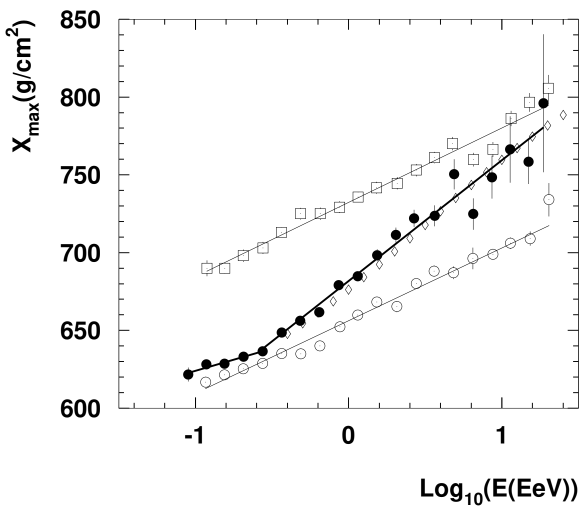
$$\tau(E,d) \sim 1.5 \times 10^3 q^2 \left(\frac{E}{10^{20}\text{ eV}}\right)^{-2} \left(\frac{d}{10\text{ Mpc}}\right)^{2} \left(\frac{\ell_c}{1\text{ Mpc}}\right) \left(\frac{B_\perp}{10^{-9}\text{ G}}\right) \text{ ans}$$

mais les champs magnétiques sont mal connus

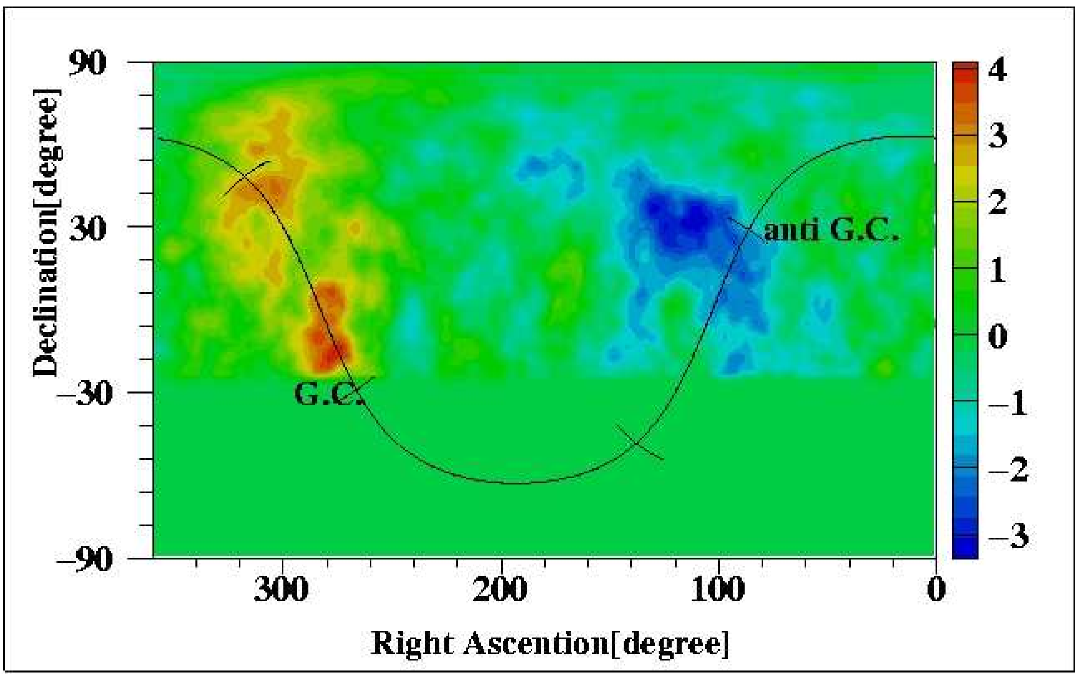
État des lieux (2)

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





- provenance des RC ($10^{17} - 10^{18}$ eV) : galactique (4 σ)



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

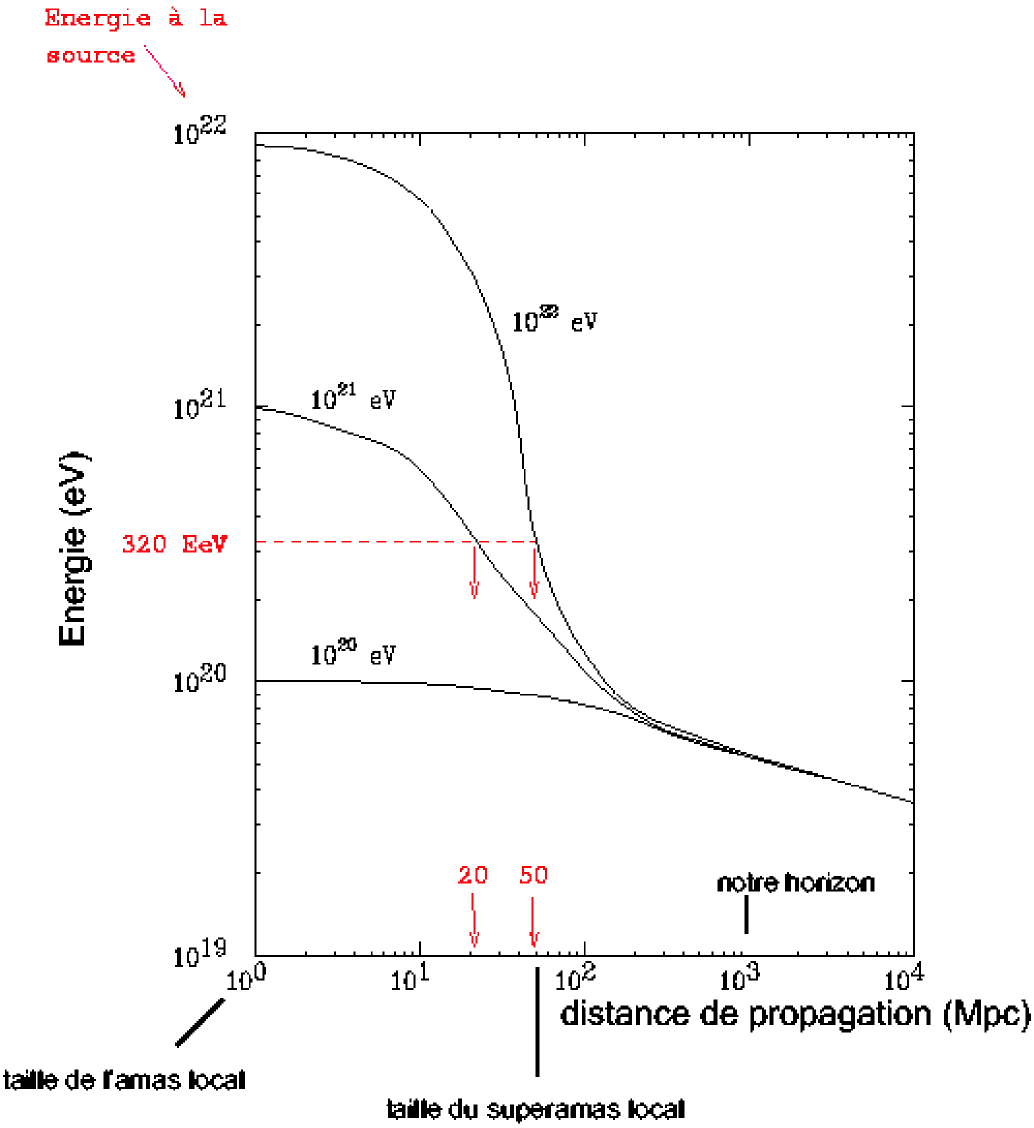
La coupure GZK

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



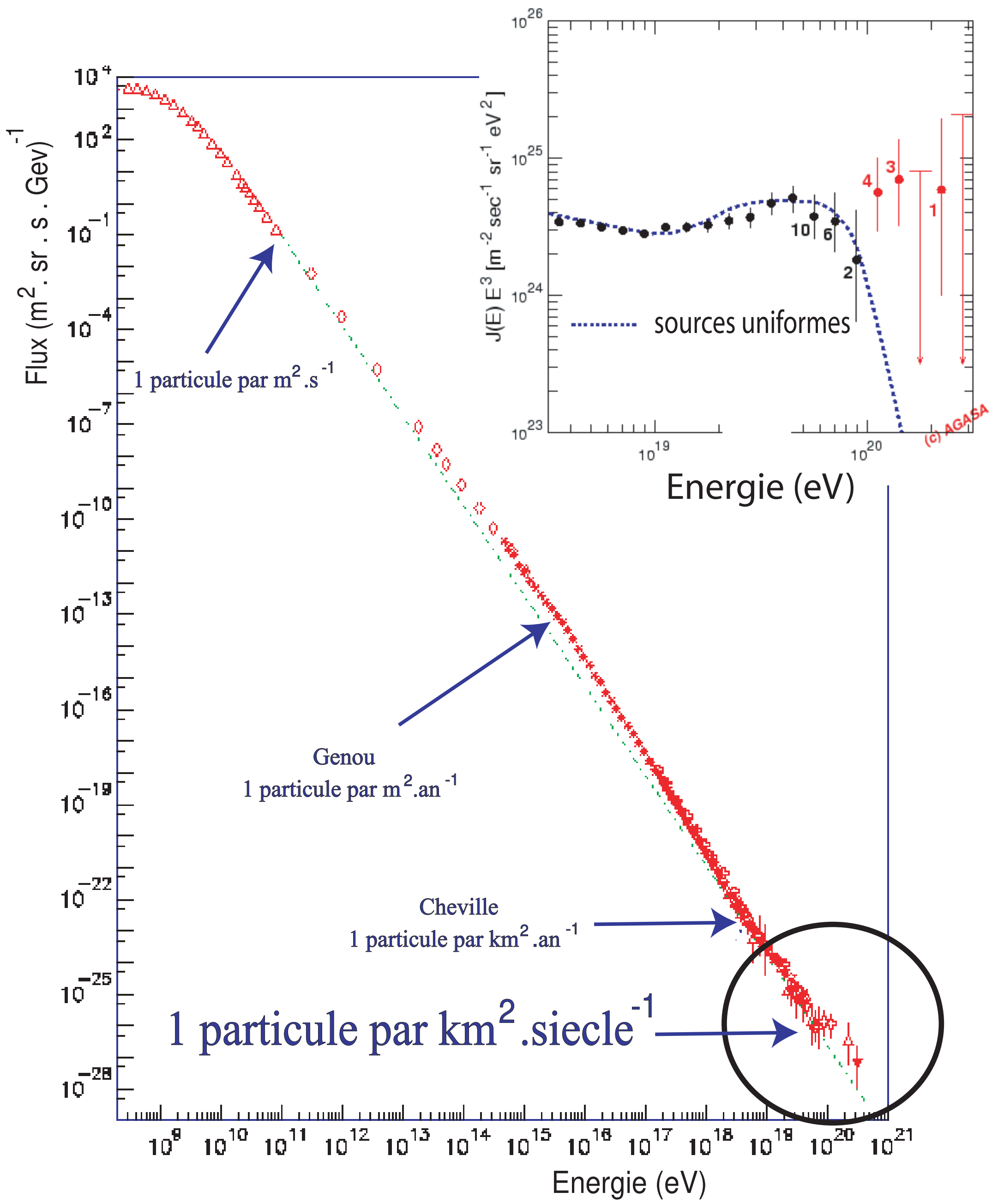
cas du photon : production de paires à partir de 4×10^{14} eV

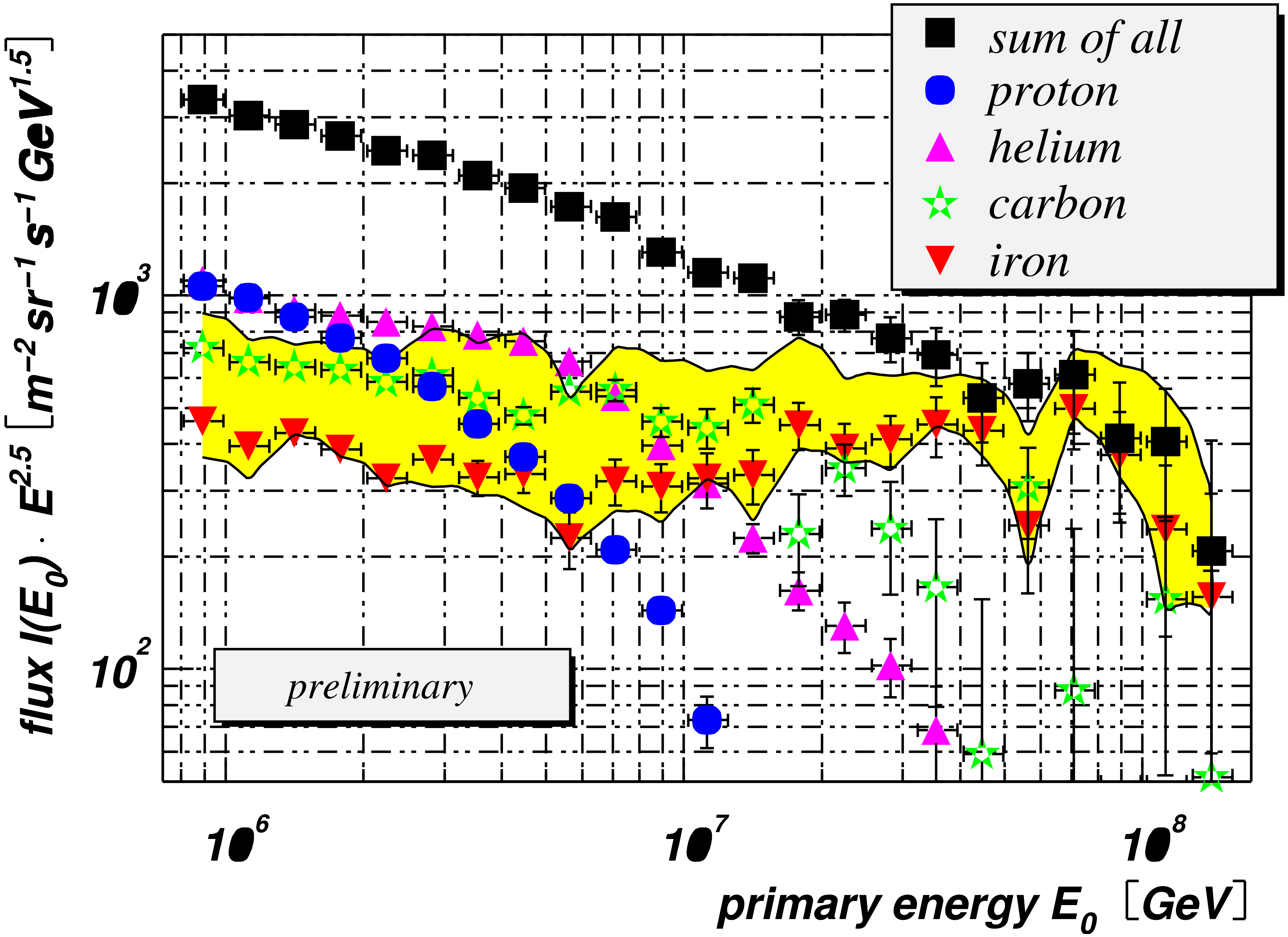
Nos principales lacunes

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

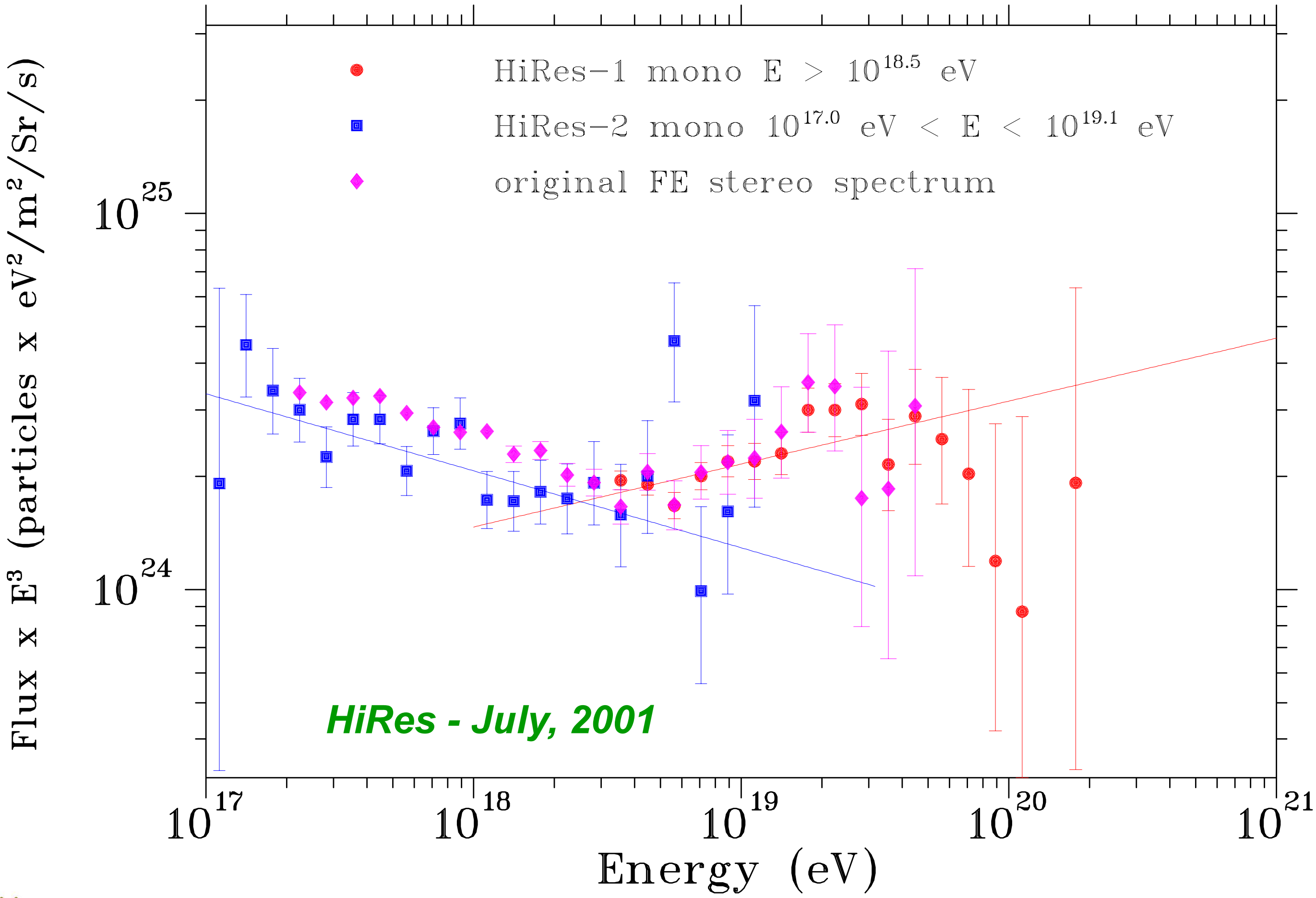
   Problème de fine tuning (Kascade). SN proche ?

