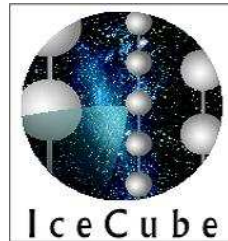




ACADEMIE UNIVERSITAIRE WALLONIE-BRUXELLES
UNIVERSITE LIBRE BRUXELLES
FACULTE DES SCIENCES

Physique des Particules Élémentaires
Interuniversity Institute for High Energies



Recherche de source ponctuelles de neutrinos cosmiques de haute énergie avec le détecteur IceCube

Rapport de recherche présenté dans le cadre du Diplôme d'Etude Approfondie en
Sciences Physiques par

Mathieu Labare

Directeur de thèse : Pr. Daniel Bertrand

Année académique 2006-2007

Recherche de sources ponctuelles de neutrinos cosmiques de haute énergie avec le détecteur IceCube

Mai 2007

Table des matières

1	Introduction	3
2	Outils et tests préliminaires	5
2.1	Méthode statistique : contrôle du False Discovery Rate	5
2.2	Pixelisation du ciel	6
2.2.1	Définition des pixelisations	6
2.3	Estimation du FDR sur une pixelisation	6
2.4	Adaptation de la pixelisation pour l'analyse de sources ponctuelles	7
2.4.1	Tests de contrôle du FDR	7
2.4.2	Pouvoir de détection du FDR	8
3	Neutrinos ponctuels	9
3.1	Génération MonteCarlo	9
3.1.1	Bruit de fond	9
3.1.2	Source	9
3.2	Analyse	10
3.3	Comparaison avec une méthode à seuil fixe	11
3.3.1	Principe	11
3.3.2	Résultats	11
4	Neutrinos diffus	13
4.1	Principe	13
4.2	Fonction de distribution (PDF) du bruit de fond	13
4.3	Analyse	14
4.3.1	Test de contrôle du False Discovery Rate sur le bruit de fond	14
4.3.2	Pouvoir de détection du FDR	15
4.4	Résultats	16
5	Conclusions et perspectives	17

1 Introduction

IceCube est un télescope d'un kilomètre-cube en cours de construction dans la glace polaire antarctique, destiné à l'observation de neutrinos à haute énergie d'origine cosmique. Successeur d'AMANDA, il permettra l'exploration de régions inaccessibles par les techniques d'astrophysique basées sur l'observation du spectre électromagnétique, et devrait apporter des informations sur les domaines d'énergie au-delà du PeV. Des particules chargées ont été observées dans ce domaine mais leur origine est difficilement identifiable car elles sont sensibles aux champs magnétiques (extra-)galactiques. Ainsi, IceCube permettra une approche entièrement nouvelle sur les mécanismes d'émission de radiation de différents objets célestes tels que les Gamma Ray Burst (GRB), les noyaux actifs de galaxies (AGN) et autres sources possibles des particules les plus énergétiques actuellement observées. Dans le meilleur des cas, ce télescope pourrait également mettre en évidence de nouvelles sources.

La recherche de sources ponctuelles de neutrinos est un des grands défis relevés par l'expérience IceCube. Les modèles les plus communs font l'hypothèse d'une émission de neutrinos à haute énergie lors d'interactions proton-proton ou proton-photon, via la production et la désintégration de pions. Ces protons sont accélérés par le mécanisme proposé par Fermi¹, au sein d'objets extra-galactiques comme les vestiges de supernovæ, les AGN ou les GRB. Ces neutrinos ne sont pas déviés ou absorbés lors de leur périple vers la Terre. Leur trajectoire rectiligne permet donc de connaître la position de leur source.

Certains modèles de production au sein des AGN favorisent des processus hadroniques, soit dans les jets, soit au coeur de l'AGN, tandis que d'autres ne mettent en jeu que des processus électromagnétiques. Une indication convaincante permettant de dissocier les modèles sera donnée par l'observation ou non d'un flux de neutrinos associé.

Dans les GRB, c'est l'interaction de protons accélérés par ondes de choc avec le rayonnement synchrotron résultant de l'accélération des électrons dans le champ magnétique de cette même région qui pourraient produire des sursauts de neutrinos à haute énergie (~ 100 TeV).

L'observation des neutrinos cosmiques devrait permettre d'étendre notre compréhension des mécanismes cataclysmiques de l'Univers et de développer ou confirmer les modèles d'accélération des particules cosmiques.

