

# Chapitre 4

## Recherche de sources ponctuelles

4.1 Introduction

4.2 La carte du ciel

4.3 Résolution angulaire

4.4 Recherche d'excès d'événements

4.5 Perspectives

## 4.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter l'échantillon final des événements de données expérimentales qui subsistent après le processus de réduction des données décrit au chapitre précédent. Une étude de la résolution angulaire du télescope à neutrinos AMANDA est réalisée, permettant ainsi de déterminer le pas du quadrillage approprié pour mener une recherche globale d'excès d'événements dans des régions restreintes du ciel. Cette recherche de la présence d'éventuelles sources ponctuelles est alors détaillée et commentée, pour aboutir enfin aux conclusions à tirer.

## 4.2 La carte du ciel

Les 2557 événements qui subsistent après le processus de réduction des données sont représentés dans une carte du ciel (cf. fig. 4.1), sur laquelle ont été également ajoutées quelques sources potentielles de neutrinos (cf. tableau 4.1).

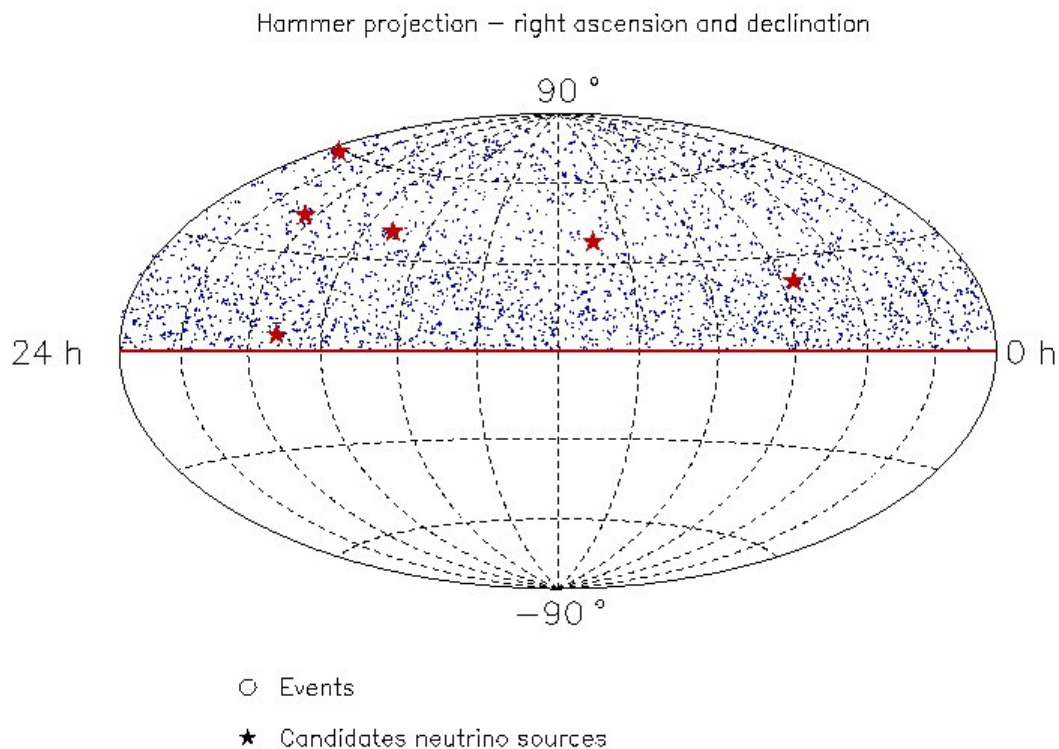


Fig. 4.1 : Distribution des 2557 événements de données expérimentales qui constituent notre échantillon final. La carte du ciel est dessinée en projection de Hammer et est repérée par le système des coordonnées équatoriales. Quelques sources de neutrinos potentielles ont été représentées également.

Source potentielle	Ascension droite (2000)	Déclinaison (2000)
Markarian 421	11,074 h	38,209°
Markarian 501	16,898 h	39,760°
La nébuleuse du Crabe	5,571 h	22,010°
Cassiopeia A	23,390 h	58,811°
SS 433	19,197 h	4,983°
Cygnus X-3	20,541 h	40,953°

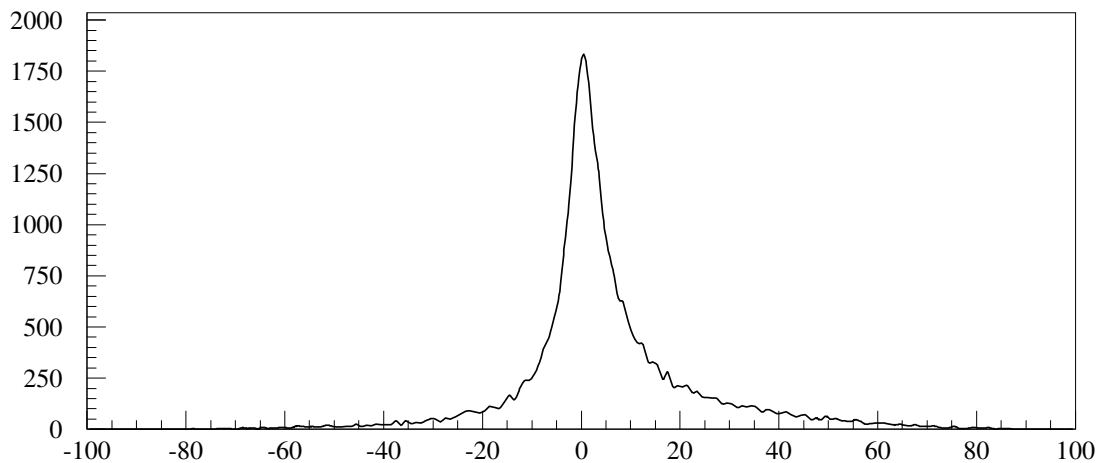
Tableau 4.1 : Coordonnées équatoriales des différentes sources potentielles de neutrinos représentées dans la fig. 4.1.

### 4.3 Résolution angulaire

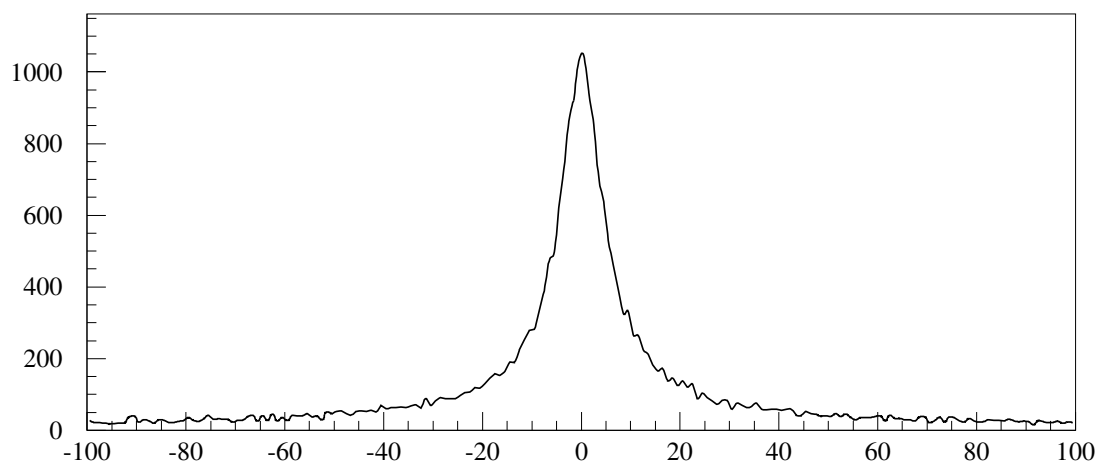
Au fur et à mesure que les coupures ont été appliquées aux données expérimentales, nous avons évalué la résolution angulaire d'AMANDA. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les échantillons d'événements de signal simulés (*signal MC*), à partir desquels nous avons établi les distributions des écarts angulaires (dans les directions zénithale et azimutale) entre neutrino incident et muon reconstruit par la méthode itérative (la plus précise). Les écarts entre angles zénithaux et azimutaux se répartissent suivant des distributions (cf. fig. 4.2 et 4.3) dont on a mesuré la largeur à mi-hauteur (« Full Width at Half Maximum » - FWHM). Ces valeurs sont rassemblées dans le tableau 4.2. L'étude de la résolution angulaire a été également menée pour trois régions du ciel équivalentes, définies par des intervalles égaux en les valeurs du cosinus de l'angle zénithal : la région du « nadir », comprise entre  $-1$  et  $-0,666$  (cf. tableau 4.3), la « région centrale », comprise entre  $-0,666$  et  $-0,333$  (cf. tableau 4.4), et enfin la région de « l'horizon », comprise entre  $-0,333$  et  $0$  (cf. tableau 4.5). Plusieurs constatations découlent de cette analyse :