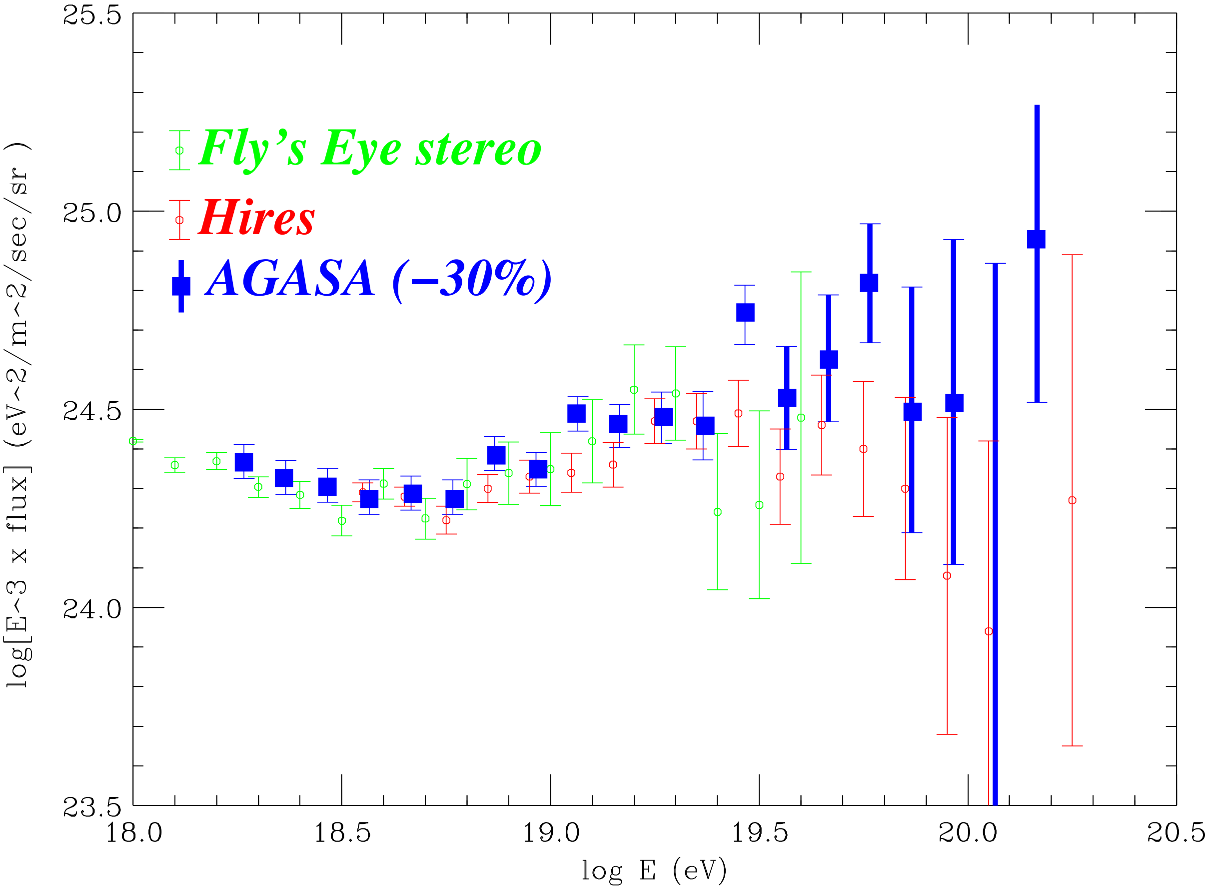
2. on a observé des événements au-delà de la coupure GZK





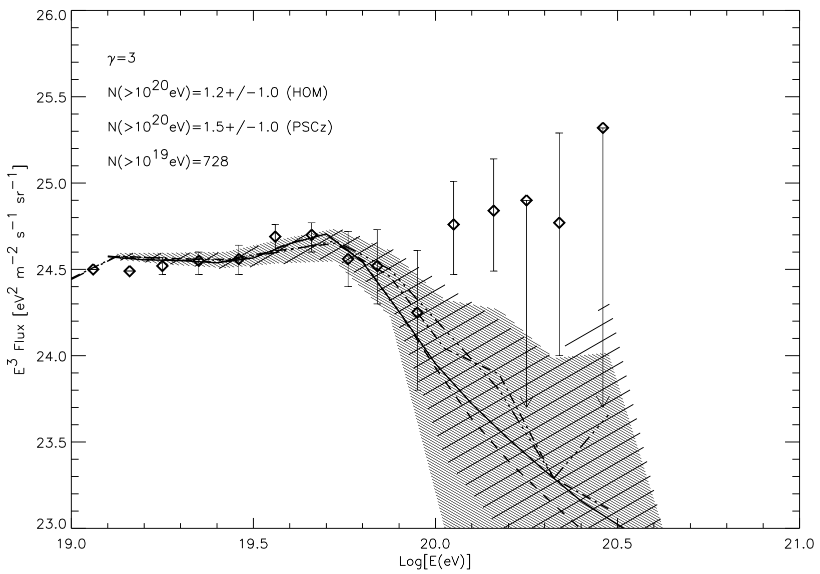
sum of all
proton
helium
carbon
iron
preliminary
flux I(E_0) · E^2.5 [m^-2 sr^-1 s^-1 GeV^1.5]
10^3
10^2
10^6
10^7
10^8
primary energy E_0 [GeV]


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)
10^{25}
10^{24}
10^{17}
10^{18}
10^{19}
10^{20}
10^{21}


Fly's Eye stereo
Hires
AGASA (−30%)
log[E^3 x flux] (eV^2/m^2/sec/sr)
log E (eV)
25.5
25.0
24.5
24.0
23.5
18.0
18.5
19.0
19.5
20.0
20.5

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 :



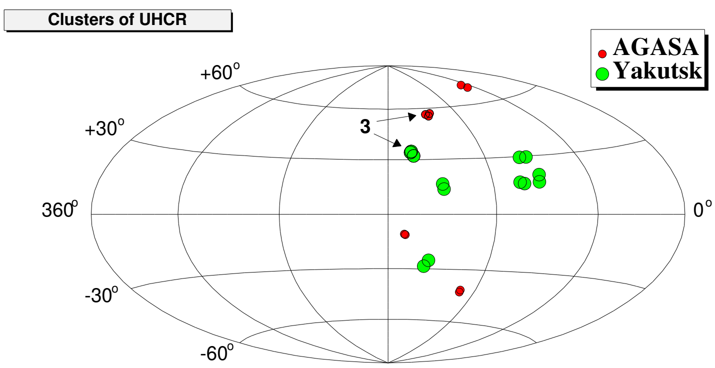
nouvelle physique ?

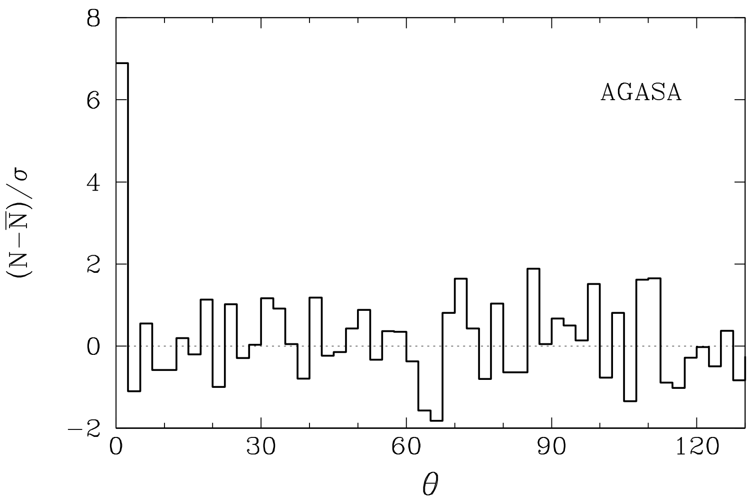
1. les défauts topologiques post-inflation (photons, ν)
2. annihilation de particules issues des GUT (photons, ν)
3. violation de l’invariance de Lorentz

Nouvelles avancées

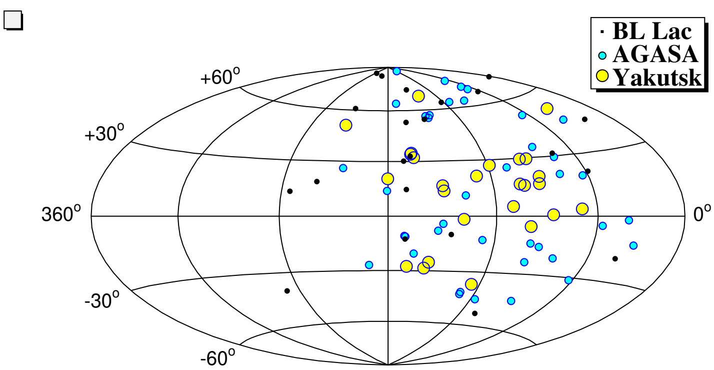
- réanalyse des événements et 8 nouveaux événements découverts par AGASA (ICRC 2001) ; acceptance augmentée de 50 % au-delà de 10^{19} eV

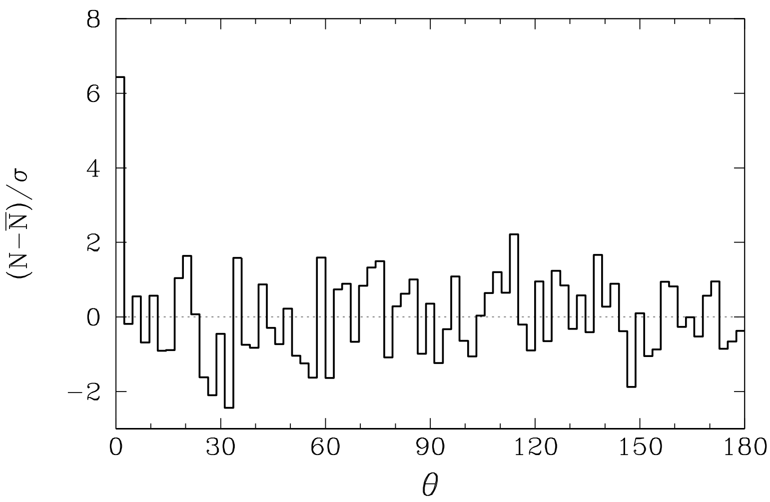
- analyse des multiplets AGASA + Yakutsk les sources compactes sont privilégiées (significatif : $\sim 7\,\sigma$)

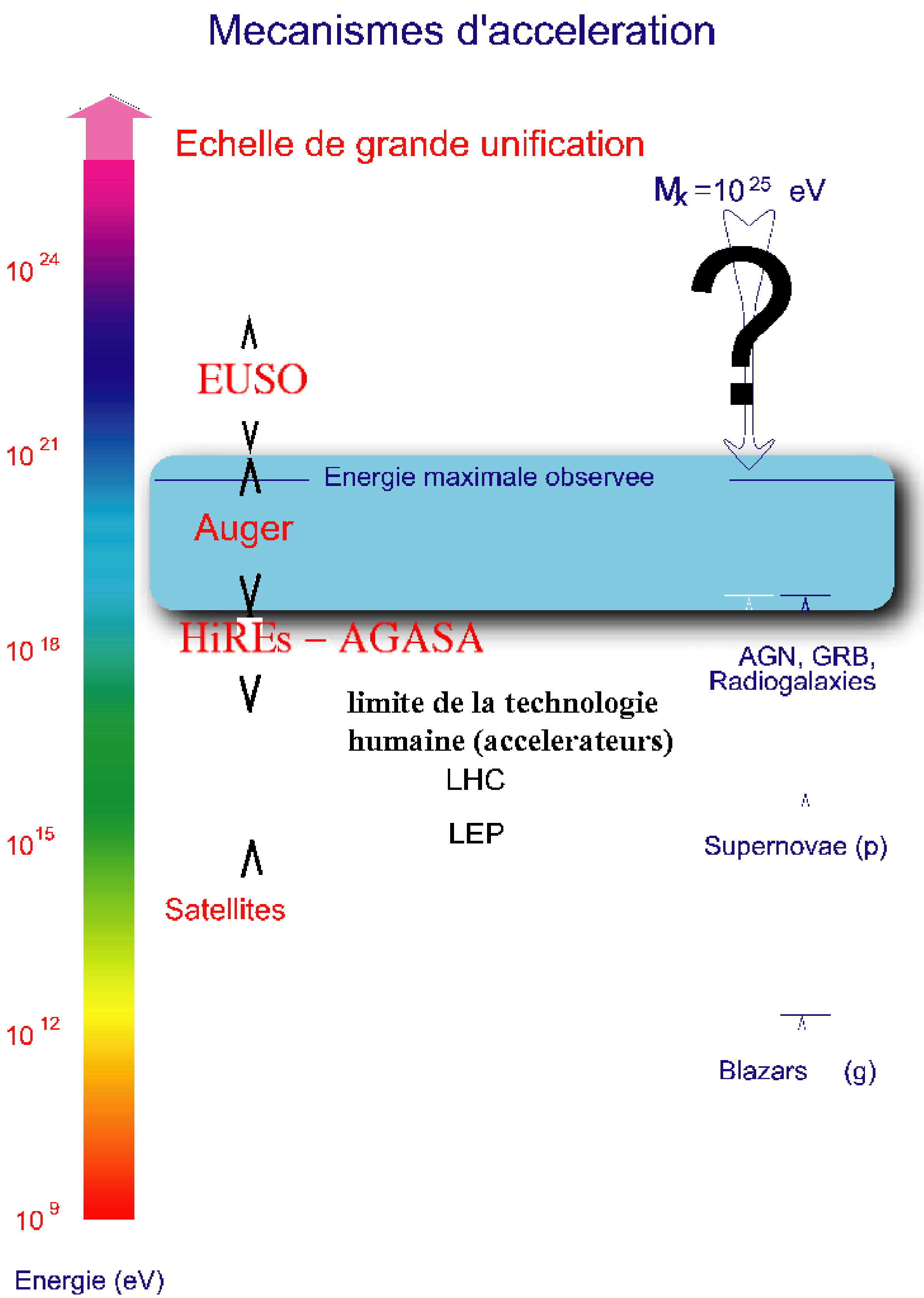




- corrélation avec les BL Lac ?

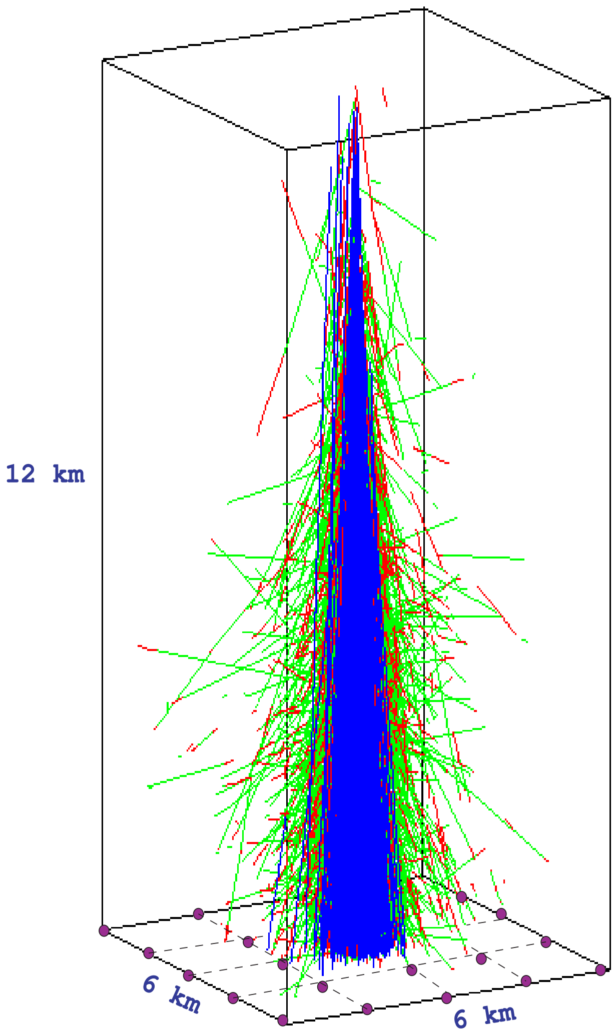





Mecanismes d'acceleration
Echelle de grande unification
Mx =10 25 eV
?
10 24
EUSO
10 21
Energie maximale observee
Auger
10 18
HiREs – AGASA
AGN, GRB,
Radiogalaxies
limite de la technologie
humaine (accelerateurs)
LHC
LEP
10 15
Supernovae (p)
Satellites
10 12
Blazars (g)
10 9
Energie (eV)

Phénoménologie des RC
gerbes atmosphériques (1)

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

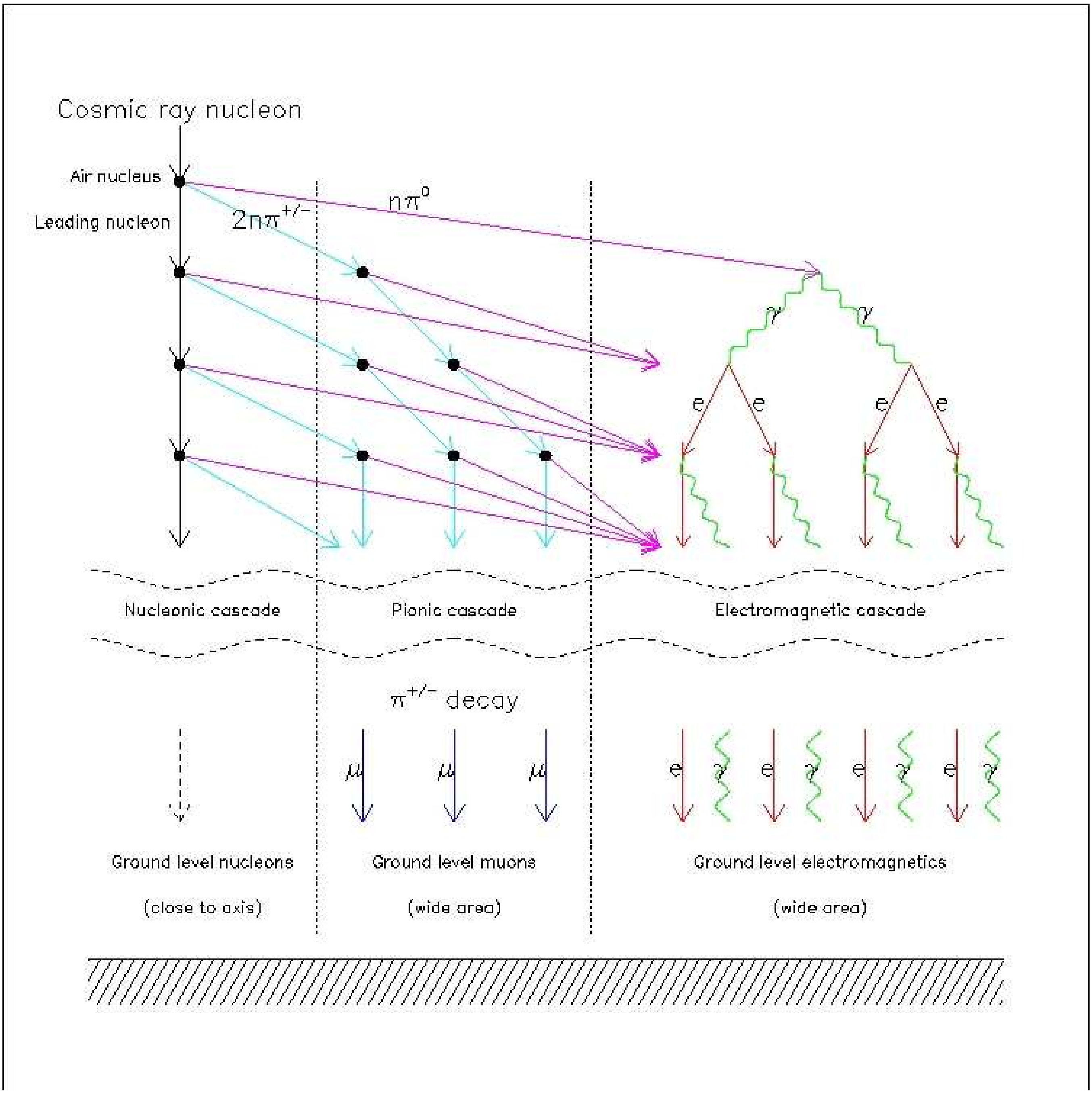


pour un proton de 10^{19} eV :

- 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

Développement atmosphérique



$$E_{\text{EM}} \propto (N_\gamma + N_{e^+e^-}) < \varepsilon > \quad \propto E_{\text{prim}}$$

avec $\varepsilon \sim$ qques MeV **MAIS** pour les μ, issus des $\pi^\pm$,

$$N_\mu^p(E) \propto E^{0.85} \quad \text{(proton).}$$

Pour les autres gerbes hadroniques : **principe de superposition**

$$N_\mu^A(E) = A \left(\frac{E}{A}\right)^{0.85} = A^{0.15}\, N_\mu^p(E).$$

Par exemple, 80 % de μ en plus pour ^{56}Fe que p à la même énergie.

Modèle schématique du développement.