Le principe de détection du télescope IceCube repose sur la mise en évidence du muon issu de l'interaction à courant chargé d'un neutrino muonique ultra-énergétique avec la glace et la roche autour du détecteur. Ce muon relativiste se déplace ensuite de manière rectiligne dans la glace polaire en y émettant un rayonnement Cherenkov détecté par des modules optiques. L'amplitude des signaux issus des différents modules ainsi que la mesure du temps d'arrivée des photons permettent de reconstruire le cône de lumière Cherenkov, et donc la trajectoire du muon, très proche de la trajectoire du neutrino incident et de déterminer la direction de son origine. Les sources extraterrestres de neutrinos sont distribuées de manière isotrope par rapport au détecteur, au contraire des neutrinos produits lors de l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère terrestre.

Les muons issus de ces neutrinos atmosphériques descendants sont rejetés, afin de ne garder que les muons ascendants, la Terre jouant le rôle de filtre vis-à-vis des muons produits dans l'atmosphère de l'autre côté du globe.

Il reste néanmoins un important flux de neutrinos ascendants d'origine atmosphérique qui ont traversé la Terre et ont interagi à proximité du détecteur. Ces événements produisent un bruit de fond important, de l'ordre de 10^3 fois supérieur à un hypothétique flux extraterrestre, mais relativement bien connu et utilisé pour vérifier les performances

¹Klapdor-Kleingrothaus and Zuber (2000), *Particle Astrophysics* (pp 243-245), IoP

du détecteur. La séparation des muons issus de neutrinos extraterrestres des muons issus des neutrinos atmosphériques peut être affinée grâce au spectre en énergie des muons détectés. En effet, on attend du spectre énergétique de neutrinos provenant d'une source extraterrestre qu'il soit plus dur (E^{-2}) que celui des neutrinos atmosphériques ($E^{-3.7}$), entraînant ainsi une différence sur les spectres des muons produits. Cette énergie est mesurée de manière indirecte par la quantité de lumière Cherenkov produite, et donc de modules optiques touchés dans le détecteur qui augmenteront avec l'énergie du muon. Cette relation est obtenue par comparaison grâce à des simulations MonteCarlo.

Cette première année de doctorat fut principalement consacrée à l'élaboration d'une nouvelle méthode d'analyse dans le but d'augmenter le pouvoir de détection d'une possible source ponctuelle. Ce nouveau cadre d'étude repose à la fois sur le développement de nouvelles pixelisations du ciel, mais surtout sur l'utilisation d'une méthode statistique récente - dite False Discovery Rate (FDR)² - qui permet de contrôler et quantifier de manière précise le nombre de fausses découvertes faites lors de l'étude d'un ciel.

Nous allons développer dans ce rapport, les tests principaux qui ont conduits à l'optimisation de la méthode pour la recherche de sources ponctuelles. Nous quantifierons ensuite l'apport de cette nouvelle approche et la comparerons avec d'autres méthodes plus traditionnelles. Enfin, nous présenterons les possibles évolutions prévues dans le but d'augmenter l'efficacité de la méthode.

²The controle of the False Discovery Rate in multiple testing under dependency - Y.Benjamini and D.Yekutieli *The Annals of Statistics* 2001, Vol.29, No.4, 1165-1188

2 Outils et tests préliminaires

2.1 Méthode statistique : contrôle du False Discovery Rate

La méthode de contrôle du *False Discovery Rate*³ permet - comme son nom l'indique - de contrôler le nombre de fausses rejections lors de tests d'hypothèses multiples. Cette méthode présente l'avantage de fixer, *à priori*, la proportion de fausses découvertes, dont découle le niveau de confiance de l'observation.

En effet, avec les techniques habituelles de décision, le rejet d'une hypothèse repose sur la probabilité d'observer la valeur mesurée étant donné le bruit de fond attendu. Dans un test avec un seuil de 2σ par exemple, l'hypothèse nulle sera rejetée si cette probabilité est inférieure à 0.05. Cependant, la probabilité de rejeter de manière erronée une valeur augmente avec le nombre de tests réalisés. On pourrait donc compenser cet effet en fixant un seuil plus strict (p.e. 3σ), mais au détriment du pouvoir de détection de vraies déviations (sources).

La méthode FDR consiste en l'ajustement progressif du seuil de rejet (d), en fonction du nombre de tests réalisés (N), des corrélations entre ceux-ci (C_c - dont la valeur "standard" est fixée à $1+1/8$), mais surtout de l'ensemble des probabilités (P_i) obtenues pour chacun des tests.

Concrètement, si nous voulons contrôler le FDR avec un niveau de confiance α , la procédure consiste à trier l'ensemble des probabilités P_1, \dots, P_N par valeurs croissantes, afin de déterminer le seuil de rejet

$$d = \max \left[j : P_j < \frac{j \alpha}{C_c N} \right]$$

Il reste ensuite à rejeter l'ensemble des hypothèses dont la probabilité P_i est inférieure ou égale à P_d .