Premièrement, la résolution angulaire s'améliore au fur et à mesure que l'on applique les différentes coupures. Aux premiers stades de la réduction des données, en effet, les distributions des différences entre valeurs réelles (simulées) et valeurs reconstruites sont larges et présentent des extensions non négligeables vers les grandes valeurs (cf. fig. 4.2). Par contre, après avoir effectué les 9 coupures présentées au tableau 3.5, les distributions sont nettement plus étroites et leurs extensions ont diminué de manière significative (cf. fig. 4.3). Ceci nous assure donc que l'on sélectionne bien des trajectoires de mieux en mieux reconstruites au cours du processus de réduction des données.

Il faut remarquer également que les largeurs à mi-hauteur des distributions des écarts angulaires entre neutrinos et muons reconstruits sont systématiquement plus élevées dans le cas des angles azimutaux que dans le cas des angles zénithaux. La résolution angulaire d'AMANDA en azimut est donc moins bonne que la résolution angulaire en angle zénithal, et il faudra en tenir compte dans la recherche des sources ponctuelles.

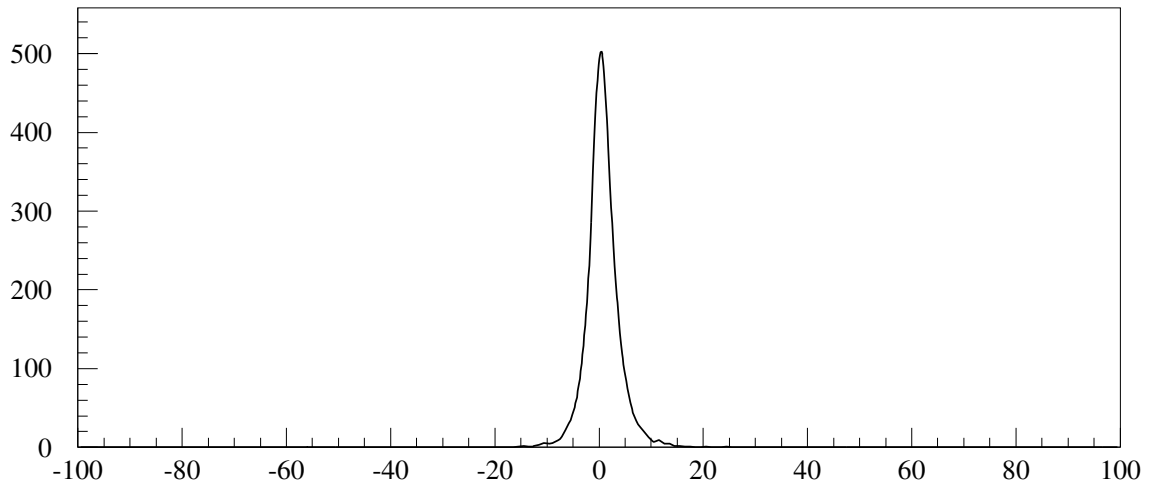


Distribution de zenith(6)-truezen ( $^{\circ}$ ) après 1 coupure

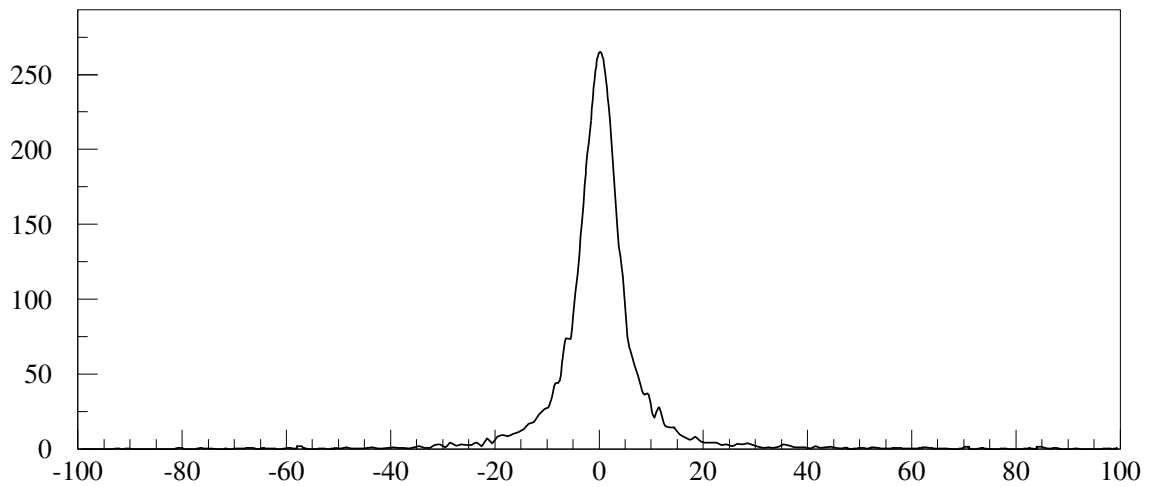


Distribution de azimuth(6)-trueazimuth ( $^{\circ}$ ) après 1 coupure

Fig. 4.2 : Distributions des écarts angulaires entre neutrino incident et muon reconstruit dans les directions zénithale (en haut) et azimutale (en bas) pour le ciel complet et après avoir effectué une seule coupure. Les largeurs à mi-hauteur (FWHM) valent respectivement  $8,2^{\circ}$  et  $10,8^{\circ}$  pour les angles zénithaux et les angles azimutaux ; les valeurs moyennes s'élèvent à  $4,9^{\circ}$  et  $-0,2^{\circ}$ , tandis que les valeurs du RMS sont  $17,77^{\circ}$  et  $30,89^{\circ}$ . Les unités utilisées pour l'axe des ordonnées sont arbitraires.



Distribution de zenith(6)-truezen (°) après 9 coupures



Distribution de azimuth(6)-trueazimuth (°) après 9 coupures

Fig. 4.3 : Distributions des écarts angulaires entre neutrino incident et muon reconstruit dans les directions zénithale (en haut) et azimutale (en bas) pour le ciel complet et après avoir effectué 9 coupures. Les largeurs à mi-hauteur (FWHM) valent respectivement  $4,4^\circ$  et  $7,6^\circ$  pour les angles zénithaux et les angles azimutaux ; les valeurs moyennes s'élèvent à  $0,7^\circ$  et  $0,2^\circ$ , tandis que les valeurs du RMS sont  $3,5^\circ$  et  $11,2^\circ$ . Les unités utilisées pour l'axe des ordonnées sont arbitraires.

<b>Ciel complet</b>	<b>FWHM (°) zenith(6)-truezenith</b>	<b>FWHM (°) azimuth(6)-trueazimuth</b>
Après 1 coupure	8,2	10,8
Après 2 coupures	7,6	10,1
Après 3 coupures	7,0	9,5
Après 4 coupures	5,7	8,9
Après 5 coupures	5,7	8,9
Après 6 coupures	5,1	8,2
Après 7 coupures	4,4	7,6
Après 8 coupures	4,4	7,6
<b>Après 9 coupures</b>	<b>4,4</b>	<b>7,6</b>

Tableau 4.2 : Largeurs à mi-hauteur des distributions des écarts angulaires entre neutrino incident et muon reconstruit dans les directions zénithale (zenith(6)-truezenith) et azimutale (azimuth(6)-trueazimuth) pour le ciel complet.