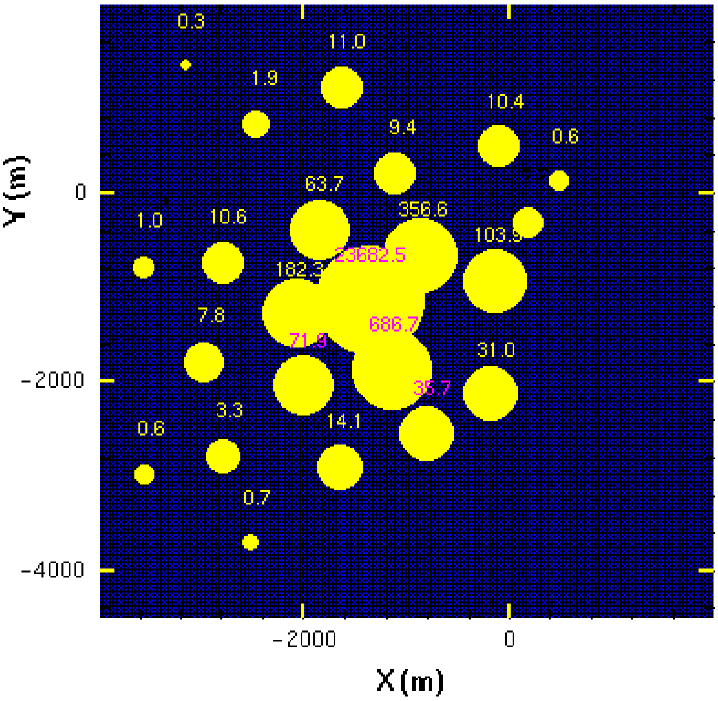
Si E_0 est l'énergie du primaire, λ la longueur d'intéraction dans l'air et E_c l'énergie en dessous de laquelle il ne reste que du dE/dx et des désintégrations, alors :

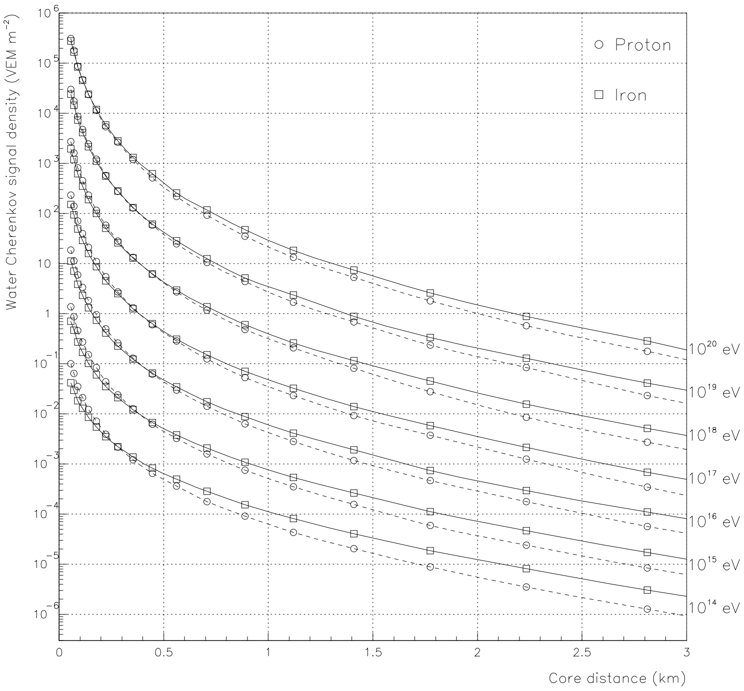
- le nombre de particules à X croît comme $N_s^{X/\lambda}$
- l'énergie moyenne des secondaires est $E_0/N(X)$
- $E_c = E_0/N(X_{\text{max}})$
- $X_{\text{max}} \propto \lambda \log(E_0)$ et $N_{\text{max}} \propto E_0$

gerbes atmosphériques (2)

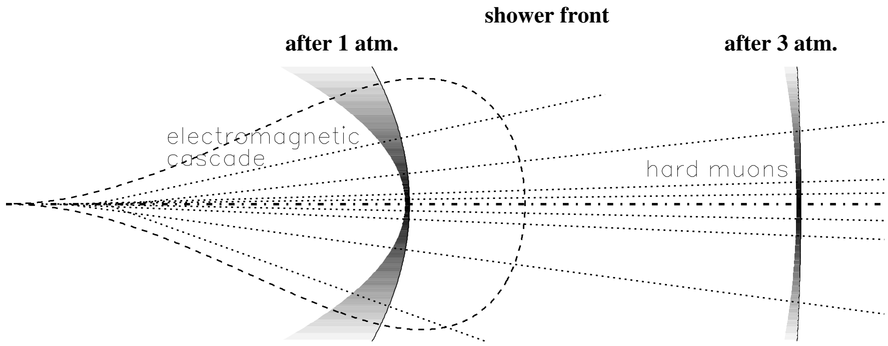
- distribution latérale : loi de NKG (Nishimura, Kamata, Greisen)

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





- le front de gerbe :



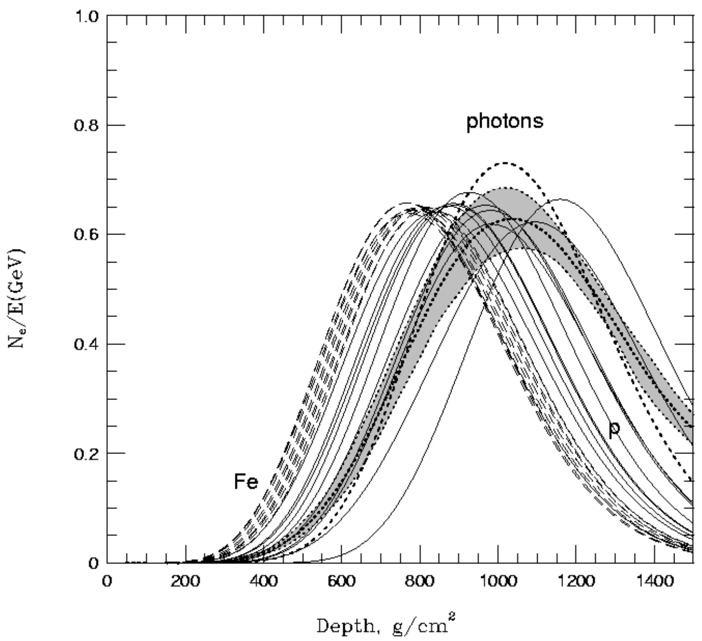
épaisseur de quelques ns au cœur, de quelques μs vers 1 km

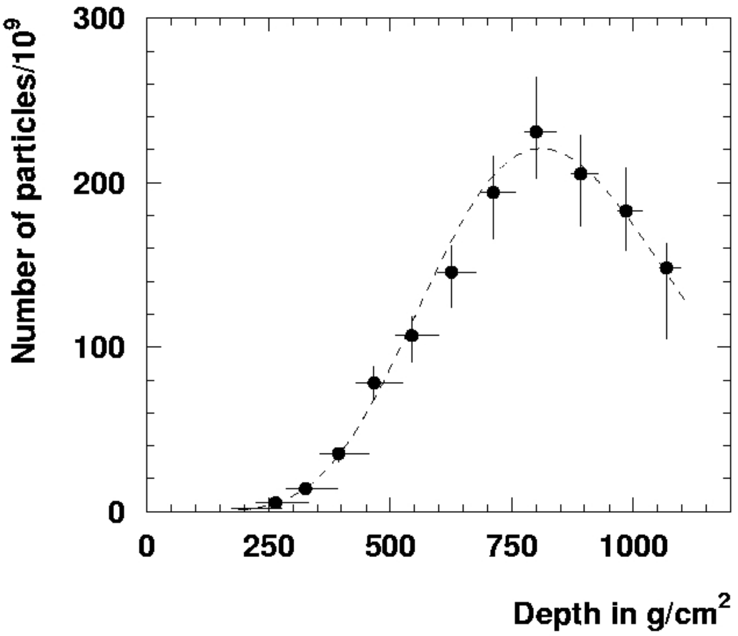
gerbes atmosphériques (3)

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), $N_\gamma^F \propto N_e(X)$

profil longitudinal :





Position du maximum :

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

Développement longitudinal :

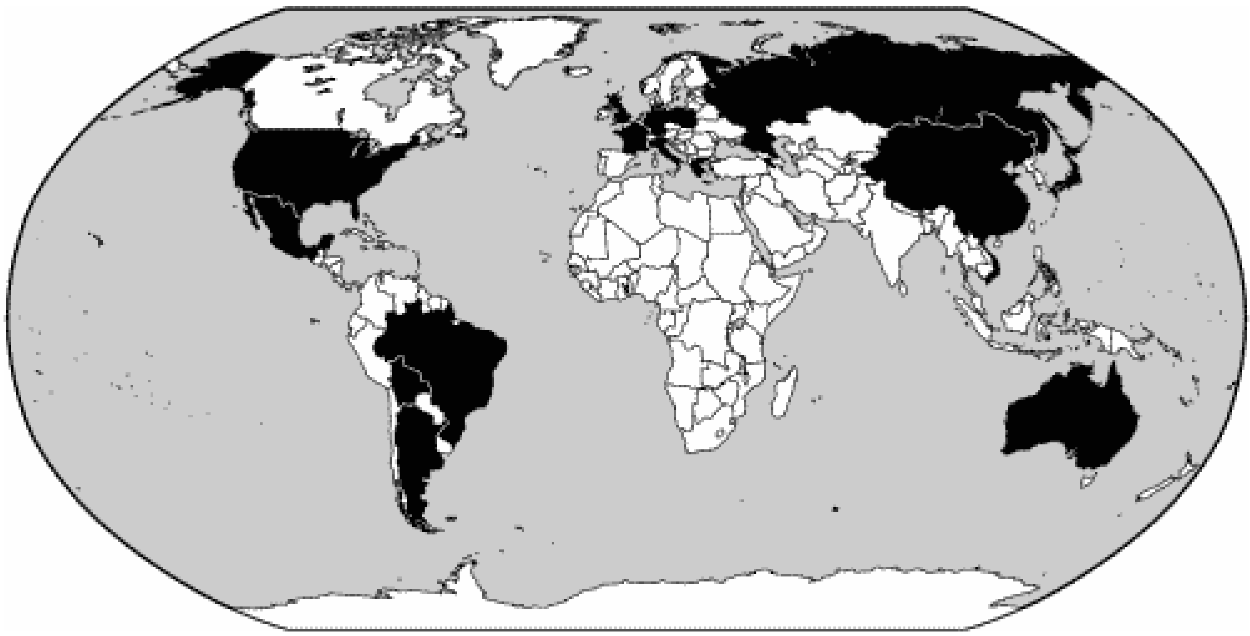
$$N_e(x) = N_{\mathsf{max}} \left(\frac{x - x_0}{X_{\mathsf{max}} - x_0} \right)^{(X_{\mathsf{max}} - x_0)/\lambda} e^{X_{\mathsf{max}} - x}$$

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

PIERRE
AUGER
OBSERVATORY



19 pays, 295 scientifiques

2 sites, un dans chaque hémisphère

BOLIVIA
PARAGUAY
BRAZIL
Asunción
URUGUAY
Montevideo
CHILE
Santiago
Valparaíso
SOUTH
PACIFIC
OCEAN
SOUTH
ATLANTIC
OCEAN
Buenos Aires
La Plata
Mar del Plata
Bahía Blanca
Mendoza
Córdoba
Rosario
Falkland Islands
(Islas Malvinas)
Argentina
International boundary
Province boundary
National capital
Province capital
Railroad
Road
Cape Horn

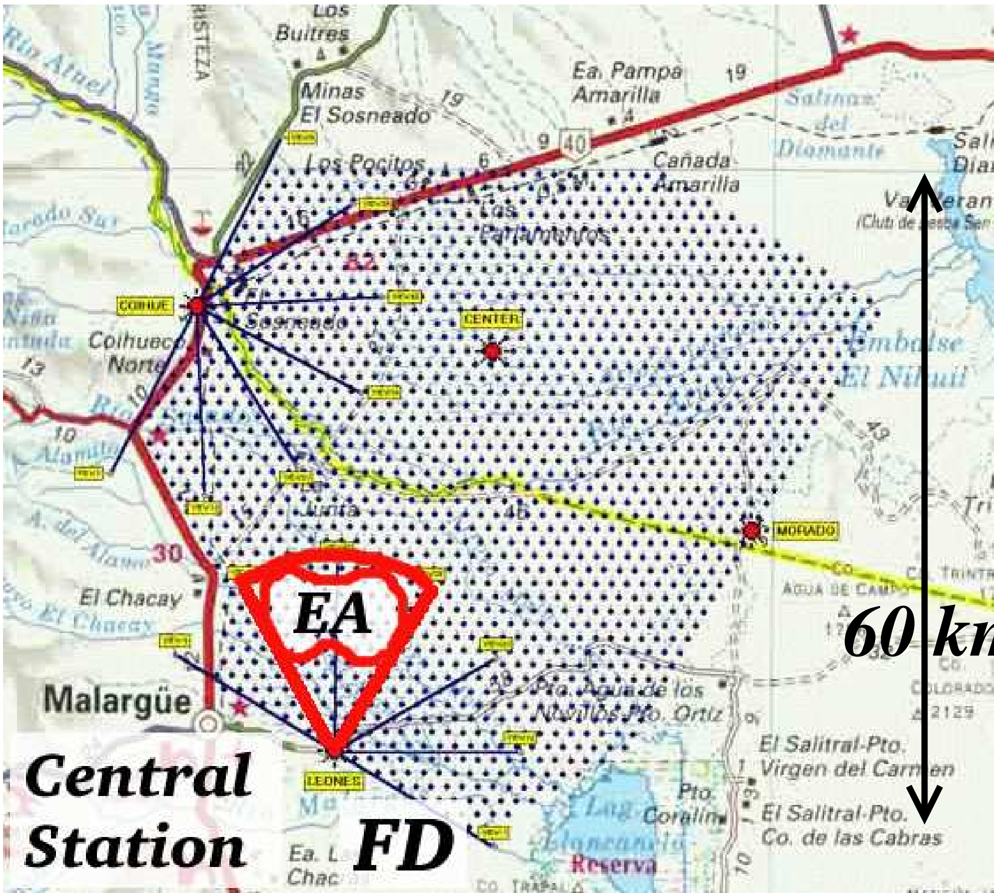
San Juan
Paraná
CÓRDOBA
ENTRE
RÍOS
Mendoza
San Luis
Río
Cuarto
Rosario
Valparaíso
Santiago
CHILE
Mercedes
Venado
Tuerto
Colonia
MENDOZA
SAN
LUIS
Renancó
General
Villegas
Junín
Buenos
Aires
La Plata
San
Rafael
Realicó
Telén
Santa Rosa
Río Salado
BUENOS AIRES
LA PAMPA
NEUQUÉN
Mar d