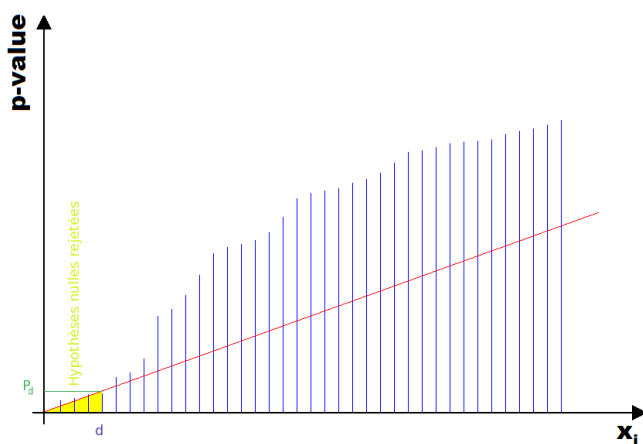


FIG. 1 – Illustration de la procédure FDR. La dernière probabilité (P_d) située sous la courbe de rejet ($\frac{j\alpha}{C_c N}$ - en rouge) fixe la zone de rejet de l'hypothèse nulle (en jaune)

Au cours de notre travail, nous comparerons la robustesse et le pouvoir de discrimination de la méthode FDR par rapport à d'autres méthodes statistiques connues telles celles reposant sur la maximisation des rapports de vraisemblance ou encore les méthodes à seuil fixe.

³que nous appellerons par la suite, afin d'éviter certaines lourdeurs, méthode FDR

2.2 Pixelisation du ciel

Une étude détaillée de la pixelisation du ciel est absolument nécessaire afin de maîtriser les effets systématiques dans la détermination de l'origine des neutrinos observés. Une caractéristique d'un bon quadrillage est qu'il doit garantir un bon pouvoir de détection, en rapport avec la résolution du détecteur. Toutefois il ne doit pas se montrer trop sensible aux fluctuations statistiques sur le bruit de fond. Une méthode classique consiste en une pixelisation constituée de cellules d'aires égales et indépendante de l'ascension droite afin de respecter la symétrie cylindrique du détecteur.

2.2.1 Définition des pixelisations

La première étape de cette étude a consisté à définir différents types de quadrillage du ciel afin d'établir celui étant le mieux adapté à la recherche de sources ponctuelles, compte tenu des caractéristiques du détecteur IceCube. Nous avons décidé, dans un premier temps, de concentrer nos recherches sur trois types de découpages généraux : RECTANGLE, RECTANGLE-SINUS et RHOMBUS. Les deux premières pixelisations consistent en la division de la voûte céleste en cellules rectangulaires, selon un découpage en bandes de déclinaison différentes, dans lesquelles nous fixons le nombre de bandes et l'angle solide d'une cellule. La troisième pixelisation, adaptée de la pixelisation HEALPIX⁴ développée par l'expérience de cartographie du fond micro-onde diffus cosmologique COBE, consiste en un découpage du ciel en losanges de dimensions identiques. La taille d'une cellule est définie par un seul paramètre, le niveau de fractionnement du réseau minimal, composé de 12 losanges couvrant la sphère. Chaque losange peut être divisé en 4 losanges formant le niveau de fractionnement suivant.

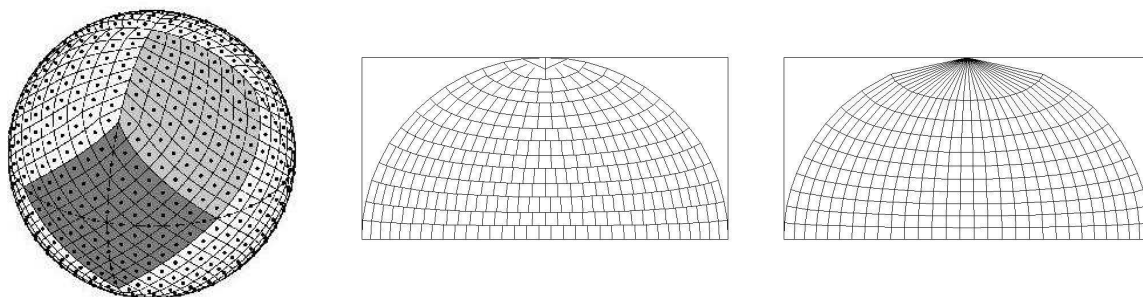


FIG. 2 – Pixelisation RHOMBUS en vue 3D (gauche) , RECTANGLE (centre) et RECTANGLE SINUS (droite) en projection Hammer-Aitoff (représentation conservant l'aire)