<b>Nadir -1&lt;cos(zenith(6))&lt;-0.666</b>	<b>FWHM (°) zenith(6)-truezenith</b>	<b>FWHM (°) azimuth(6)-trueazimuth</b>
Après 1 coupure	7,6	14,6
Après 2 coupures	7,0	12,0
Après 3 coupures	6,3	10,1
Après 4 coupures	5,1	10,1
Après 5 coupures	5,1	9,5
Après 6 coupures	4,4	8,9
Après 7 coupures	3,8	8,9
Après 8 coupures	3,8	8,9
<b>Après 9 coupures</b>	<b>3,8</b>	<b>8,9</b>

Tableau 4.3 : Largeurs à mi-hauteur des distributions des écarts angulaires entre neutrino incident et muon reconstruit dans les directions zénithale (zenith(6)-truezenith) et azimutale (azimuth(6)-trueazimuth) pour la région du nadir.

<b>Région centrale</b> <b>-0.666&lt;cos(zenith(6))&lt;-0.333</b>	<b>FWHM (°)</b> <b>zenith(6)-truezenith</b>	<b>FWHM (°)</b> <b>azimuth(6)-trueazimuth</b>
Après 1 coupure	8,9	11,4
Après 2 coupures	7,6	10,1
Après 3 coupures	7,0	9,5
Après 4 coupures	6,3	8,2
Après 5 coupures	6,3	8,2
Après 6 coupures	5,1	7,6
Après 7 coupures	5,1	7,0
Après 8 coupures	5,1	7,0
<b>Après 9 coupures</b>	<b>5,1</b>	<b>7,0</b>

Tableau 4.4 : Largeurs à mi-hauteur des distributions des écarts angulaires entre neutrino incident et muon reconstruit dans les directions zénithale (zenith(6)-truezenith) et azimutale (azimuth(6)-trueazimuth) pour la région centrale.

<b>Horizon</b> <b>-0.333&lt;cos(zenith(6))&lt;0</b>	<b>FWHM (°)</b> <b>zenith(6)-truezenith</b>	<b>FWHM (°)</b> <b>azimuth(6)-trueazimuth</b>
Après 1 coupure	8,9	10,1
Après 2 coupures	7,6	8,9
Après 3 coupures	7,0	8,2
Après 4 coupures	6,3	7,6
Après 5 coupures	6,3	7,6
Après 6 coupures	5,1	7,0
Après 7 coupures	5,1	7,0
Après 8 coupures	5,1	7,0
<b>Après 9 coupures</b>	<b>5,1</b>	<b>7,0</b>

Tableau 4.5 : Largeurs à mi-hauteur des distributions des écarts angulaires entre neutrino incident et muon reconstruit dans les directions zénithale (zenith(6)-truezenith) et azimutale (azimuth(6)-trueazimuth) pour la région de l'horizon.

Enfin, on constate que la résolution angulaire est tout à fait semblable à l'horizon et dans la région centrale du ciel, mais diffère au niveau du nadir. Dans cette région, la résolution angulaire en angle zénithal est meilleure, tandis que la résolution en azimut est moins bonne que dans les autres parties du ciel.

Pour effectuer la recherche d'excès d'événements dans des régions restreintes du ciel, on est amené à diviser celui-ci en une série de cellules (appelées également « bins ») dont l'extension est en relation avec la résolution angulaire du télescope. Dans ce travail, nous avons divisé le ciel de l'hémisphère nord en cellules rectangulaires sous-tendant les mêmes angles solides. Il est important de connaître l'efficacité de détection du signal en fonction des dimensions de ces cellules subdivisant le ciel. Nous avons déterminé celle-ci au moyen des distributions présentées à la figure 4.3, en fonction de différentes largeurs de cellules rectangulaires à la fois en angle zénithal et en angle azimutal. Les différentes valeurs obtenues sont présentées au tableau 4.6, dans le cas du ciel complet, et aux tableaux 4.7, 4.8, et 4.9 dans le cas des 3 sous-régions définies ci-dessus (nadir, région centrale et horizon).

Ciel complet (Après 9 coupures)	Extension en angle zénithal – efficacité de détection du signal	Extension en angle azimutal – efficacité de détection du signal
1,0 HWHM	2,2° = 61% du signal	3,8° = 56% du signal
1,5 HWHM	3,3° = 77% du signal	5,7° = 69% du signal
2,0 HWHM	4,4° = 86% du signal	7,6° = 77% du signal
2,5 HWHM	5,5° = 91% du signal	9,5° = 82% du signal
3,0 HWHM	6,6° = 94% du signal	11,4° = 86% du signal
3,5 HWHM	7,7° = 96% du signal	13,3° = 89% du signal
4,0 HWHM	8,8° = 97% du signal	15,2° = 90% du signal

Tableau 4.6 : Efficacité de détection du signal en fonction de l'extension choisie en angle zénithal et azimutal pour les cellules subdivisant le ciel tout entier. La première colonne présente les extensions des cellules en termes de multiples de la demi largeur à mi-hauteur (Half Width at Half Maximum - HWHM) des distributions présentées à la fig. 4.3. Remarquons que pour obtenir l'efficacité de détection du signal dans une cellule rectangulaire, il faut multiplier les efficacités de détection à la fois pour les angles zénithaux et pour les angles azimutaux. Par exemple, pour une cellule de 8,8° d'extension en angle zénithal et 15,2° d'extension en angle azimutal, l'efficacité de détection du signal vaut en réalité  $0,97 \cdot 0,90 = 0,873$ .



NADIR (Après 9 coupures)	Extension en angle zénithal – efficacité de détection du signal	Extension en angle azimutal – efficacité de détection du signal
1.0 HWHM	1.9° = 60% du signal	4.5° = 52% du signal
1.5 HWHM	2.9° = 75% du signal	6.7° = 65% du signal
2.0 HWHM	3.8° = 84% du signal	8.9° = 72% du signal
2.5 HWHM	4.8° = 90% du signal	11.1° = 77% du signal
3.0 HWHM	5.7° = 93% du signal	13.4° = 81% du signal
3.5 HWHM	6.7° = 95% du signal	15.6° = 84% du signal
4.0 HWHM	7.6° = 97% du signal	17.8° = 86% du signal

Tableau 4.7 : Efficacité de détection du signal en fonction de l'extension choisie en angle zénithal et azimutal pour les cellules subdivisant la région du nadir.

REGION CENTRALE (Après 9 coupures)	Extension en angle zénithal – efficacité de détection du signal	Extension en angle azimutal – efficacité de détection du signal
1.0 HWHM	2.6° = 66% du signal	3.5° = 61% du signal
1.5 HWHM	3.8° = 81% du signal	5.3° = 75% du signal
2.0 HWHM	5.1° = 89% du signal	7.0° = 83% du signal
2.5 HWHM	6.4° = 94% du signal	8.8° = 89% du signal
3.0 HWHM	7.7° = 96% du signal	10.5° = 92% du signal
3.5 HWHM	8.9° = 98% du signal	12.3° = 94% du signal
4.0 HWHM	/	/

Tableau 4.8 : Efficacité de détection du signal en fonction de l'extension choisie en angle zénithal et azimutal pour les cellules subdivisant la région centrale du ciel.

HORIZON (Après 9 coupures)	Extension en angle zénithal – efficacité de détection du signal	Extension en angle azimutal – efficacité de détection du signal
1.0 HWHM	2.6° = 63% du signal	3.5° = 59% du signal
1.5 HWHM	3.8° = 78% du signal	5.3° = 74% du signal
2.0 HWHM	5.1° = 87% du signal	7.0° = 82% du signal
2.5 HWHM	6.4° = 92% du signal	8.8° = 88% du signal
3.0 HWHM	7.7° = 95% du signal	10.5° = 91% du signal
3.5 HWHM	8.9° = 97% du signal	12.3° = 94% du signal
4.0 HWHM	/	/

Tableau 4.9 : Efficacité de détection du signal en fonction de l'extension choisie en angle zénithal et azimutal pour les cellules subdivisant la région proche de l'horizon.