Le site

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

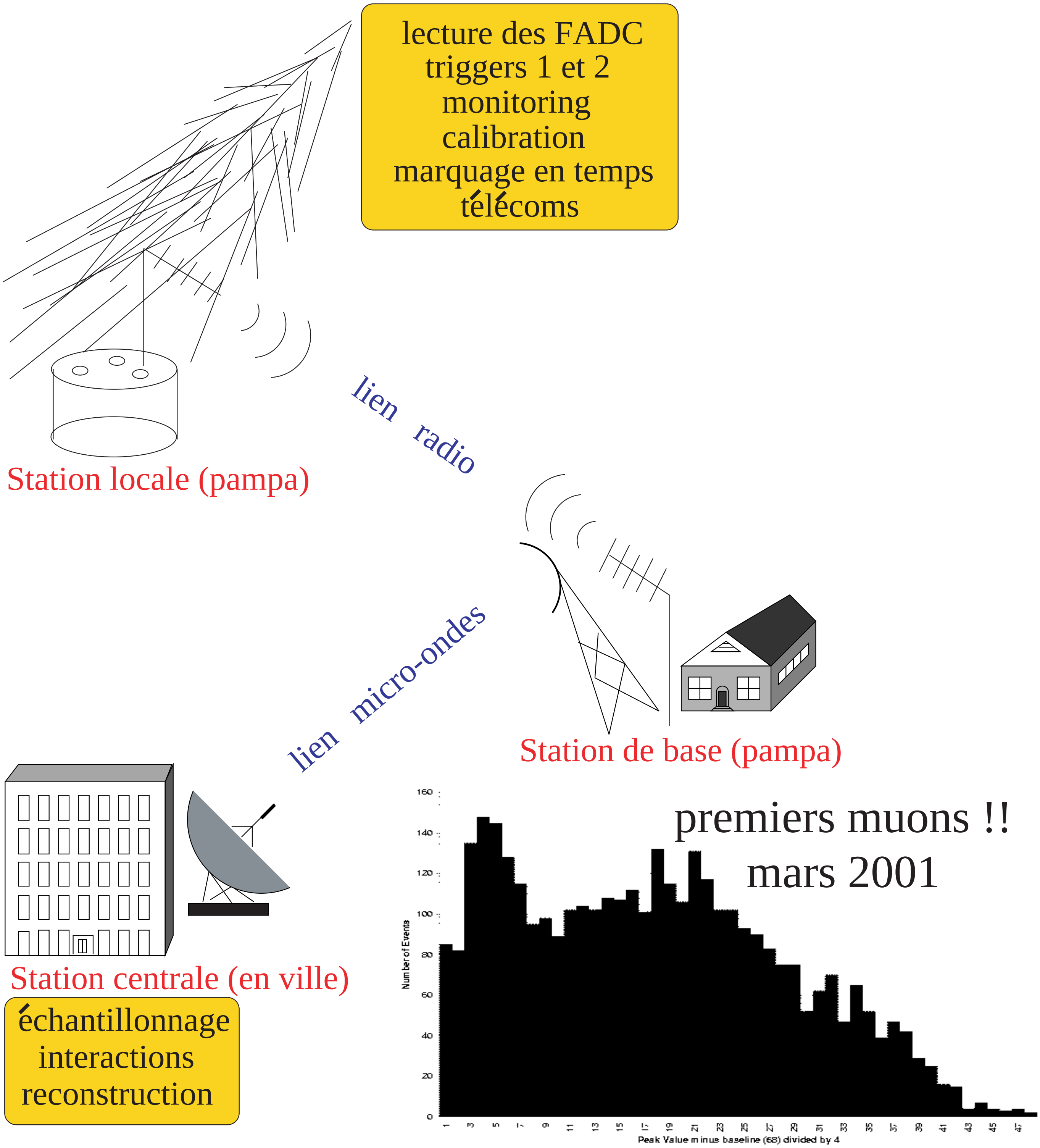


1600 cuves
distantes de 1,5 km
4 détecteurs
de fluorescence

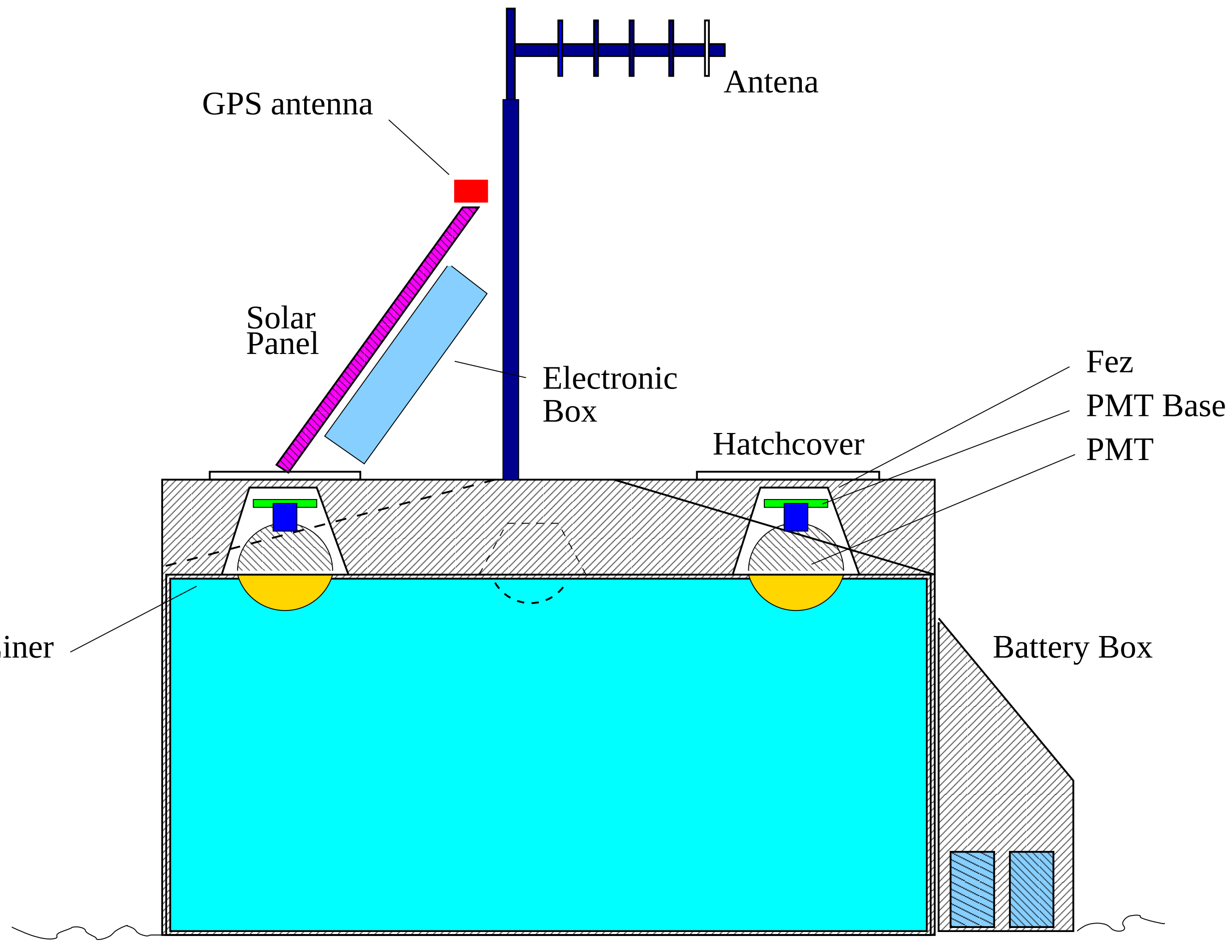
60 km

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

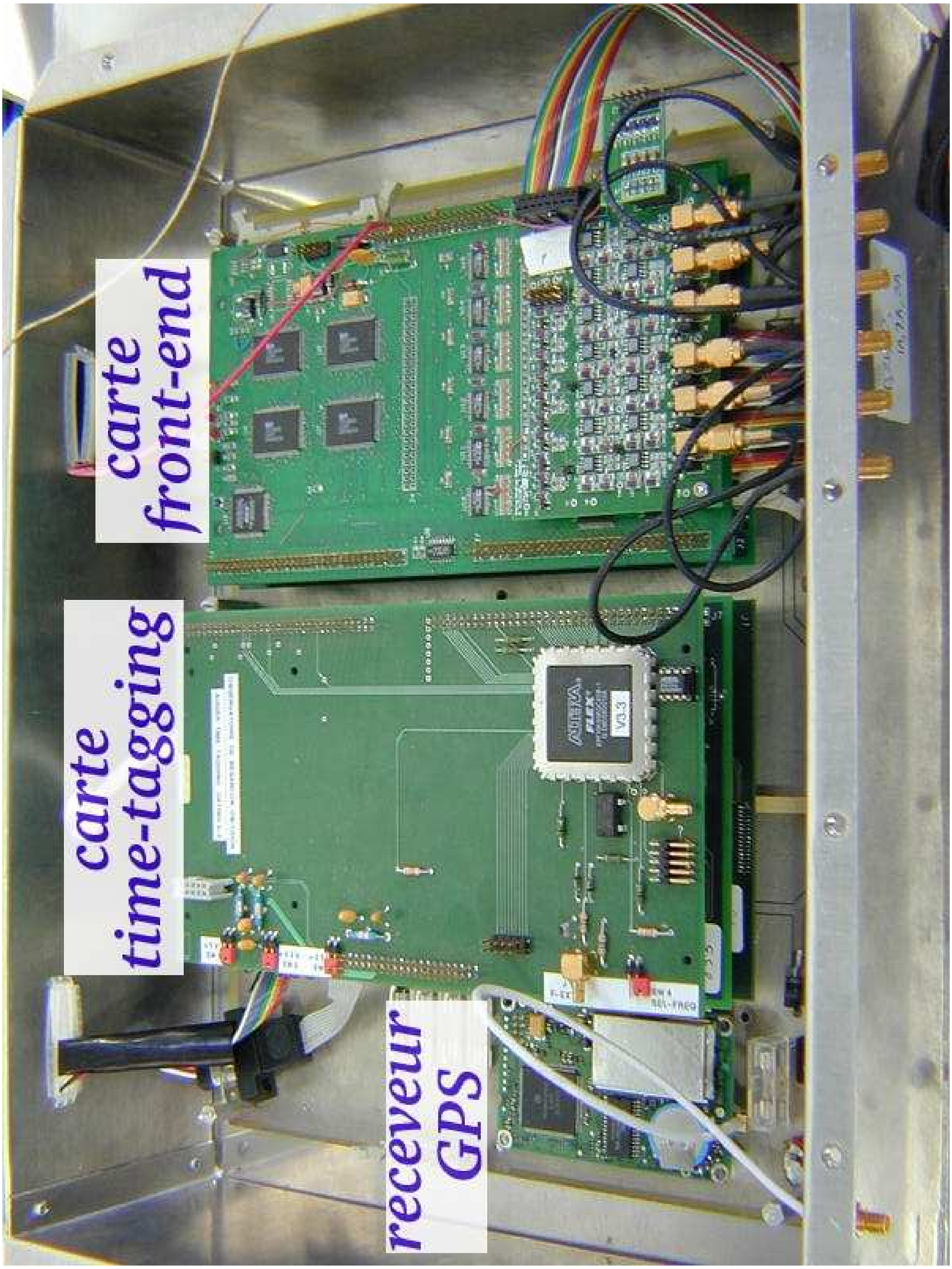
Le réseau


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
Number of Events
Peak Value minus baseline (68) divided by 4

Les détecteurs de surface



L'électronique



Le trigger 1

Idée de base : garder les événements tels que
$E > 10^{19}$ eV.

La phénoménologie des gerbes nous dit que :

- un signal provenant d'une gerbe à haute énergie sera plus étalé dans le temps que celui provenant d'une gerbe à plus basse énergie : un contour à énergie fixée sera plus loin du cœur dans une gerbe à haute énergie ;
- le signal généré par les γ/e^- est moins fort que celui généré par des μ : l'énergie d'un μ est de l'ordre du GeV, celle des γ/e^- est dans la gamme $1 - 10$ MeV.

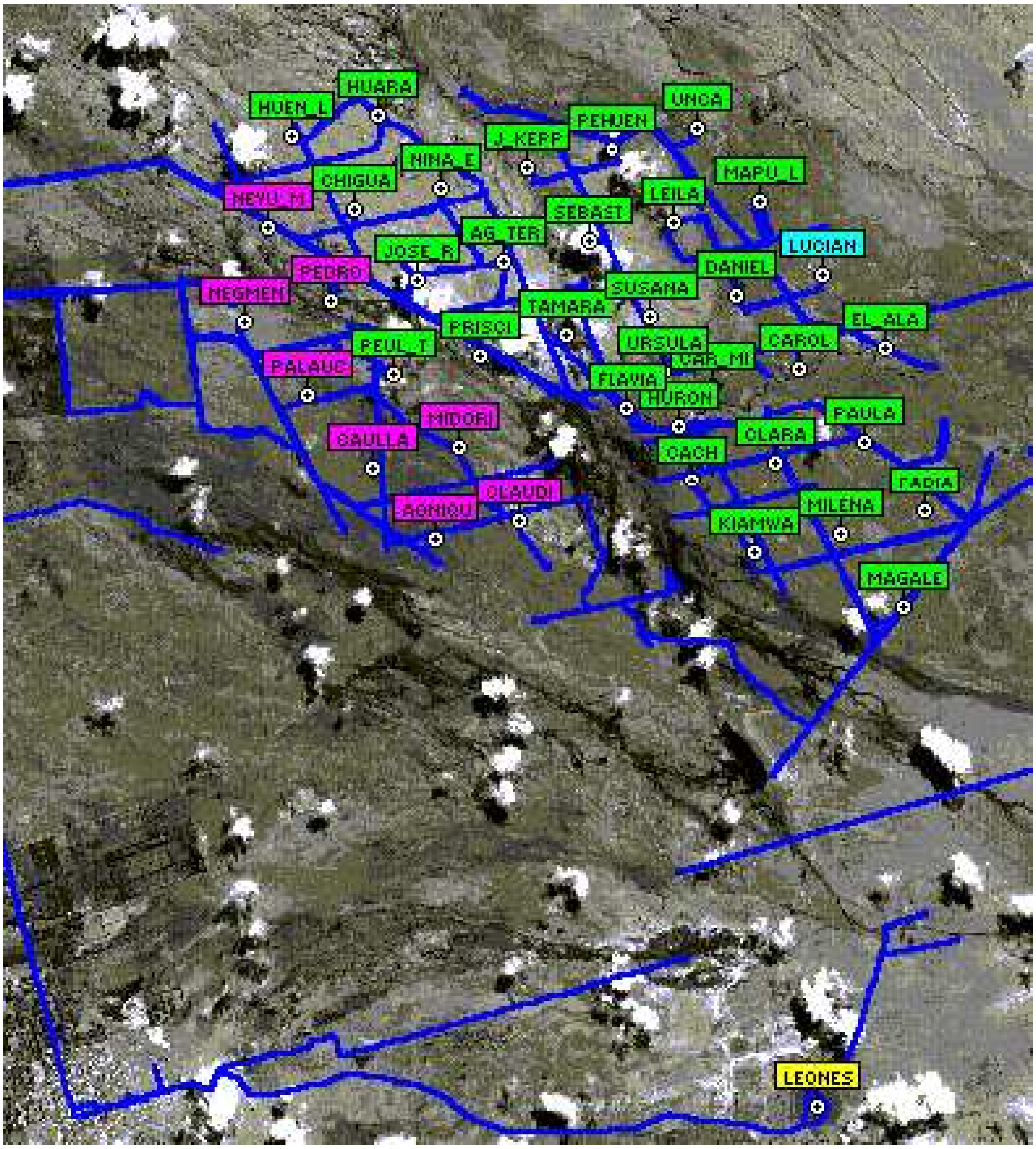
Donc :

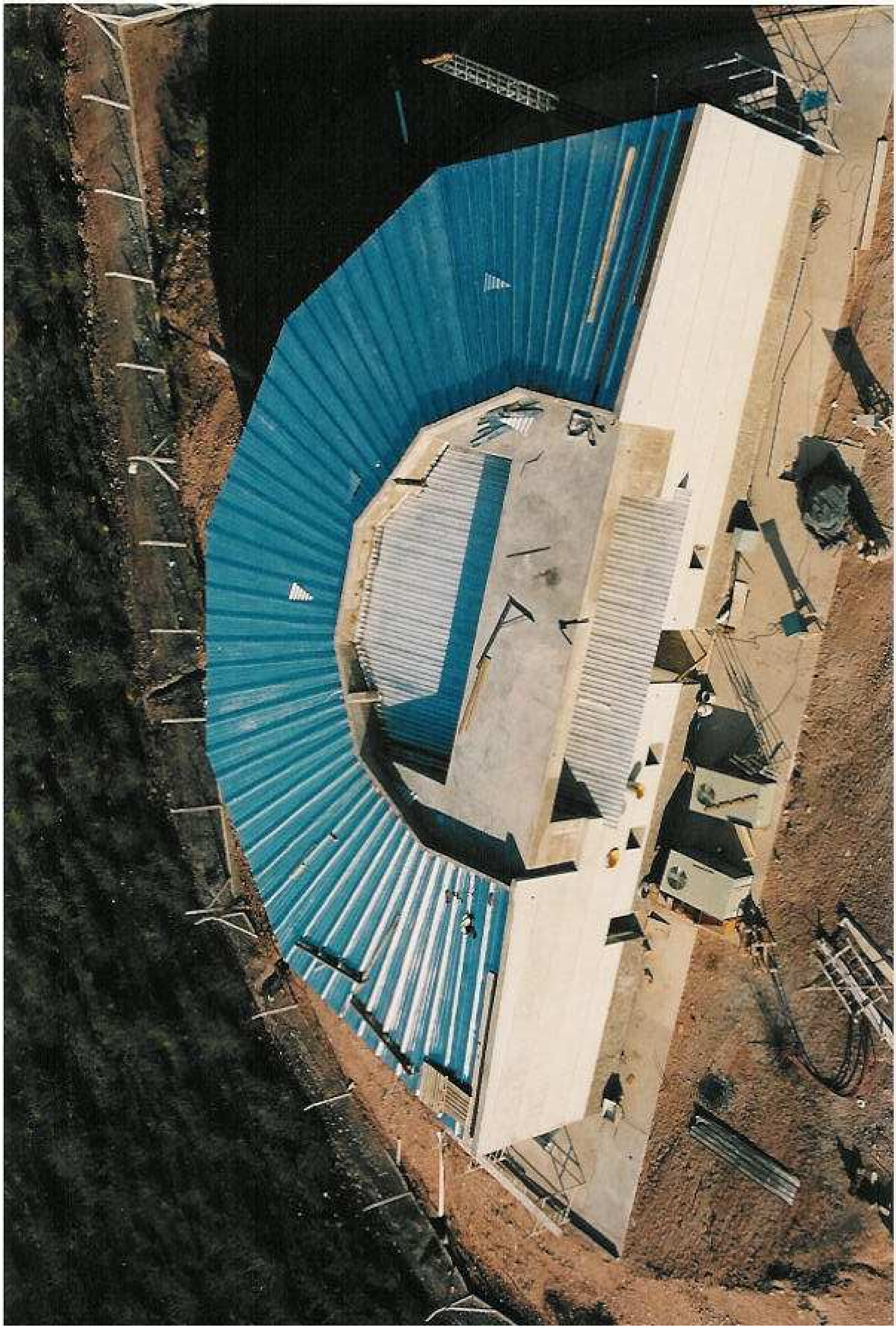
1. demander que le signal soit étendu en temps va biaiser le trigger au bénéfice des gerbes à haute énergie ;
2. utiliser un seuil haut favorisera les gerbes riches en μ ;
3. attention à ne pas rejeter les gerbes inclinées qui vont donner des signaux brefs.

D'où l'existence de deux triggers 1 :

un trigger de type TOT

un trigger de type seuil


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



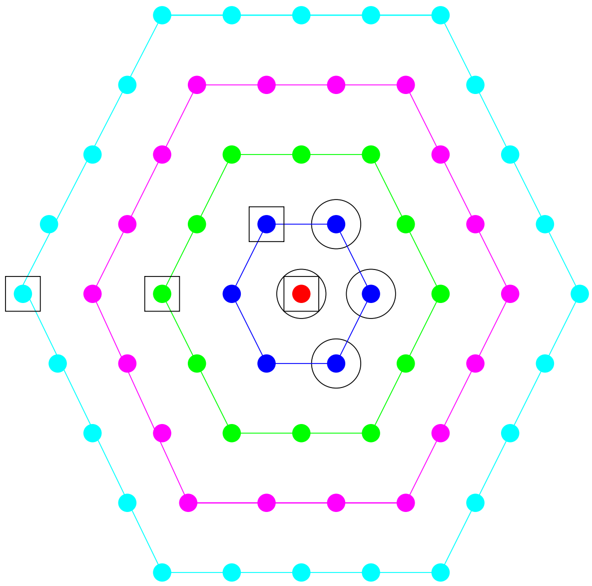
Les triggers et les données

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)



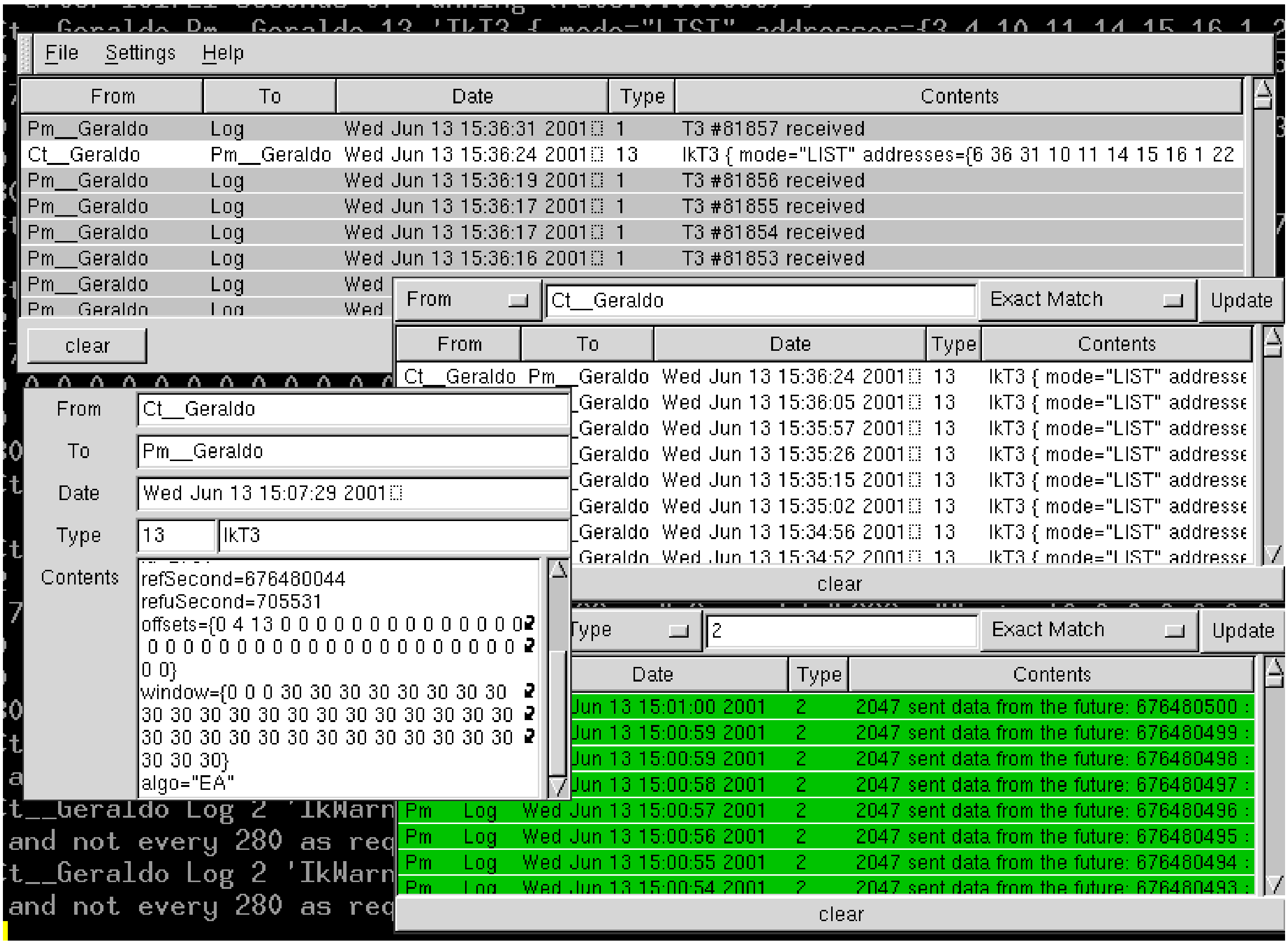
Données :