Une autre possibilité pour caractériser la résolution angulaire d'AMANDA consiste à calculer « l'angle spatial », défini par

$$\psi = \arccos[\cos(\theta_\mu)\cos(\theta_\nu) + \sin(\theta_\mu)\sin(\theta_\nu)\cos(\phi_\mu - \phi_\nu)], \quad (4.1)$$

où  $\theta_\mu$  et  $\theta_\nu$  sont respectivement les valeurs reconstruites et réelles (simulées) de l'angle zénithal, tandis que  $\phi_\mu$  et  $\phi_\nu$  sont respectivement les valeurs reconstruites et réelles (simulées) de l'angle azimutal.

L'angle spatial  $\psi$  représente en fait l'angle séparant la trajectoire reconstruite de la trajectoire réelle en tenant compte à la fois de l'erreur sur l'angle azimutal et l'angle zénithal (cf. fig. 4.4).

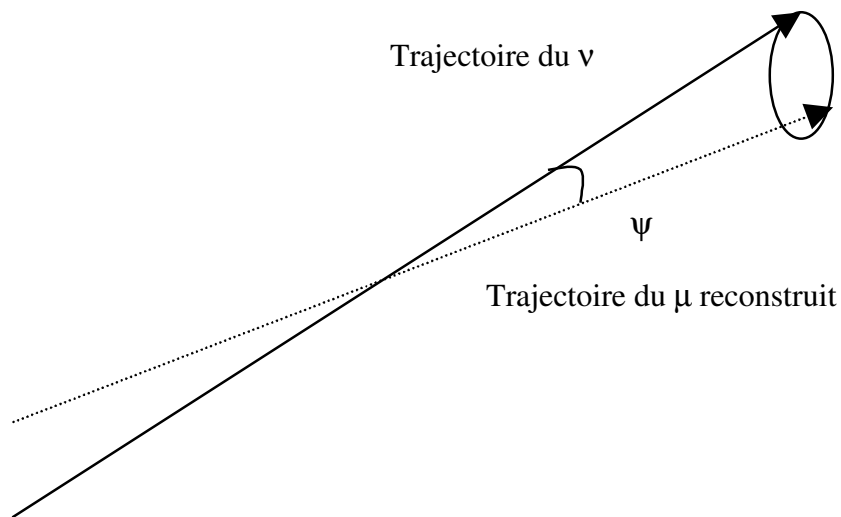
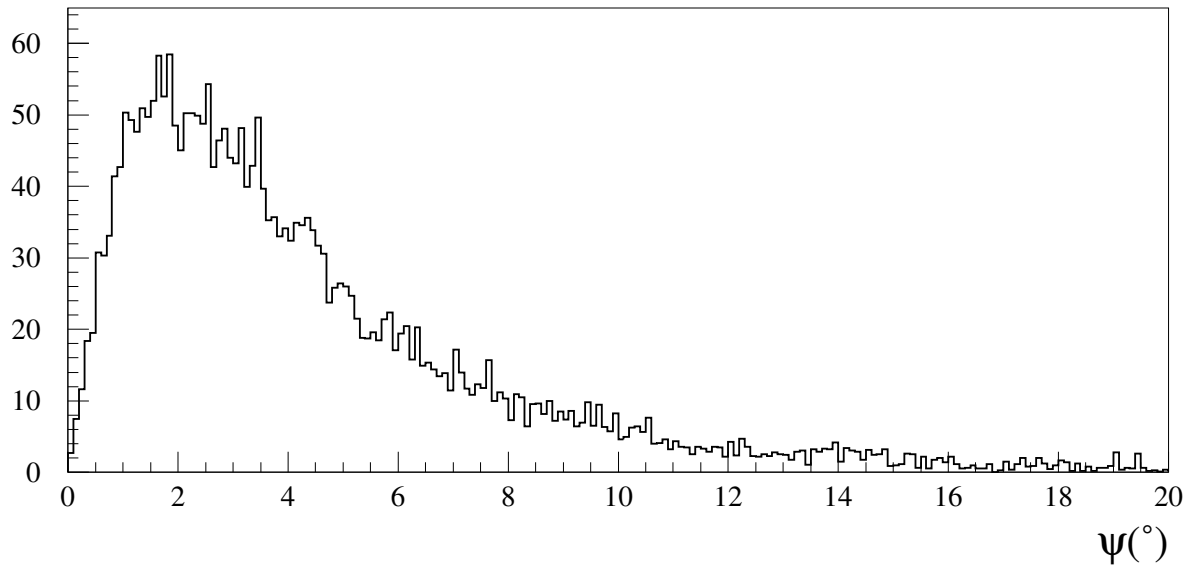
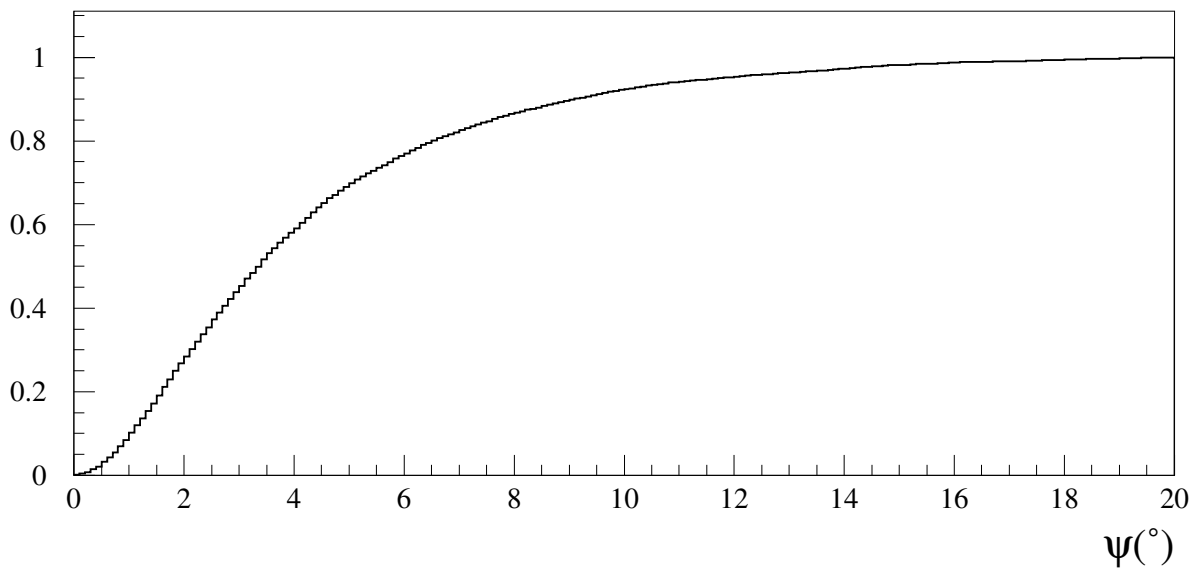


Fig. 4.4 : Illustration de la notion d'angle spatial.

La distribution des valeurs de l'angle spatial  $\psi$  pour l'échantillon de données expérimentales final (c'est-à-dire après avoir effectué les 9 coupures) est présentée à la figure 4.5. Dans cette figure, on a également représenté la courbe intégrée et normalisée à 1 de cette distribution. Cette courbe donne directement la fraction d'événements de signal détecté en fonction de l'ouverture d'une cellule circulaire centrée sur une source ponctuelle hypothétique. Le tableau 4.10 donne l'ouverture qu'il faut imposer aux cellules circulaires pour retenir différentes fractions du signal.



Distribution de l'angle spatial (après 9 coupures)



Courbe intégrée

Fig. 4.5 : Distribution des valeurs de l'angle spatial  $\psi$  pour l'échantillon final (après 9 coupures). La figure du bas représente la courbe intégrée et normalisée permettant de calculer la fraction d'événements de signal détecté.

Pourcentage du signal détecté	Ouverture de la cellule circulaire (ciel complet)	Ouverture de la cellule circulaire (nadir)	Ouverture de la cellule circulaire (centre)	Ouverture de la cellule circulaire (horizon)
50%	3,4° (S.Y.= 3,9°)	3,1°	3,5°	4,1°
75%	5,8°	5,4°	5,8°	6,6°
90%	9,2°	8,9°	9,0°	9,9°
95%	11,8°	11,8°	11,1°	12,4°

Tableau 4.10 : Valeurs de l'ouverture qu'il faut imposer aux cellules circulaires pour retenir 50%, 75%, 90% ou 95% du signal. Ces valeurs sont calculées pour le ciel complet ainsi que les 3 régions particulières (nadir, centre, horizon). Il faut remarquer que dans l'analyse effectuée par Scott Young (Young, 2001), il fallait imposer une ouverture de 3,9° pour détecter 50% du signal, alors que dans ce travail, l'ouverture à imposer est de 3,4° pour détecter la même fraction de signal. Ceci résulte de l'amélioration portée ultérieurement à l'algorithme de reconstruction des muons.

## 4.4 Recherche d'excès d'événements

### 4.4.1 Principe de la méthode

L'inspection visuelle de la carte du ciel présentant notre échantillon de données expérimentales final ne révèle pas d'accumulations particulières d'événements. Dans le but de procéder à une recherche quantitative de sources ponctuelles de neutrinos de haute énergie dans l'hémisphère nord, nous avons divisé le ciel en une série de cellules (« bins ») rectangulaires sous-tendant approximativement des angles solides égaux. Dans ces conditions, la présence d'une source ponctuelle serait révélée par une accumulation statistiquement significative d'événements dans une cellule du ciel donnée.

### 4.4.2 Procédure suivie

En vue de bénéficier de la plus grande efficacité de détection du signal moyennant un bruit de fond acceptable (cf. tableau 4.6), nous avons décidé de découper le ciel en cellules rectangulaires dont l'extension en angle zénithal est de 9°. L'hémisphère nord a donc été subdivisé en 10 tranches de 9° d'extension en déclinaison<sup>1</sup>. L'extension en azimut qui a été choisie au niveau de l'horizon est de 15°, ce qui correspond à une extension en ascension droite de 1h. Afin que le ciel soit divisé en cellules sous-tendant le même angle solide, l'extension en azimut (ascension droite) a été adaptée pour les cellules appartenant aux 8 autres tranches de déclinaison. La bande de déclinaison voisine de l'horizon ( $0^\circ < \delta < 9^\circ$ ) comprend ainsi 24 cellules (dont l'extension en ascension droite vaut 1h) et celle dont la déclinaison est comprise entre 81° et 90° en comptabilise 2. Le ciel de l'hémisphère nord est ainsi divisé en 154 cellules sous-tendant chacune approximativement un angle solide de  $4,08 \cdot 10^{-2}$  stéradian.

<sup>1</sup> L'extension en angle zénithal est égale à l'extension en déclinaison.

Pour chaque cellule, on calcule « l'indice d'excès »  $\xi$  (également appelé « signficance » dans la suite), défini par

$$\xi = -\log_{10}(P) \quad (4.2)$$

où

$$P = \sum_{n=N_0}^{\infty} \frac{e^{-\mu} \mu^n}{n!} \quad (4.3)$$

est la probabilité d'excès, c'est-à-dire la probabilité que la cellule contienne au moins le nombre d'événements observés,  $N_0$ , en supposant que les fluctuations statistiques sont décrites par la distribution de Poisson pour un nombre d'événements moyen attendu,  $\mu$ . Celui-ci est obtenu en prenant la moyenne du nombre d'événements observés dans toutes les autres cellules appartenant à la même tranche de déclinaison que la cellule considérée. L'indice d'excès  $\xi$  est donc un estimateur statistique qui prend des valeurs d'autant plus élevées que la probabilité d'observer au moins  $N_0$  événements est petite sachant que la moyenne des événements observés vaut  $\mu$ .

Remarquons que la situation géographique privilégiée d'AMANDA assure une couverture du ciel identique pour toutes les tranches de déclinaison, indépendante de toute interruption se produisant durant la collecte des données expérimentales.

La figure 4.6 présente la distribution du nombre de cellules en fonction de l'indice d'excès  $\xi$  pour les données expérimentales et pour un bruit de fond (background) aléatoire. Ce bruit de fond est obtenu en rendant aléatoire les ascensions droites des événements de données expérimentales, le but de cette opération étant de détruire toute corrélation entre les ascensions droites et les déclinaisons (des événements de données expérimentales), afin d'annihiler toute trace de présence d'un signal provenant d'une source ponctuelle<sup>2</sup>. Les indices d'excès  $\xi$  ont été recalculés pour chaque cellule à partir de cette distribution de background aléatoire. Un signal de source ponctuelle se manifesterait par l'observation d'un excès significatif de cellules caractérisées par un indice d'excès élevé, le signal de source ponctuelle se trouvant dans une ou plusieurs de ces cellules.

Afin d'éviter le problème dû à la présence éventuelle d'une source ponctuelle située à cheval sur deux cellules, nous avons répété la procédure décrite ci-dessus en décalant les cellules de 30' en ascension droite, puis en les décalant de 30' en ascension droite et 4,5° en déclinaison. Les distributions du nombre de cellules en fonction de l'indice d'excès sont présentées aux figures 4.7 et 4.8.

---

<sup>2</sup> Dans ce travail, nous avons obtenu notre échantillon aléatoire en répétant 100 fois le processus et en prenant la moyenne des résultats ainsi obtenus.

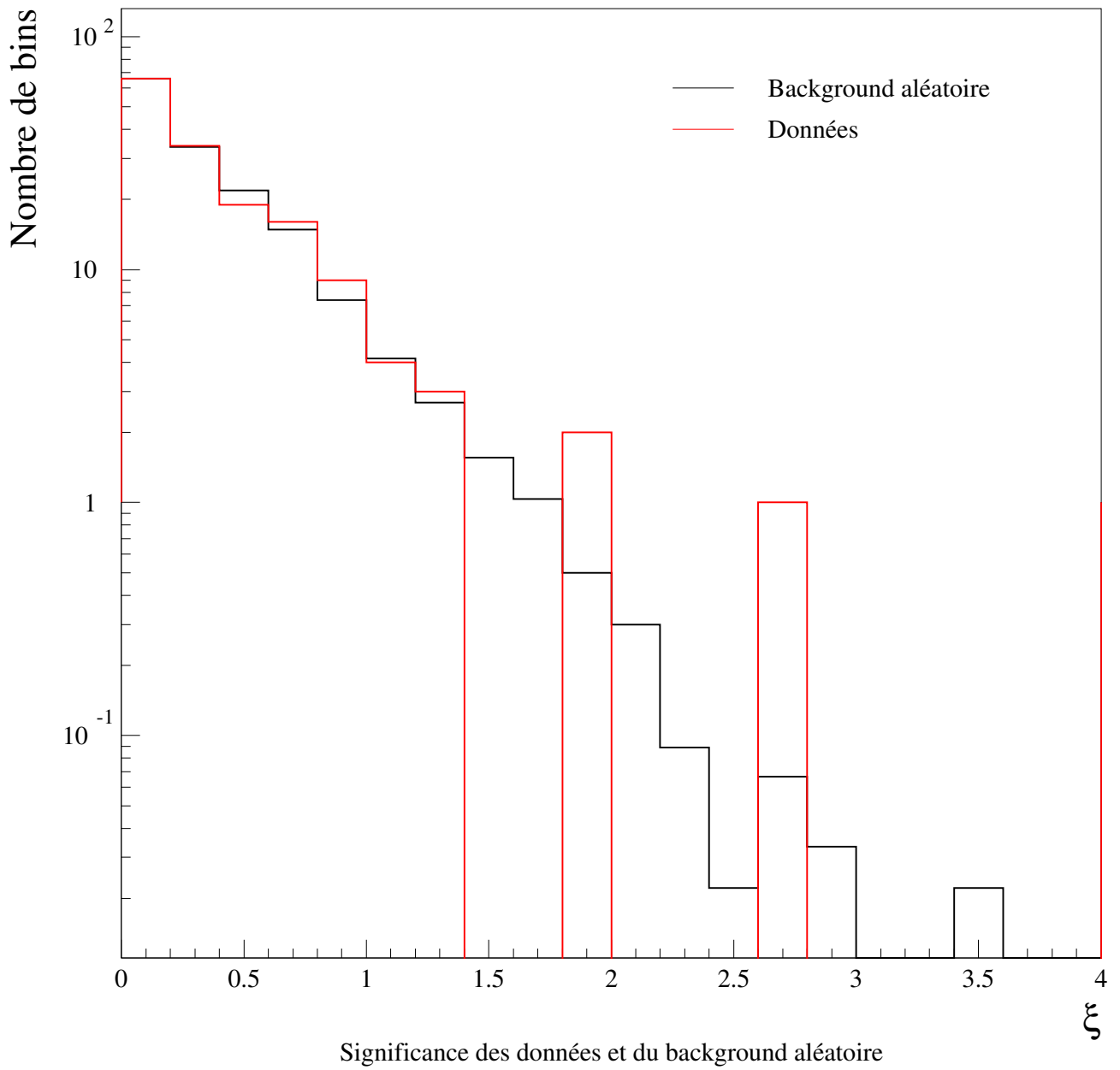


Fig. 4.6 : Distribution du nombre de cellules en fonction de l'indice d'excès (« signifiçance »)  $\xi$  pour les données expérimentales et pour un bruit de fond aléatoire.