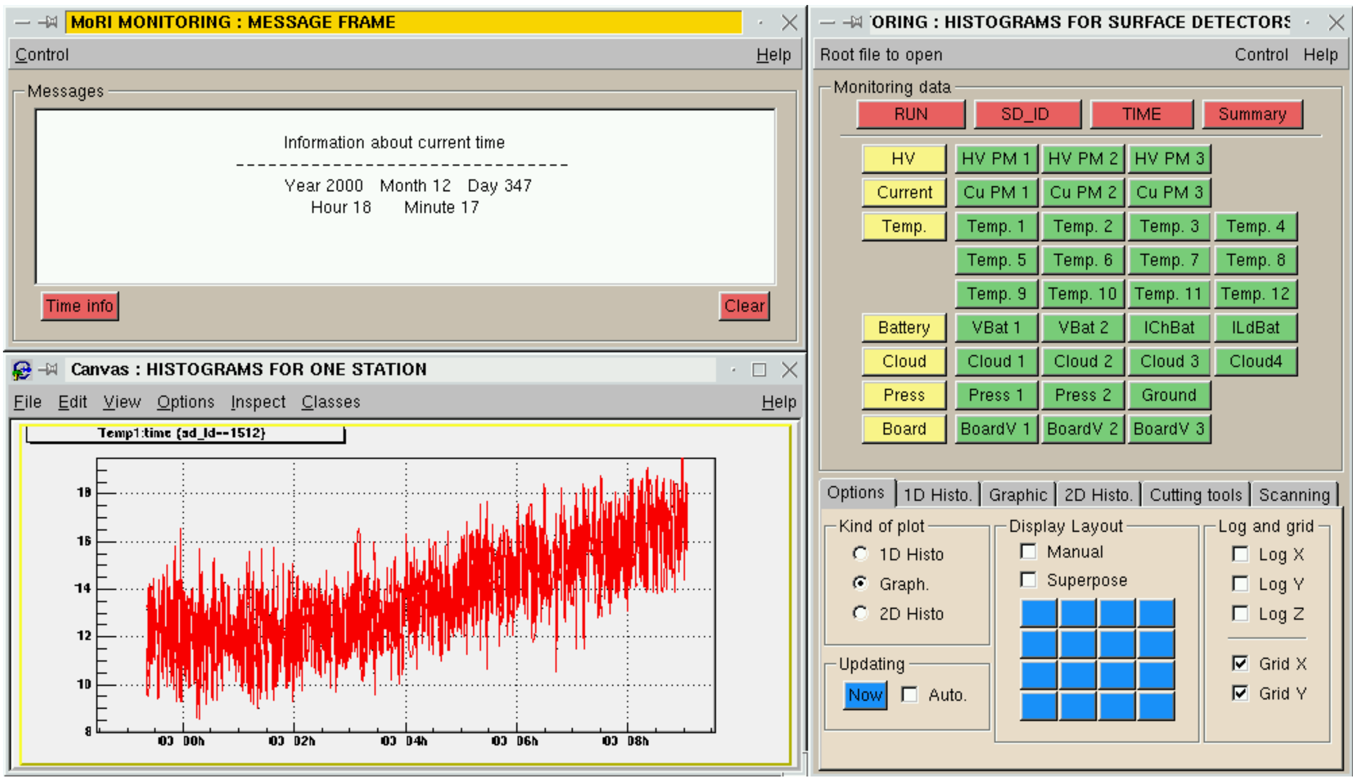
- 10 (bits) $\times$ 1024 (samples) $\times$ 6 (PM) $\times$ 5 (stations) / 6 (compression) $\times$ 0.02 Hz (T3 rate) $\times$ 2 (calib) = 0.25 kb/s

  22 Mb par jour, 144 Mb pour le monitoring

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

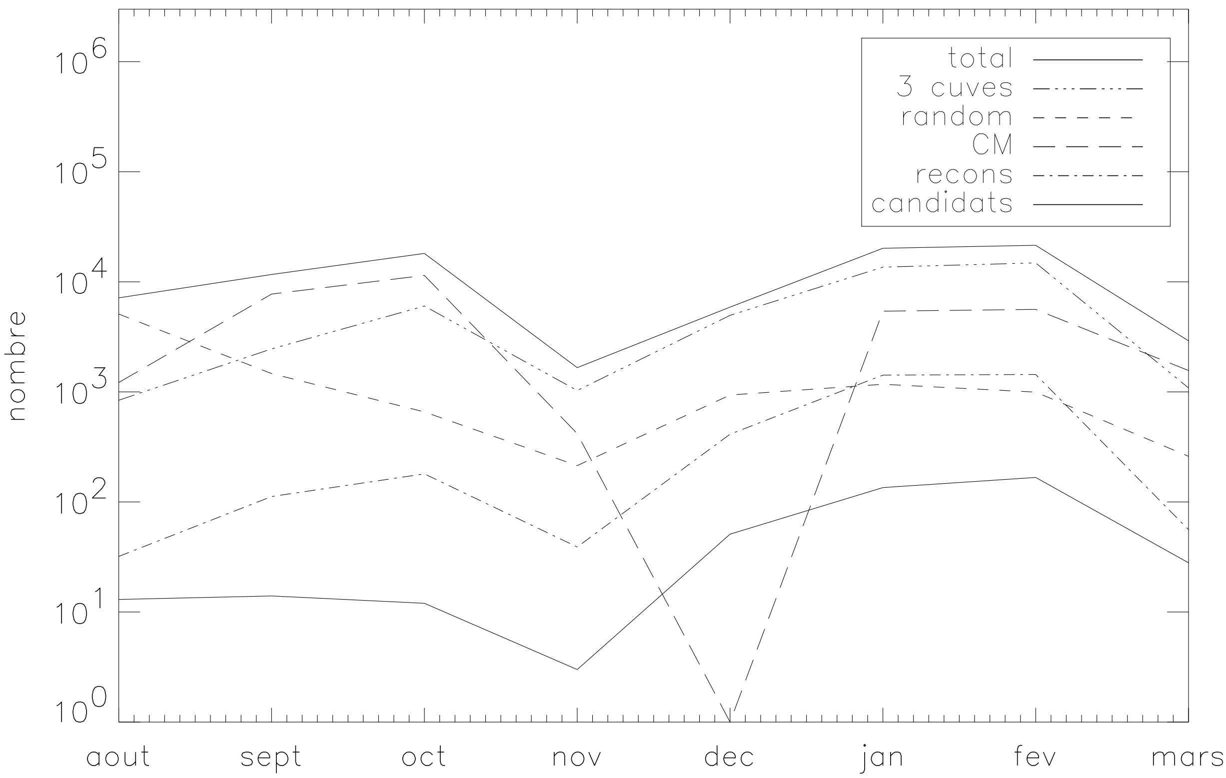
La station centrale, le CDAS





Regard sur les premières données

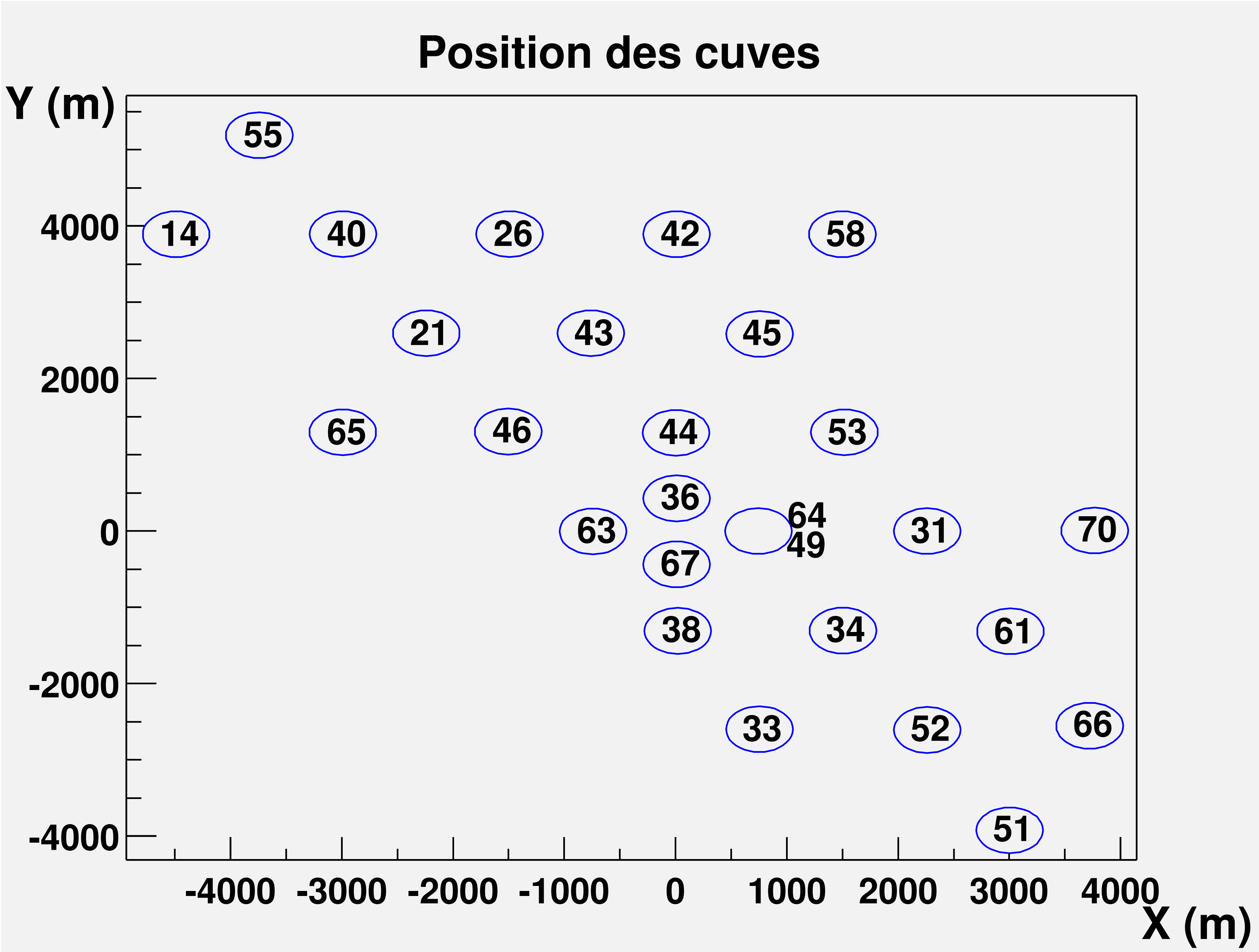
- acquisition en dents de scie depuis juillet 2001
- environ 1 Gb au total (pour ~ 30 cuves)
- tri des événements et reconstruction

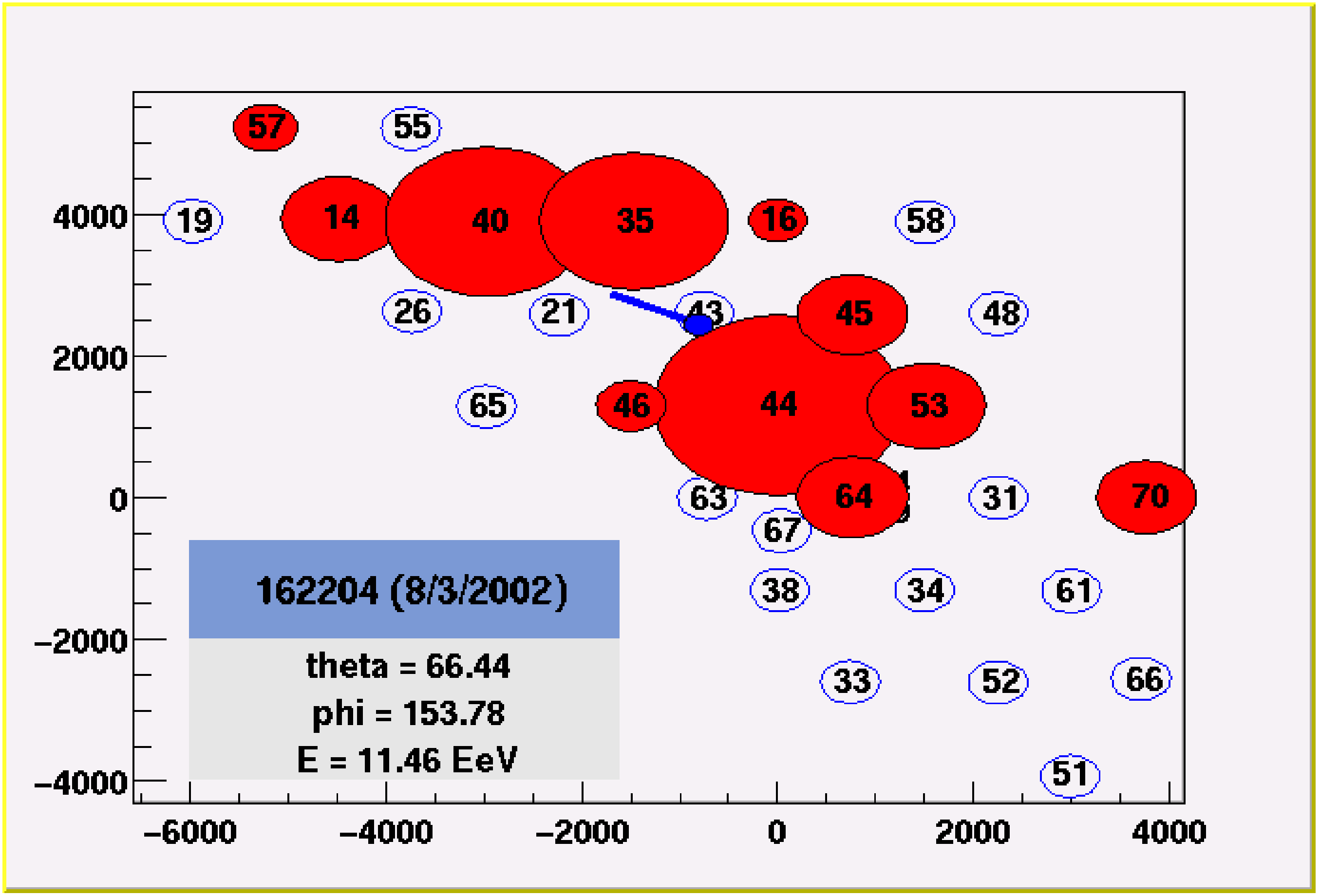


- nombre total d'événements : **96 666**
- Carmen-Miranda : **31 835**
- événements à au moins 3 cuves : **43 759**
- random : **10 536**
- événements reconstruits : **3 636**
- candidats : **423**

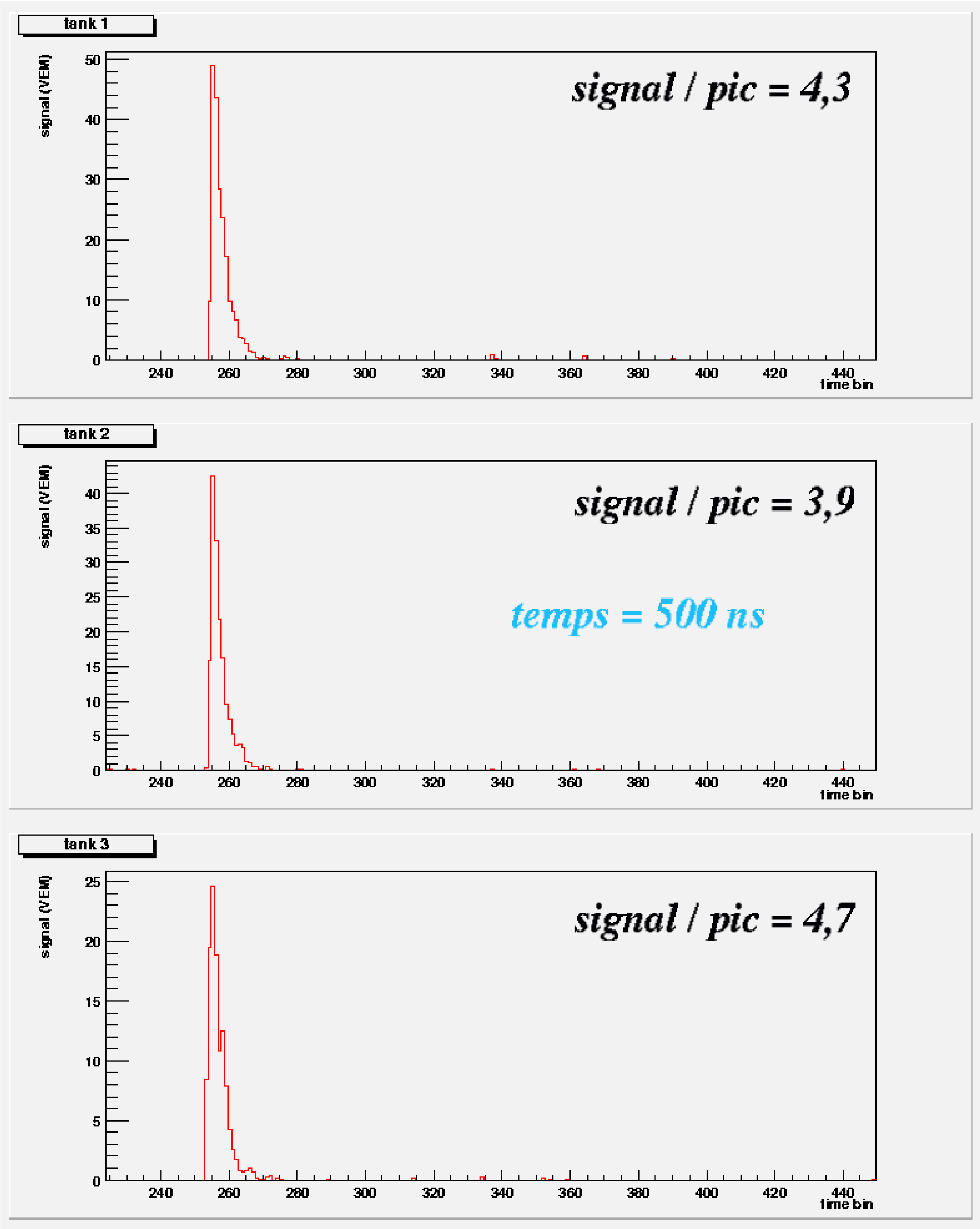
(274 à 3 cuves, 122 à 4, 18 à 5,

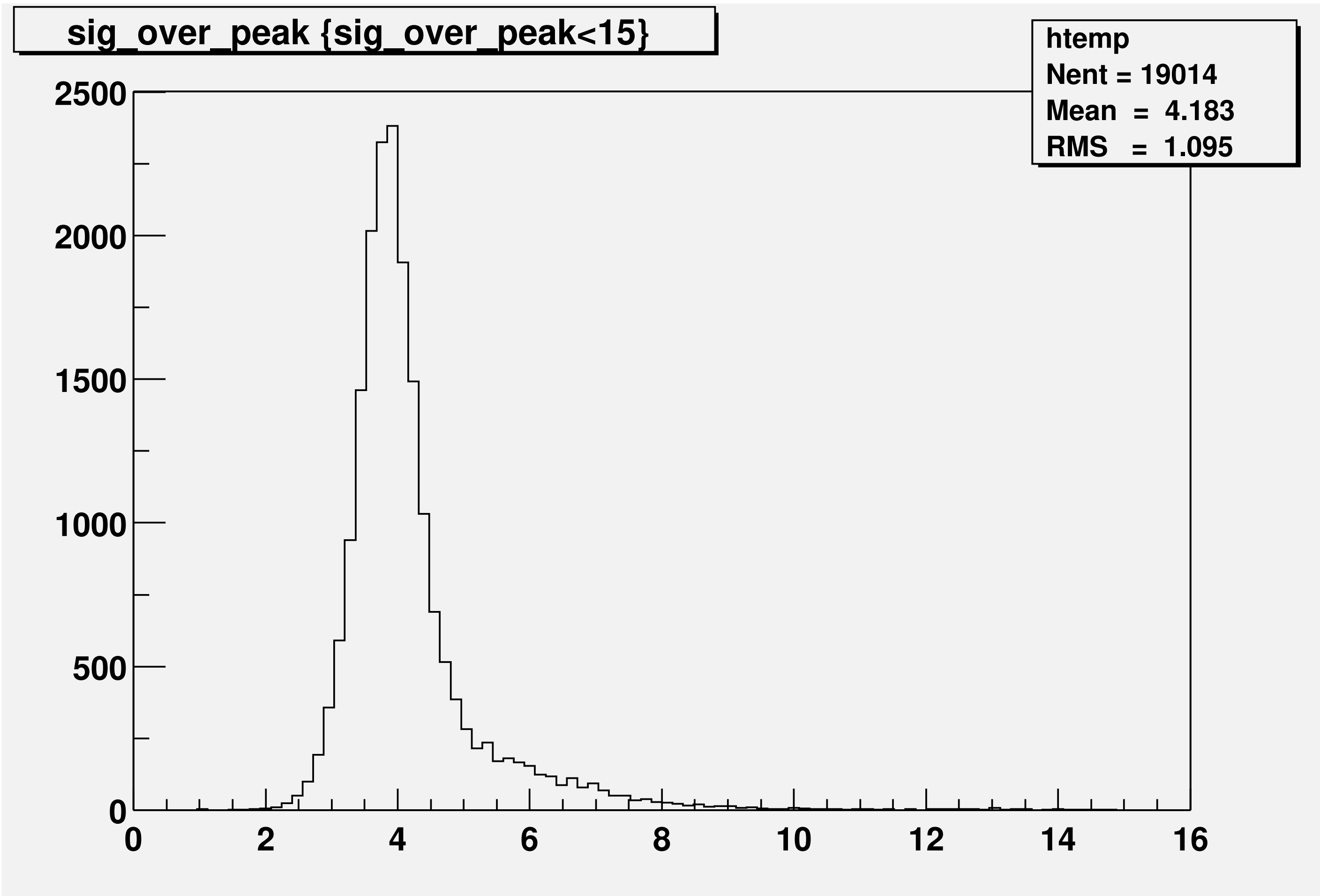
3 à 6, 2 à 7, 3 à 8 et 1 à 11)


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

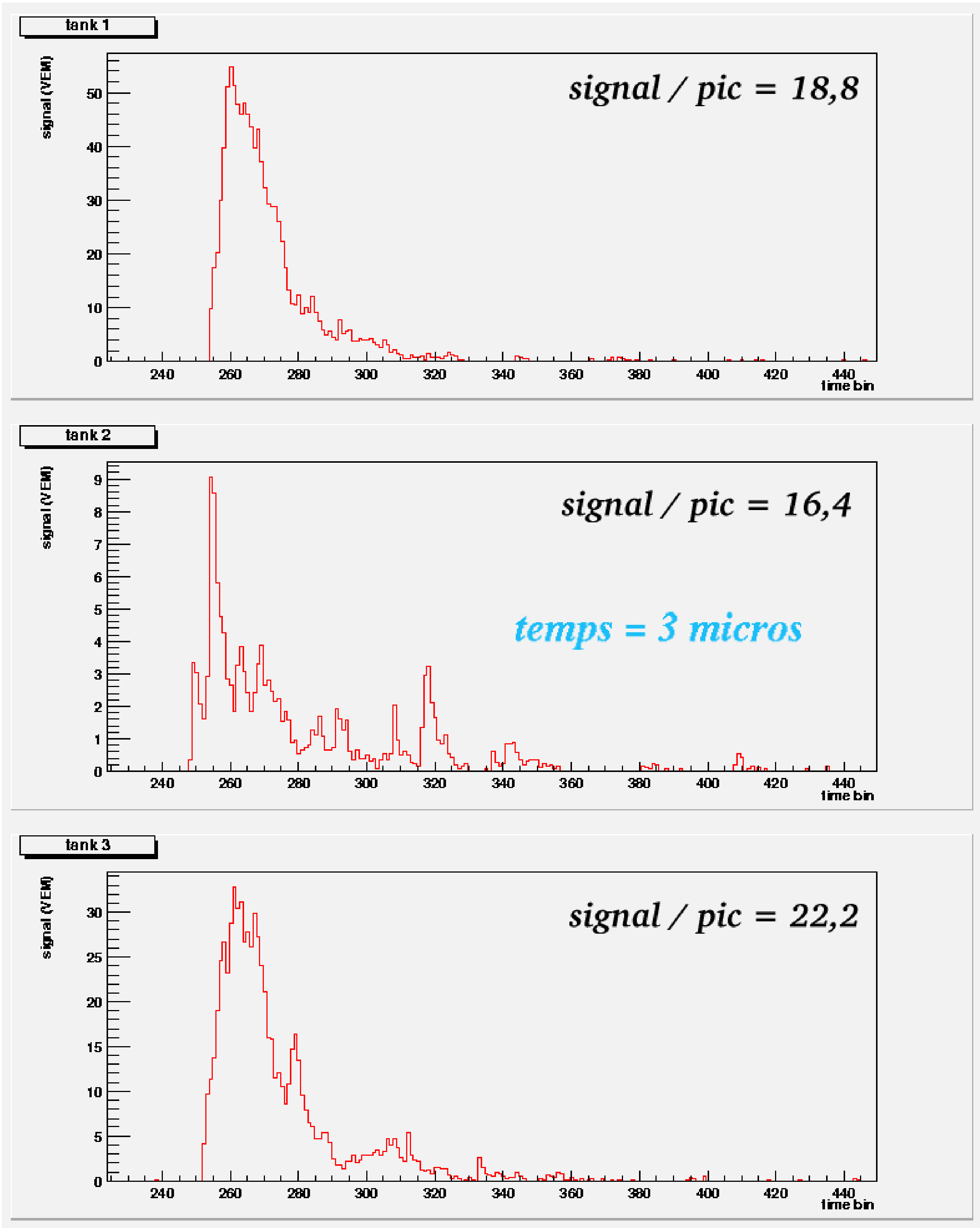

162204 (8/3/2002)
theta = 66.44
phi = 153.78
E = 11.46 EeV
-6000
-4000
-2000
0
2000
4000
-4000
-2000
0
2000
4000
57
55
19
14
40
35
16
58
26
21
43
45
48
65
46
44
53
63
64
31
70
67
38
34
61
33
52
66
51

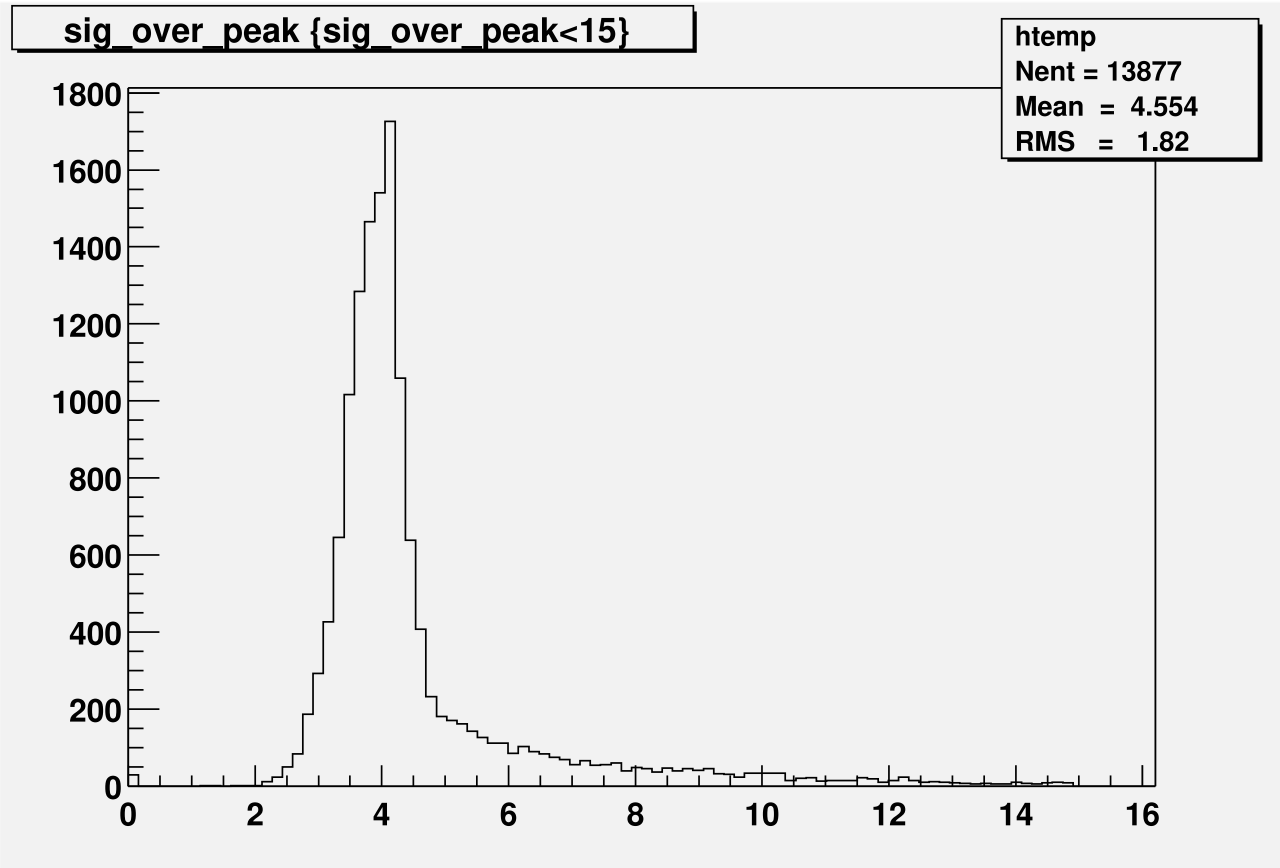
Coïncidence aléatoire de 3 cuves

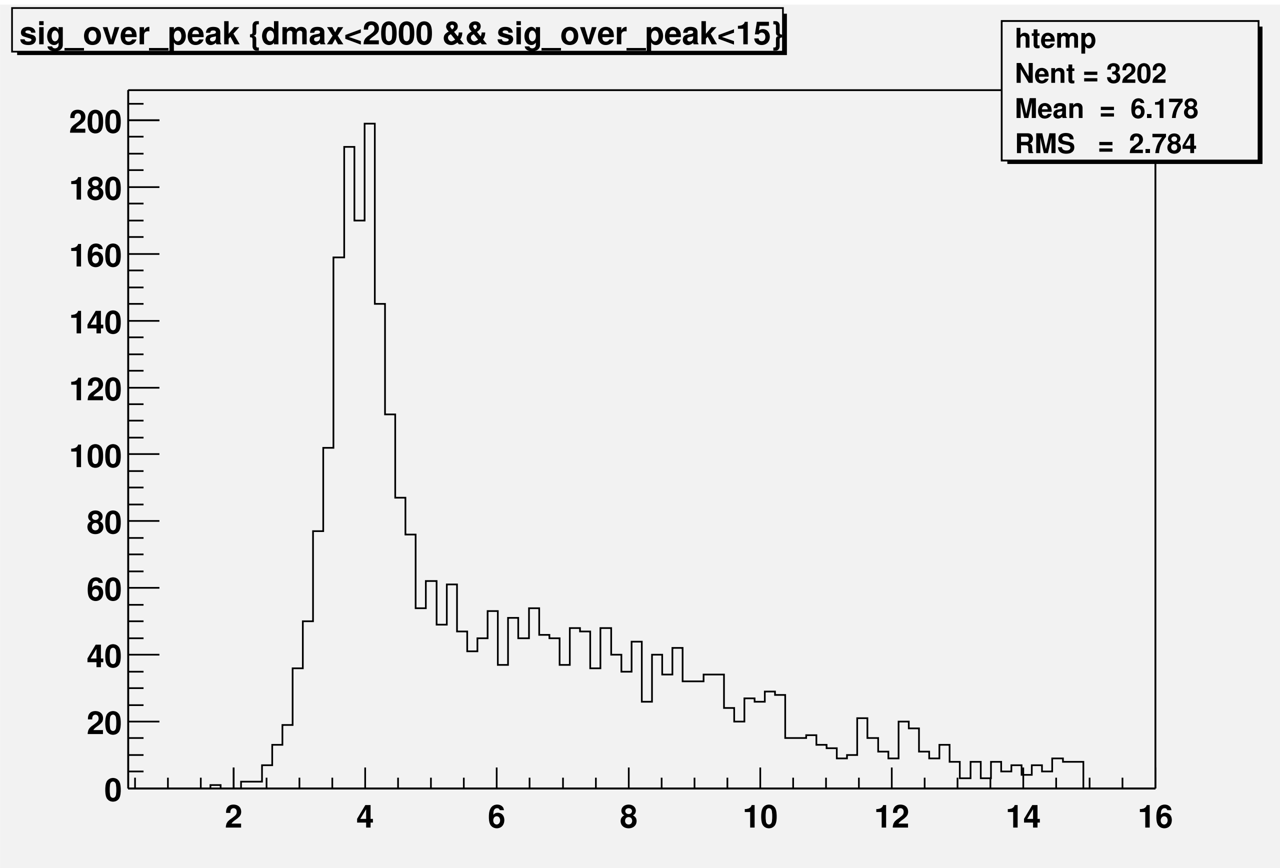


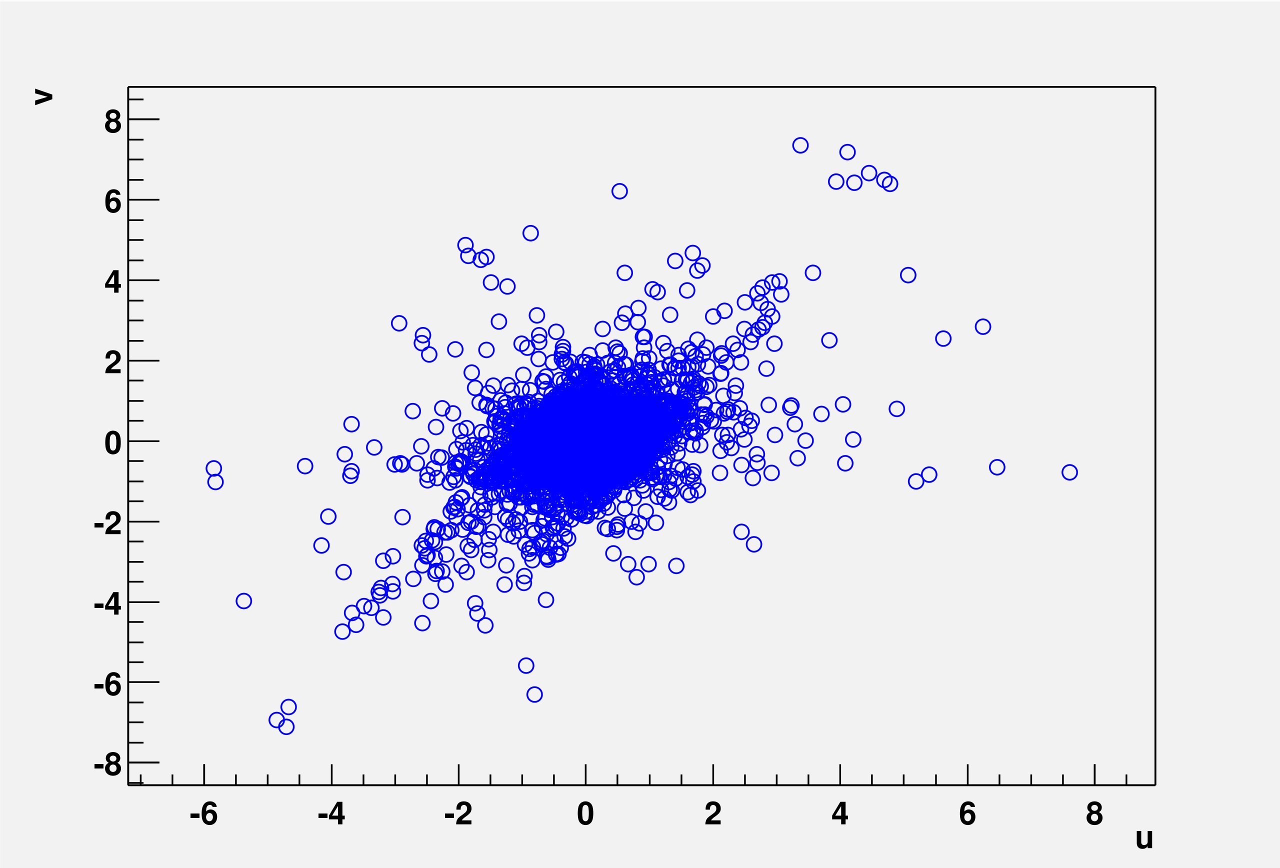

sig_over_peak {sig_over_peak<15}
htemp
Nent = 19014
Mean = 4.183
RMS = 1.095
2500
2000
1500
1000
500
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16

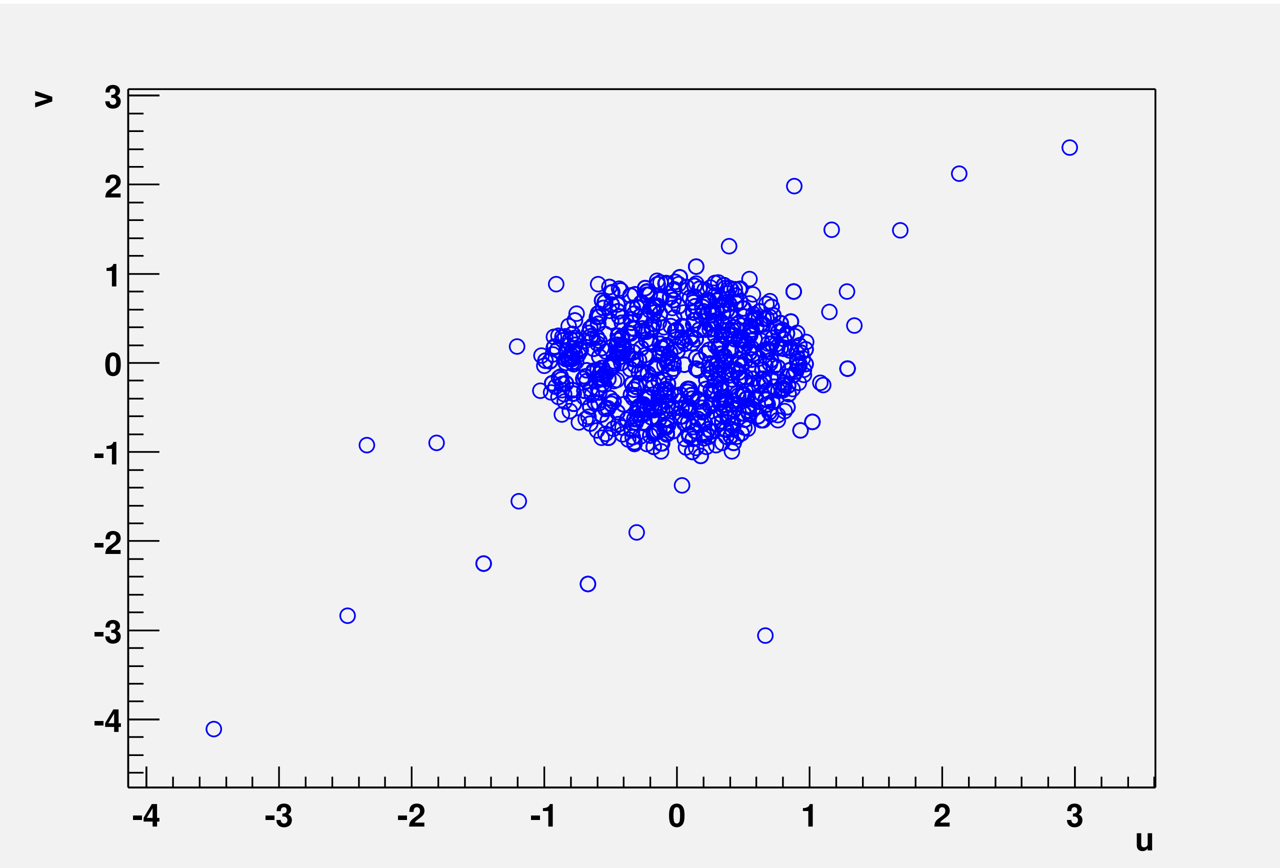
Evt 22474, 6 EeV, $\theta = 10°$, $\phi = 325°$