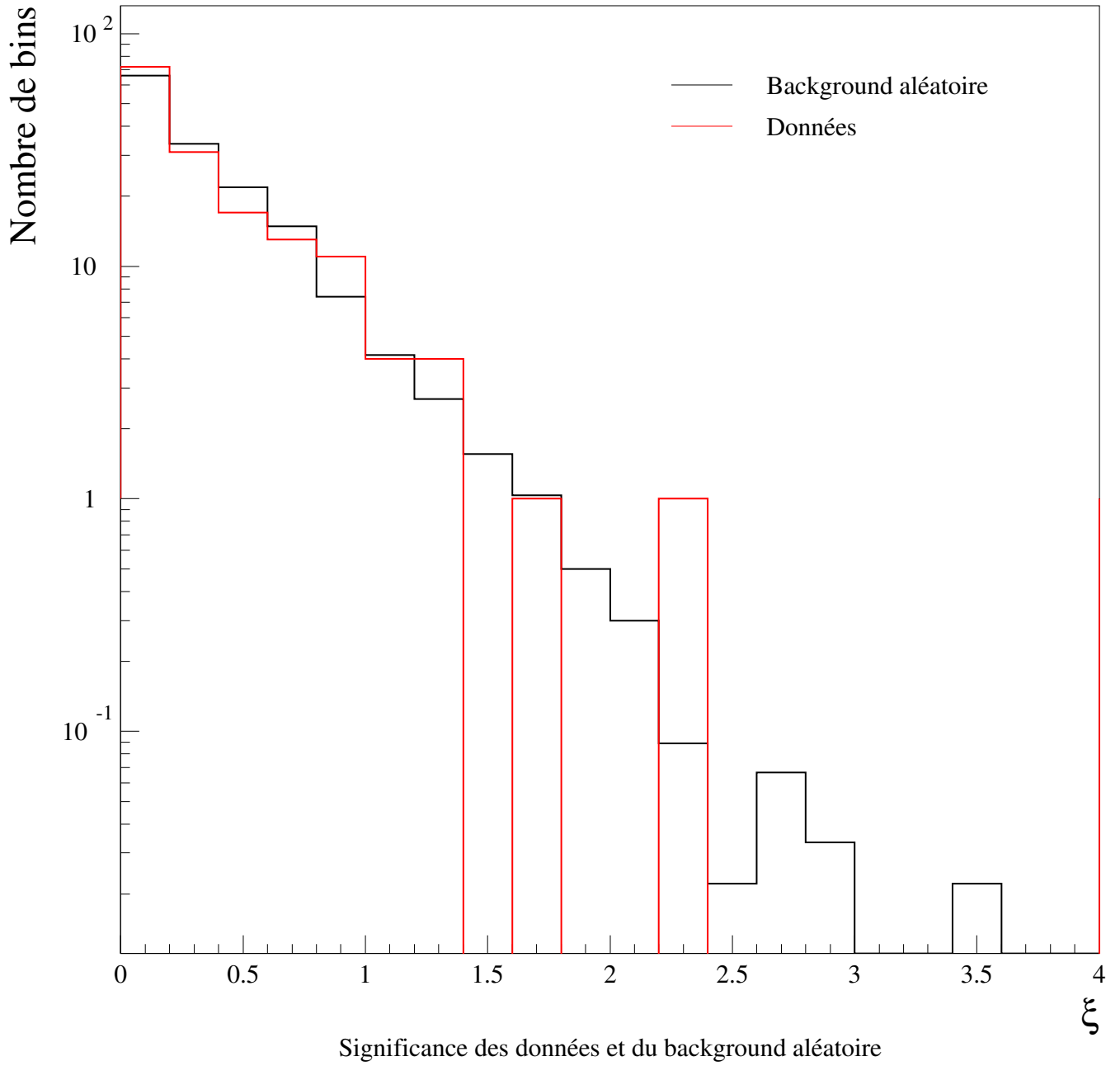


Fig. 4.7 : Distribution du nombre de cellules en fonction de l'indice d'excès (« signifiçane »)  $\xi$  pour les données expérimentales et pour un bruit de fond aléatoire. Dans ce cas-ci, les cellules ont été décalées de 30' en ascension droite.