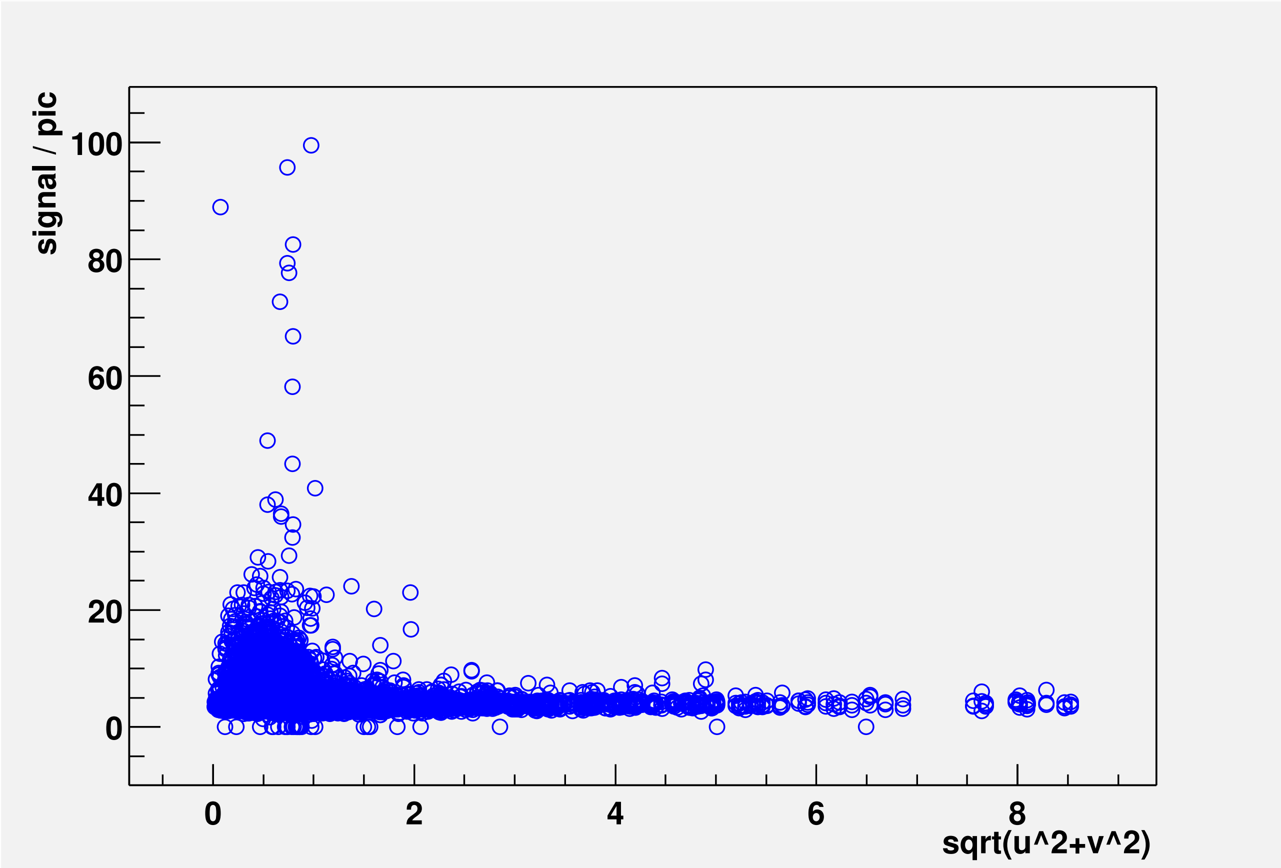


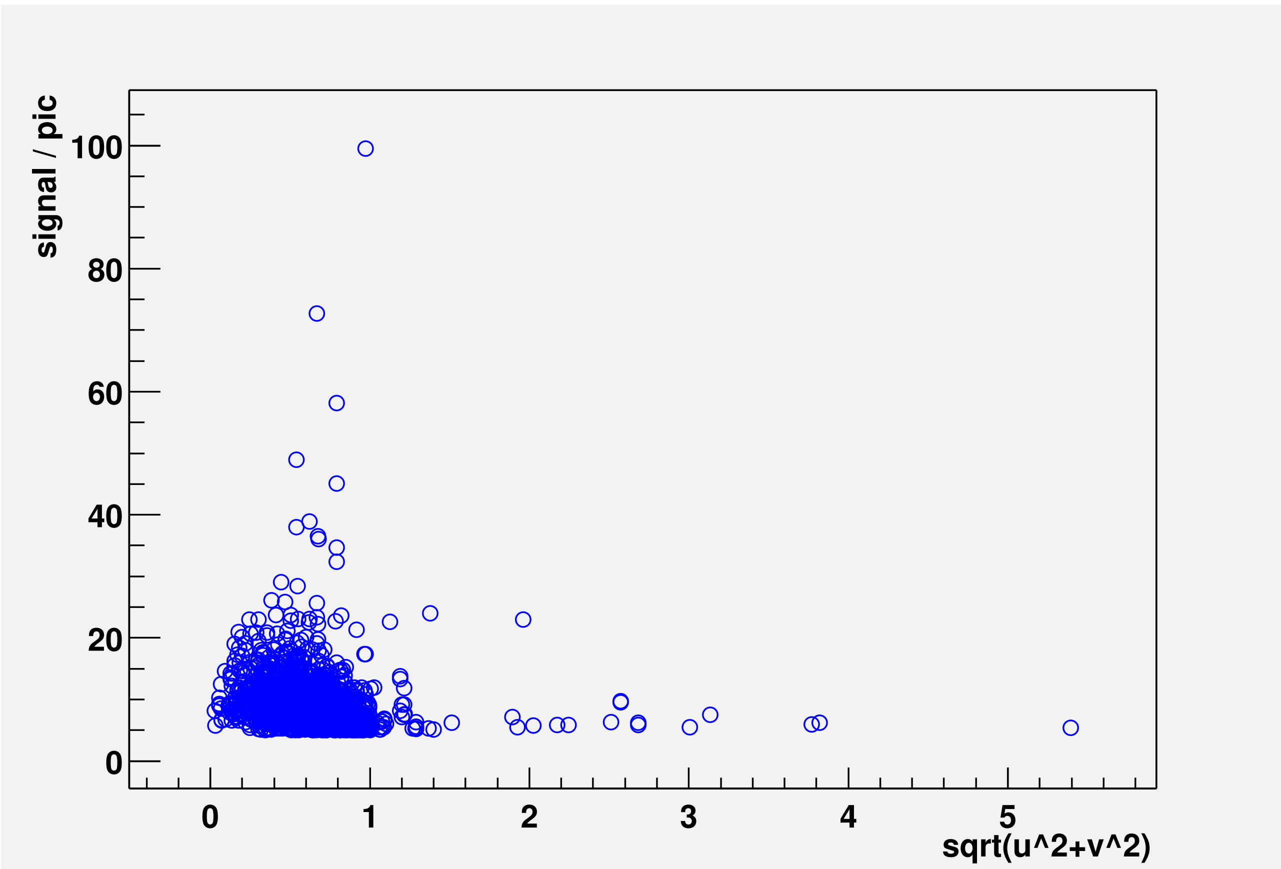

sig_over_peak {sig_over_peak<15}
htemp
Nent = 13877
Mean = 4.554
RMS = 1.82
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16

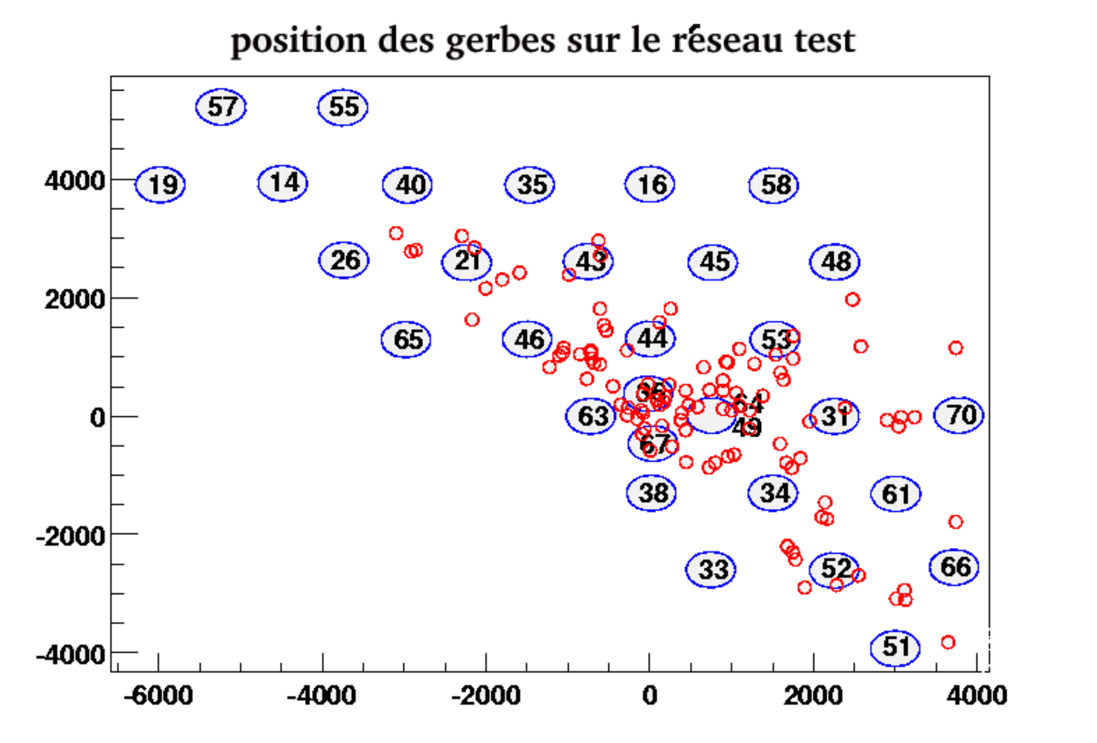

sig_over_peak {dmax<2000 && sig_over_peak<15}
htemp
Nent = 3202
Mean = 6.178
RMS = 2.784
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
2
4
6
8
10
12
14
16

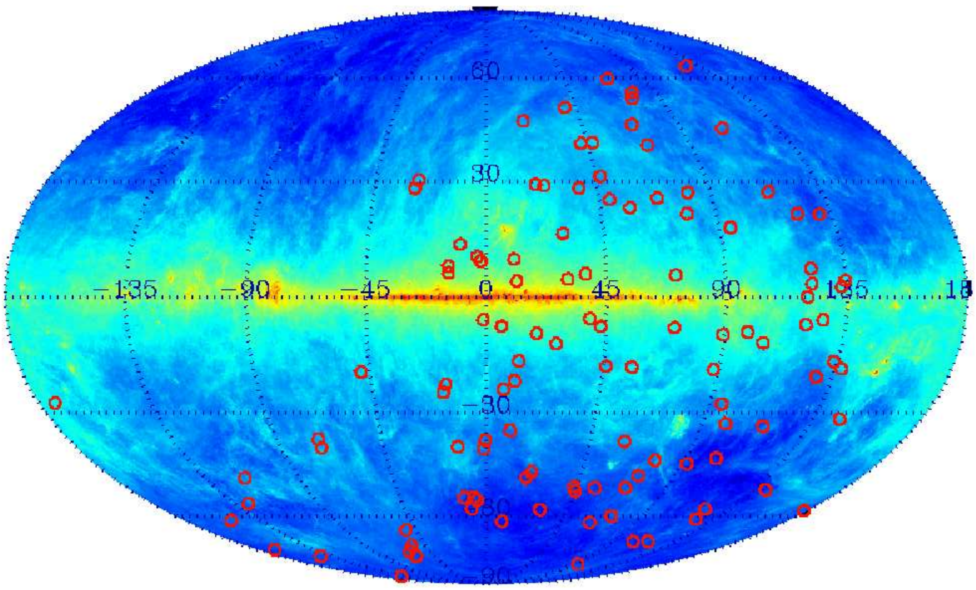

v
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
u

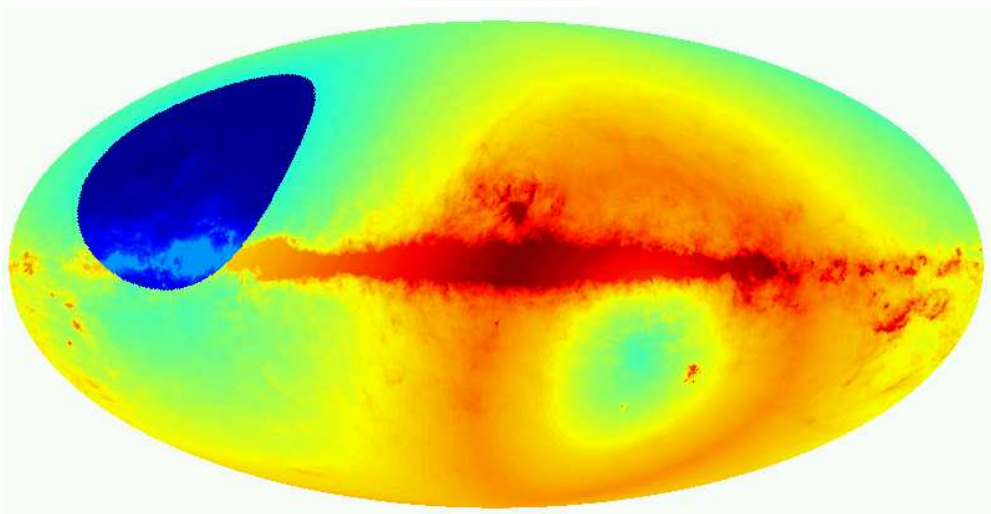

v
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
u

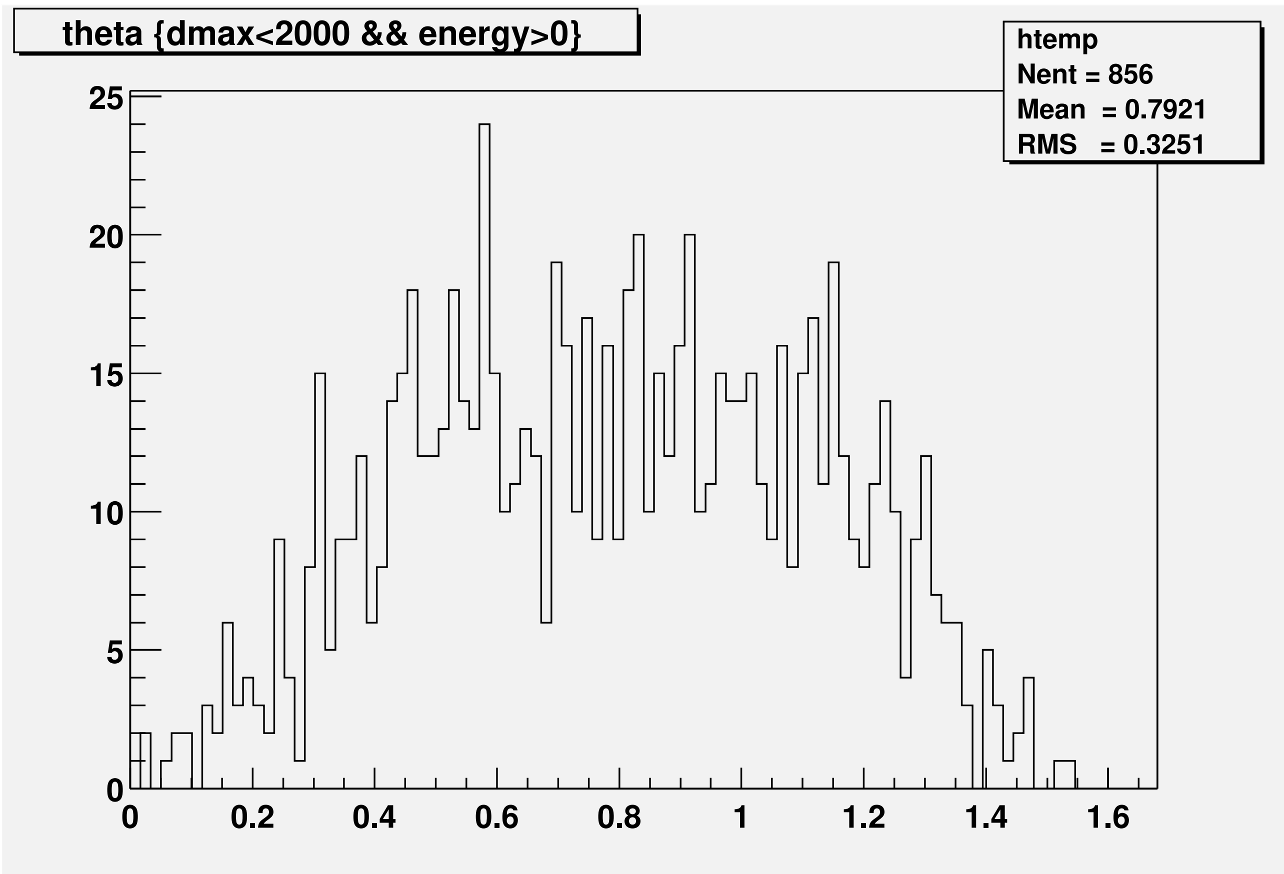

signal / pic
100
80
60
40
20
0
0
2
4
6
8
sqrt(u^2+v^2)

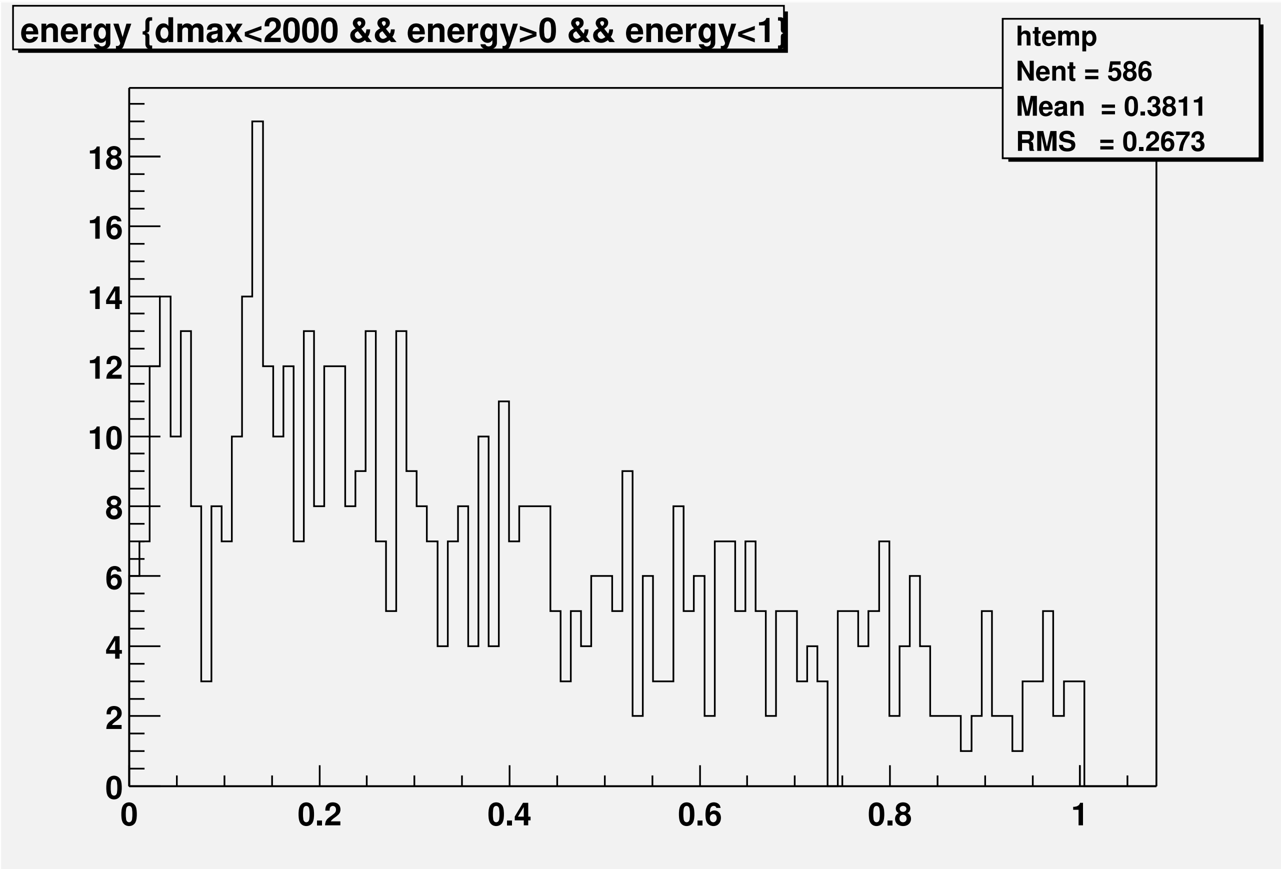

signal / pic
100
80
60
40
20
0
0
1
2
3
4
5
sqrt(u^2+v^2)

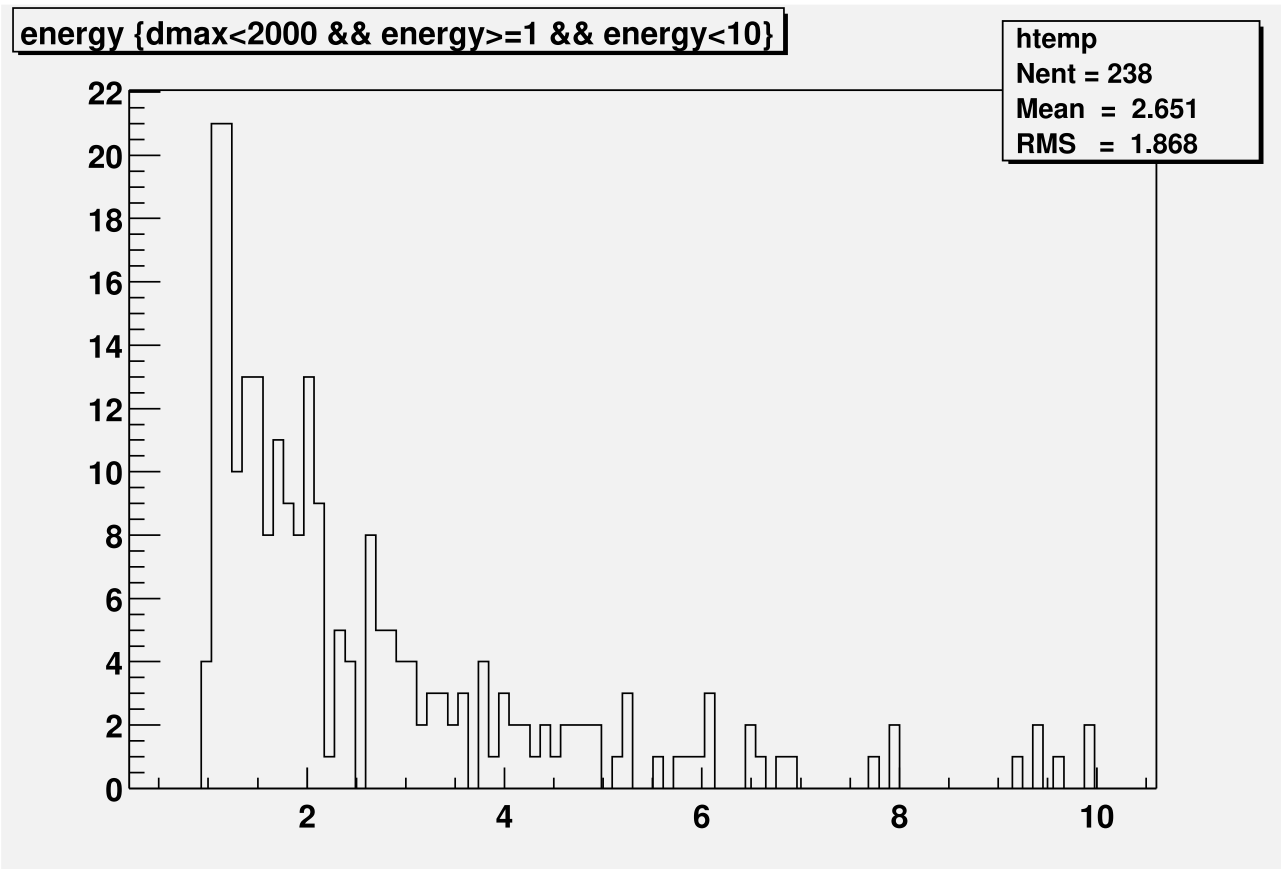

position des gerbes sur le réseau test
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
-4000
-2000
0
2000
4000
57
55
19
14
40
35
16
58
26
21
43
45
48
65
46
44
53
36
63
64
49
31
70
67
38
34
61
33
52
66
51

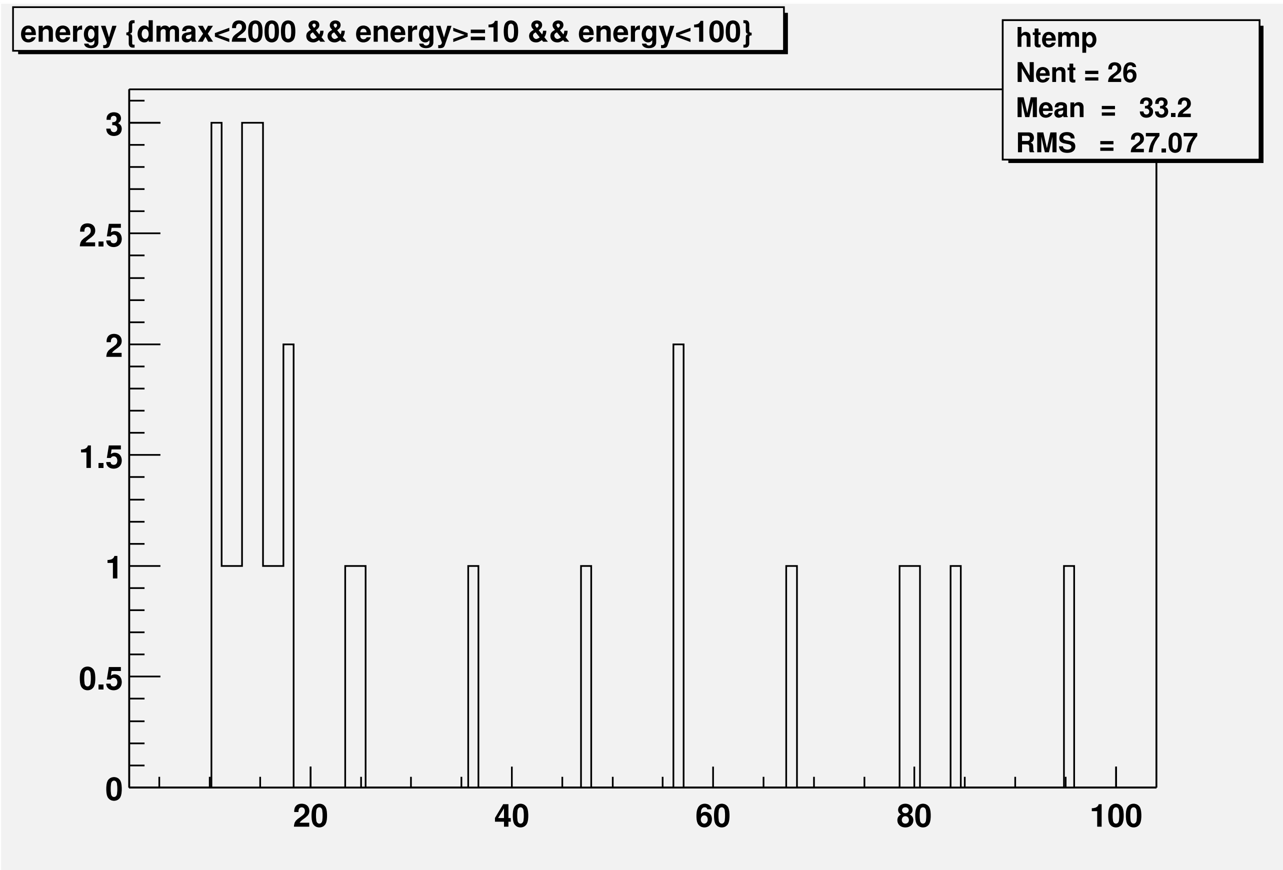

60
30
-135
-90
-45
0
45
90
135
-30




theta {dmax<2000 && energy>0}
htemp
Nent = 856
Mean = 0.7921
RMS = 0.3251
0
5
10
15
20
25
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6

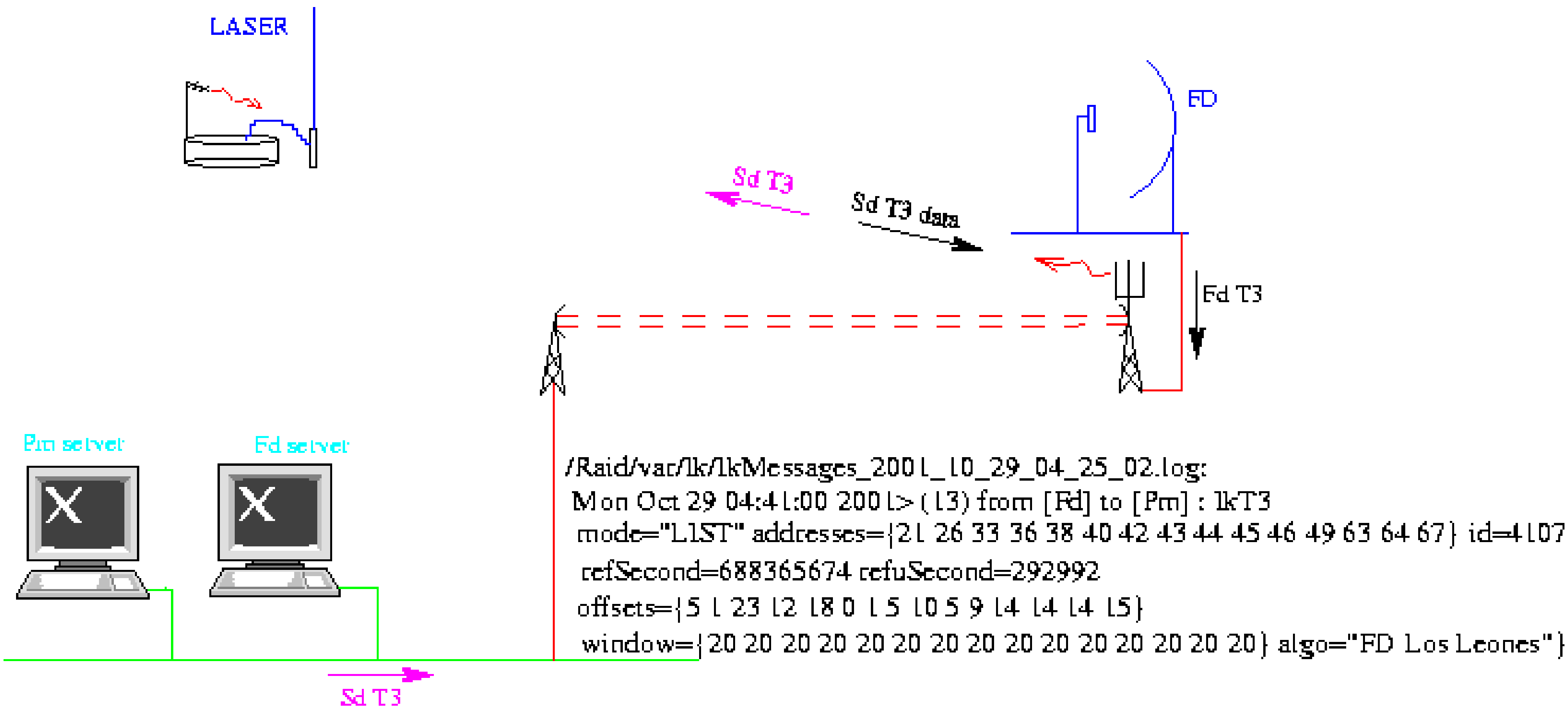

energy {dmax<2000 && energy>0 && energy<1}
htemp
Nent = 586
Mean = 0.3811
RMS = 0.2673
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1


energy {dmax<2000 && energy>=1 && energy<10}
htemp
Nent = 238
Mean = 2.651
RMS = 1.868
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
2
4
6
8
10

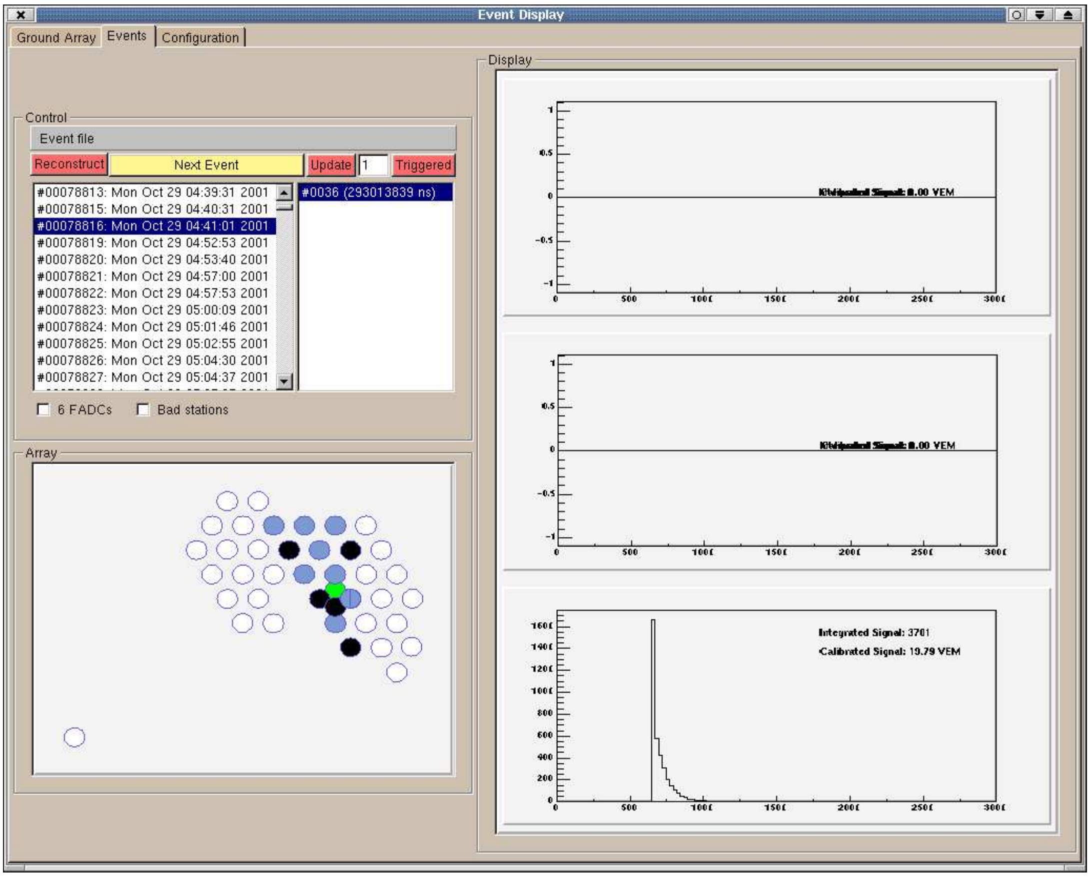


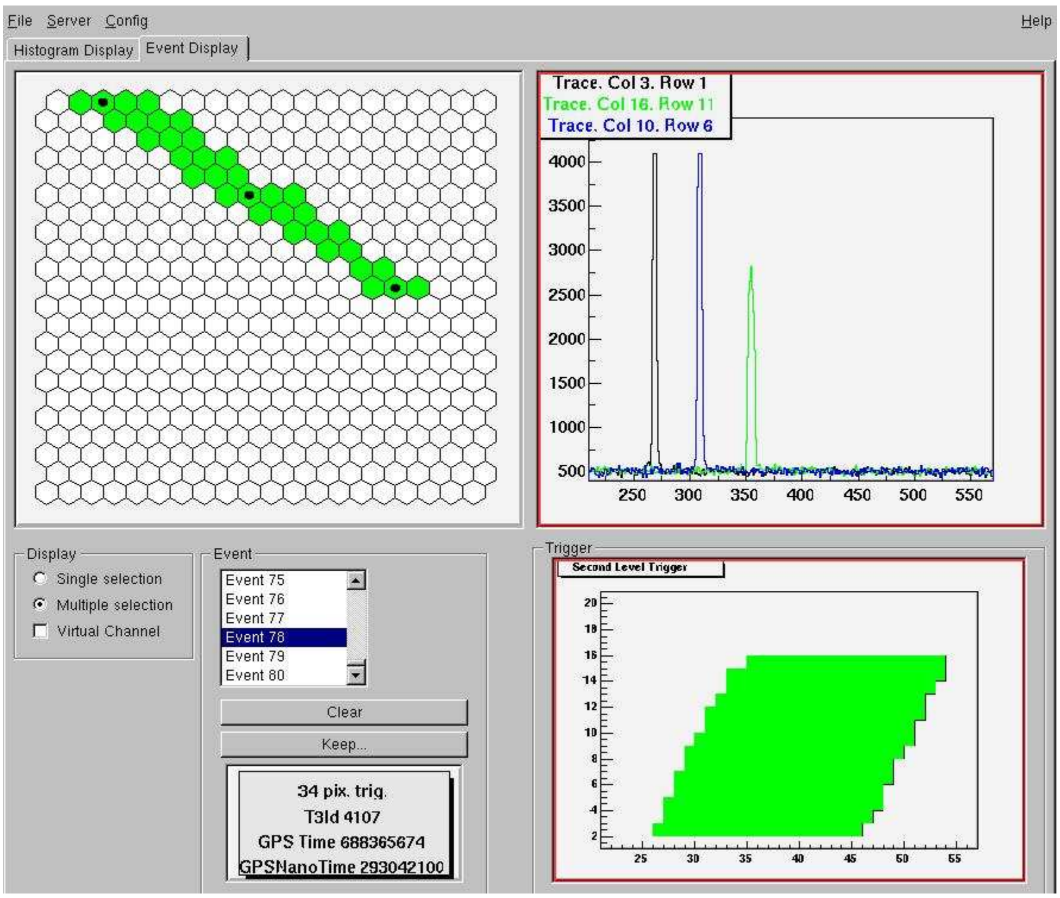
energy {dmax<2000 && energy>=10 && energy<100}
htemp
Nent = 26
Mean = 33.2
RMS = 27.07
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
20
40
60
80
100

Premier événement (artificiel) hybride

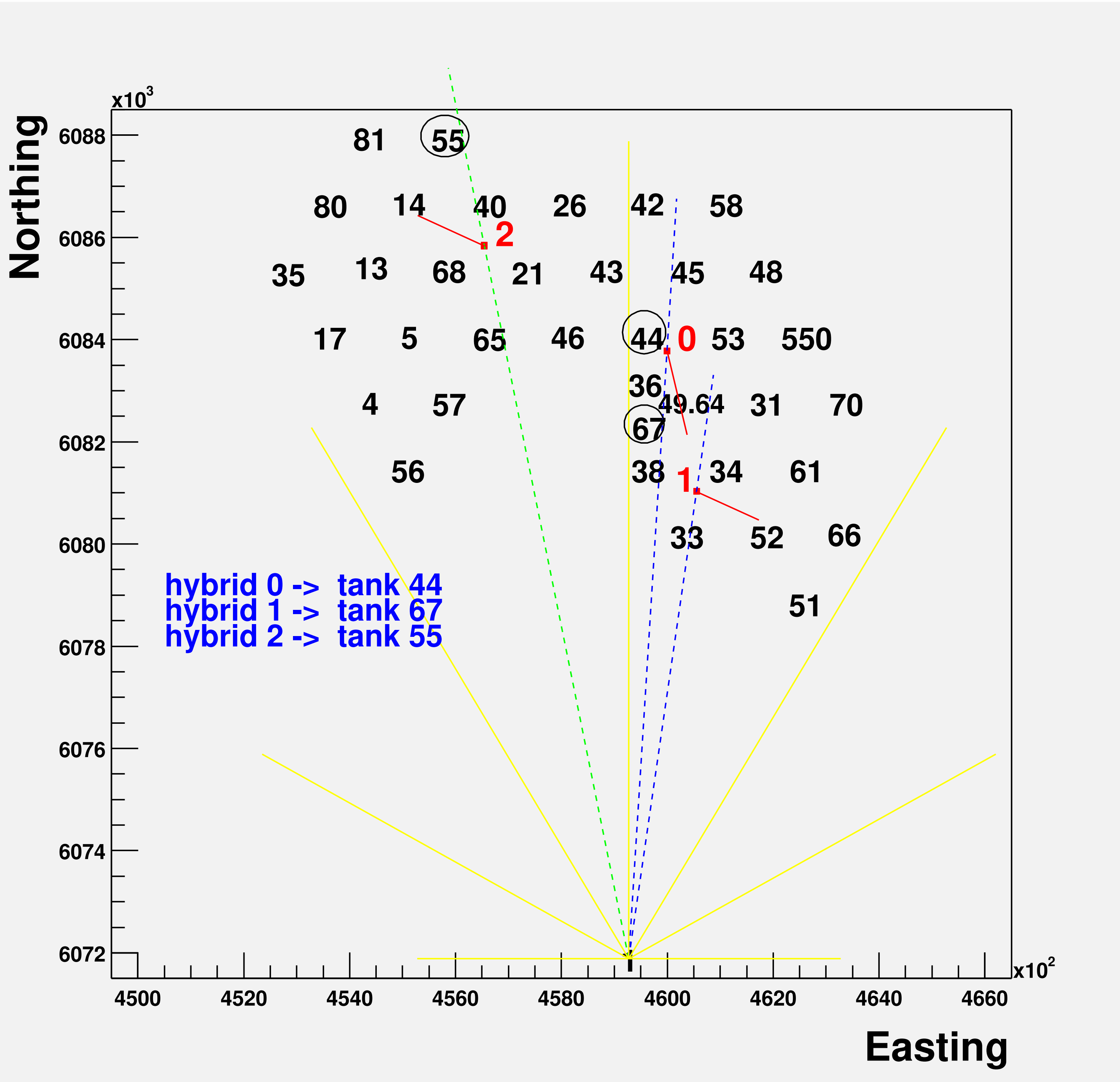


Premier événement (artificiel) hybride





Premiers événements hybrides (9/12)



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