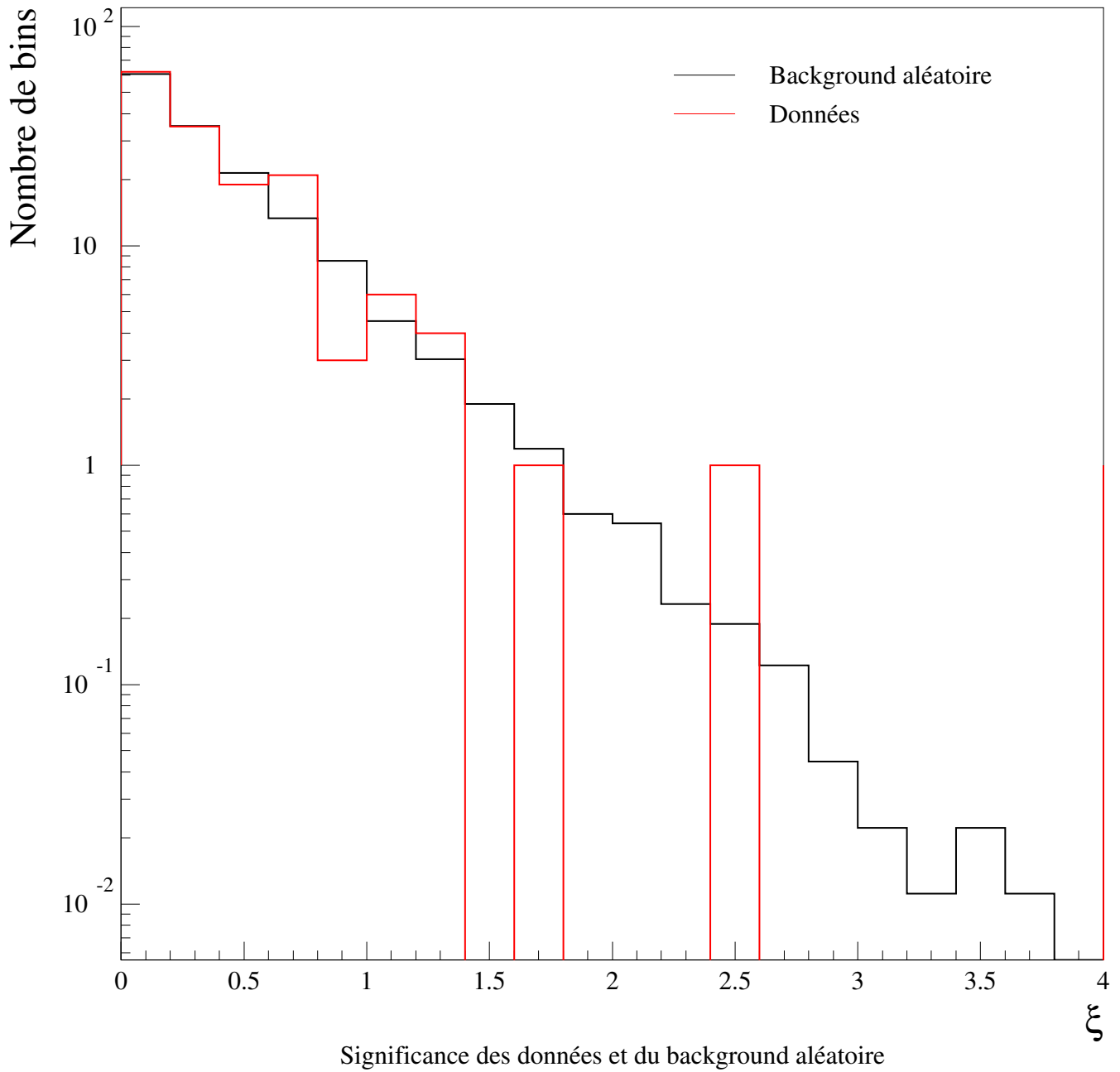


Fig. 4.8 : Distribution du nombre de cellules en fonction de l'indice d'excès (« signification »)  $\xi$  pour les données expérimentales et pour un bruit de fond aléatoire. Dans ce cas-ci, les cellules ont été décalées de 30' en ascension droite et de 4,5° en déclinaison.



### 4.4.3 Analyse des résultats obtenus

L'examen de la figure 4.6 révèle que l'accord entre la distribution aléatoire et la distribution observée est tout à fait satisfaisant pour des valeurs de  $\xi$  inférieures à 1,4. Le « binning » en  $\xi$  adopté dans cet histogramme conduirait aux considérations suivantes : au-delà de 1,4, deux « anomalies » qui pourraient témoigner d'un excès de cellules sont observées :

- Pour  $1,8 < \xi < 2,0$  : deux cellules sont observées alors que le nombre moyen attendu est de 0,5. La probabilité de Poisson<sup>3</sup> pour que cette situation se réalise en tant que fluctuation du background aléatoire est de 7,6%.
- Pour  $2,6 < \xi < 2,8$  : une cellule est observée alors que le nombre moyen attendu est 0,067, la probabilité de Poisson correspondante étant 6,2%.

Si l'on considère que ces probabilités de fluctuation à partir du fond aléatoire sont relativement petites, l'effet observé pourrait être interprété comme une indication de la présence d'un signal dans la cellule dont la valeur de  $\xi$  est comprise entre 2,6 et 2,8, et éventuellement dans l'une des deux cellules dont l'indice d'excès  $\xi$  est compris entre 1,8 et 2,0 (bien qu'ici, le déplacement d'une cellule dans un intervalle de  $\xi$  voisin suite à un changement de binning de l'histogramme en  $\xi$  ferait disparaître tout indice de signal).

Toutefois, il est à remarquer qu'entre 1,4 et 1,8, il n'y a pas de cellules observées alors que le nombre moyen dans cet intervalle de  $\xi$  est 2,59, un tel effet de fluctuation pouvant se manifester avec une probabilité de 7,5%. Il s'agit d'une fluctuation vers le bas et donc nécessairement d'une fluctuation du bruit de fond aléatoire. On est alors amené à admettre qu'une fluctuation vers le haut puisse tout aussi bien se manifester avec une probabilité comparable, ce qui incite à plus de réserve quant à dire que l'on serait en présence d'un signal !

Entre 2,0 et 2,6, il n'y a pas de cellules observées alors que le nombre moyen cumulé est de 0,411, une situation qui peut se présenter avec une probabilité de 66,3%, tout à fait acceptable, comme elle l'est d'ailleurs au-delà de 2,8.

Dès lors, comme au-delà de 1,4 il n'y a que 3 cellules observées, il convient plutôt de se poser la question de savoir dans quelle mesure il peut en être ainsi avec une moyenne cumulée de fond aléatoire de 3,622 pour  $\xi$  au-delà de 1,4. La probabilité est de 22,1%, ce qui serait tout à fait acceptable. En fin de compte, ce n'est que si le nombre de cellules observées au-delà de 1,4 était nettement supérieur à cette moyenne de 3,622 que l'on pourrait vraiment parler de signal.

---

<sup>3</sup> La probabilité de Poisson d'observer  $n$  événements sachant que  $\mu$  est la moyenne du nombre d'événements observés est donnée par :  $\mu^n e^{-\mu} / n!$ .

Il est important de remarquer plusieurs faits :

- Le pas que nous avons choisi sur l'axe horizontal des histogrammes présentés aux figures 4.6, 4.7 et 4.8 se justifie par le fait qu'une variation d'un événement dans une cellule caractérisée par un nombre moyen d'événements typiquement de 18 entraîne une variation  $\Delta\xi$  de l'ordre de 0,2, dans la région des valeurs de  $\xi$  supérieures à 1,4.
- Tout en conservant la largeur des bins en  $\xi$ , une translation de l'échelle horizontale de l'histogramme peut modifier les conclusions en ce qui concerne la probabilité que la situation observée se présente. Ainsi, entre 1,8 et 2,0, il y a deux cellules. Une translation des bins peut fort bien faire en sorte que chacune des cellules se retrouve dans deux bins adjacents, chacun caractérisés par des nombres moyens de cellules voisins de 0,5, ce qui conduirait à des probabilités de l'ordre de 30%, tout à fait acceptables comme fluctuations statistiques du bruit de fond. La situation en ce qui concerne l'intervalle [2,6 ; 2,8] ne changera toutefois pas de façon sensible puisqu'il n'y a qu'une seule cellule.
- La réduction de la largeur du binning conduirait par contre dans les diverses circonstances rencontrées à des conclusions dramatiquement différentes, en particulier en ce qui concerne la cellule observée entre 2,6 et 2,8. En effet, après réduction de la largeur des bins par un certain facteur  $n$ , la cellule se retrouvera quelque part dans un bin dans lequel la valeur moyenne aléatoire sera environ  $n$  fois plus petite, ce qui conduirait à attribuer à cette situation une probabilité d'autant plus petite d'être une fluctuation aléatoire que  $n$  est grand. Comme la largeur des bins ne peut être fixée que de manière approximative, on serait conduit à évaluer la situation observée en groupant l'information dans la partie haute de l'histogramme, comme considéré ci-dessus.

En conclusion, la distribution observée ne révèle pas d'évidence de source ponctuelle. Une analyse analogue menée pour les distributions décalées (cf. fig. 4.7 et 4.8) aboutit au même résultat.

#### **4.4.4 Calcul des limites de flux**

L'analyse de la distribution des cellules du quadrillage de l'hémisphère nord en fonction de la "significane" ne révèle pas d'évidence significative de source ponctuelle. Néanmoins, il est possible de déterminer les limites supérieures de flux de neutrinos de haute énergie dans chacune des tranches en déclinaison considérées.

Dans un premier temps, les limites supérieures du nombre moyen de signal ( $s_{90}$ ) dans les cellules respectives ont été déterminées en supposant que le nombre d'événements

observés (N) est égal au nombre moyen de background (b), selon la formule standard<sup>4</sup>:

$$CL = 1 - \frac{\sum_{n=0}^N p(n, s_{90} + b)}{\sum_{n=0}^N p(n, b)}, \quad (4.4)$$

que l'on a utilisée sous la forme intégrale:

$$CL = \frac{\int_b^{s_{90}+b} p(N, \mu) d\mu}{\int_b^{\infty} p(N, \mu) d\mu} \quad (4.5)$$

dans laquelle p(n,b) est la fonction de Poisson et CL, le niveau de confiance, qui a été fixé à 0.90.

Déclinaison ( $\delta^\circ$ )	N = b	$s_{90}$	$\bar{A}_{eff}^\mu$ (m <sup>2</sup> ) (E <sub>v</sub> <sup>-2.3</sup> )	$\Phi_{90}^\mu$ (10 <sup>-14</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> · $\epsilon_{cell}$ )	$\bar{A}_{eff}^\nu$ (×10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> ) (E <sub>v</sub> <sup>-2.3</sup> )	$\Phi_{90}^\nu$ (10 <sup>-6</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> · $\epsilon_{cell}$ )
[0°, 9°]	23,67	9,4	1000	8,30	2,0	4,15
[9°, 18°]	23,30	9,35	2000	4,13	3,5	2,36
[18°, 27°]	18,36	8,45	3000	2,49	7,0	1,07
[27°, 36°]	12,10	7,15	4000	1,58	8,0	0,79
[36°, 45°]	11,5	7,00	5000	1,24	9,0	0,69
[45°, 54°]	11,0	6,88	5500	1,11	10,0	0,61
[54°, 63°]	13,38	7,45	5250	1,25	9,0	0,73
[63°, 72°]	15,56	7,9	5000	1,40	8,5	0,82
[72°, 81°]	14,50	7,68	4500	1,54	8,0	0,85
[81°, 90°]	5,5	5,33	4200	1,12	8,0	0,59

Tableau 4.11 : Calcul approximatif des limites de flux de muons et de neutrinos pour les différentes tranches en déclinaison. Les valeurs des surfaces effectives moyennes pour les muons  $\bar{A}_{eff}^\mu$  et les neutrinos  $\bar{A}_{eff}^\nu$  ont été relevées sur les fig. 6.13 et 6.14 de la thèse de doctorat de S. Young (Young, 2001).

La limite supérieure des flux  $\Phi_i$  ( $i = \mu, \nu$ ) au niveau de chacune des tranches en déclinaison peut se calculer comme suit:

$$\Phi_{90}^i = \frac{s_{90}}{\epsilon_{cell}} \frac{1}{T \cdot \bar{A}_{eff}^i}, \quad (4.6)$$

<sup>4</sup> Référence : Particle Data Group, 1996, p. 211; F. Grard, PNPE 355

où  $\mathcal{E}_{cell}$  représente l'efficacité de collecte du signal dans la cellule considérée, tenant compte de la résolution angulaire d'observation d'une source ponctuelle (87% dans notre cas) ; T est la durée totale de la prise des données et  $\overline{A}_{eff}^i$  est la « surface effective » moyenne pour la détection de muons ou des neutrinos. Celle-ci exprime la probabilité pour que le détecteur produise un événement exploitable. Elle est évaluée par simulation Monte Carlo pour tenir compte de la géométrie du détecteur, de la distribution spectrale des neutrinos, de la section efficace d'interaction neutrino-nucléon, ainsi que de l'efficacité de sélection des événements après analyse. Elle dépend ainsi de la déclinaison et de l'indice spectral  $\gamma$  fixant la dépendance en énergie des neutrinos (étant donné que le flux est proportionnel à  $E^{-\gamma}$ ).

Le tableau 4.11 donne les limites des flux de muons et de neutrinos calculées de façon approximative, sans erreurs, et sans tenir compte de l'efficacité de collecte du signal dans les cellules. Les valeurs de  $\overline{A}_{eff}^\mu$  et de  $\overline{A}_{eff}^\nu$  ont été relevées sur les fig. 6.13 et 6.14 de la thèse de doctorat de S. Young (Young, 2001), pour une distribution en  $E_\nu^{-2,3}$ , ce choix de l'indice spectral étant purement arbitraire. Ces calculs ont été réalisés afin d'évaluer la cohérence de nos résultats avec ceux obtenus dans la thèse, à partir des données de 97, mais par une procédure de réduction des données différente de celle que nous avons pratiquée. Considérant que les flux calculés à partir de nos données doivent être divisés par  $\mathcal{E}_{cell}$  (87%), il s'avère que les résultats obtenus de part et d'autre peuvent être considérés comme compatibles.

## 4.5 Perspectives

L'agrandissement du détecteur AMANDA au fil des ans a permis d'augmenter sa résolution intrinsèque et sa sensibilité. On estime que l'analyse cumulée des données expérimentales enregistrées durant les années 1998, 1999 (AMANDA-B13), 2000 et 2001 (AMANDA-II) permettra de multiplier par un facteur 20 le nombre de neutrinos détectés (Biron, 2002). Une plus grande statistique ainsi qu'une meilleure résolution angulaire devraient permettre de déceler des sources ponctuelles de neutrinos de haute énergie d'origine astrophysique. A défaut, la détermination des limites supérieures de flux de neutrinos s'en trouvera nettement améliorée.

A moyen terme, la mise en œuvre<sup>5</sup> du détecteur Ice Cube, le successeur d'AMANDA, permettra d'accéder à une sensibilité et une résolution angulaire encore accrues. Ce détecteur sera constitué de plus de 5000 photomultiplicateurs déployés dans un volume d'1 km<sup>3</sup> de glace (cf. fig. 4.9). La taille gigantesque d'Ice Cube permettra de reconstruire plus précisément la trajectoire des neutrinos détectés ainsi que de mesurer leur énergie avec plus de précision.

---

<sup>5</sup> Prévus pour 2007.

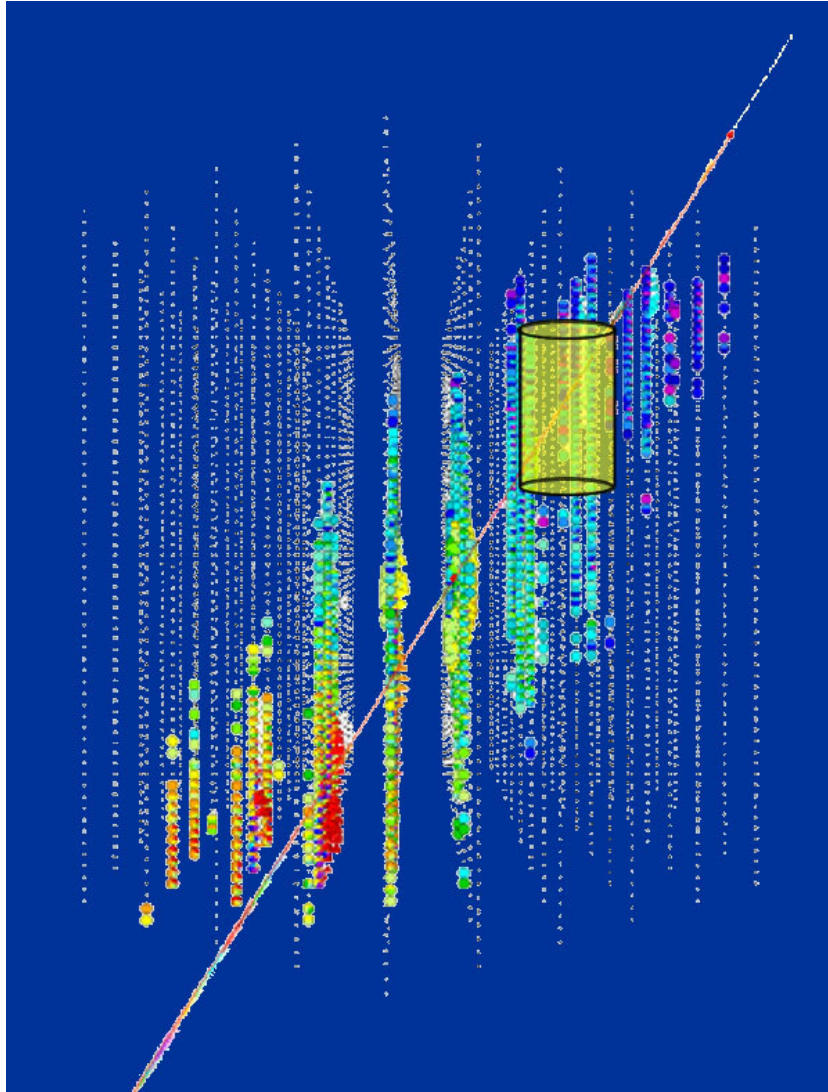


Fig. 4.9: Vue schématique du détecteur Ice Cube, le successeur d'AMANDA. Ice Cube comptabilisera plus de 5000 photomultiplicateurs déployés dans un volume de glace de  $1\text{km}^3$ . Le cylindre jaune représente le détecteur AMANDA dans sa configuration actuelle. Dans cette figure, on a simulé la réponse d'Ice Cube au passage d'un neutrino ascendant.