2.3 Estimation du FDR sur une pixelisation

L'application de la méthode FDR nécessite la connaissance de la fonction de distribution de probabilité théorique de l'hypothèse nulle. Dans le cas dans cette étude, on teste comme hypothèse nulle l'absence d'excès de neutrinos dans chaque cellule découpée dans le ciel. Connaissant le nombre de neutrinos n_{obs} observés dans chacune de ces cellules, il nous faut connaître la distribution de probabilité du nombre de neutrinos de bruit de fond pour chaque cellule du ciel. Celle-ci est une distribution de Poisson de moyenne n_{bg} . Cette moyenne est déterminée comme étant la moyenne des événements répertoriés dans l'ensemble des cellules situées dans la même bande de déclinaison que la cellule étudiée, celle-ci exclue.

⁴<http://healpix.jpl.nasa.gov>

Ceci défini, nous pouvons dès lors déterminer, toujours pour chaque cellule, la probabilité que le nombre de neutrinos soit supérieur ou égal au nombre de neutrinos observés n_{obs} , compte-tenu du bruit de fond n_{bg} attendu :

$$p(n_{obs}|n_{bg}) = \sum_{i=n_{obs}}^{\infty} \frac{e^{-n_{bg}} n_{bg}^i}{i!}$$

Si, lors de l'application de la méthode FDR sur une réalisation de bruit de fond, une cellule au moins voit sa probabilité passer sous le seuil de rejet⁵, le FDR pour cette réalisation sera 1. Dans le cas contraire, c-à-d si aucun excès statistique n'est relevé, le FDR vaudra 0.

Finalement, l'estimation du FDR pour une pixelisation particulière sera obtenue en effectuant la moyenne du FDR de chaque réalisation, c-à-d en exprimant le pourcentage de réalisations pour lesquelles y a eu déclenchement sur le bruit de fond.

Afin d'obtenir une statistique raisonnable pour cette estimation, 5000 réalisations du ciel (répartitions de neutrinos détectés) différentes doivent être générées et analysées, correspondant à l'ordre du million de tests⁶ par configuration particulière. Ces séries de tests sont répétées pour chaque variation de la configuration de quadrillage. Une centaine de configurations différentes ont été testées.

2.4 Adaptation de la pixelisation pour l'analyse de sources ponctuelles

2.4.1 Tests de contrôle du FDR

Nous avons tout d'abord procédé à une première vérification du contrôle du FDR à une valeur de 1% (correspondant à un niveau de confiance de 99%) pour chacune des trois pixelisations, en utilisant le coefficient de corrélation standard considéré comme optimal par les développeurs de la méthode. Nous avons analysé 5000 cieux basés sur les données 2000-2003 d'AMANDA, dont l'ascension droite a été rendue aléatoire. Nous nous assurons donc d'analyser des données dont la distribution en déclinaison est préservée mais ne comportant plus de signal d'une source éventuelle. L'apparition d'une source étant exclusivement due au hasard, la fréquence de fausses découvertes peut donc être estimée pour un quadrillage du ciel donné.

Nous avons effectué ce contrôle pour le quadrillage RHOMBUS pour des valeurs du paramètre de fractionnement de 2 et 3 correspondant à 104 et 400 cellules. Le FDR s'est révélé contrôlé dans un intervalle de confiance de 99%.

Une analyse complète des pixelisations RECTANGLE et RECTANGLE-SINUS pour un grand nombre de configurations révèle que la pixelisation RECTANGLE-SINUS semble offrir un meilleur contrôle du FDR, plus particulièrement pour les petits angles solides. Ces résultats montrent néanmoins que le contrôle du FDR dépend de manière importante du type de pixelisation utilisé pour l'analyse.

La seconde vérification consiste à savoir si le non-contrôle du FDR sur certaines configurations ne provient pas d'un mauvais choix du coefficient de corrélation. Nous avons donc étudié la dépendance du coefficient de corrélation en fonction du taux de FDR demandé pour un quadrillage donné. Si ce coefficient de corrélation ne varie pas en fonction du taux, cela signifie que le FDR est contrôlé avec ce nouveau coefficient.

Nous avons constaté que l'ajustement du coefficient de corrélation permet d'obtenir le contrôle du FDR avec la pixelisation RHOMBUS pour les deux paramétrisations N=2 et 3. Pour le quadrillage RECTANGLE, une zone de contrôle du FDR est apparue en

⁵ $d > 0$ pour cette réalisation

⁶ puisque un test est réalisé pour chacune des cellules, au nombre de 100 à 500 suivant la pixelisation

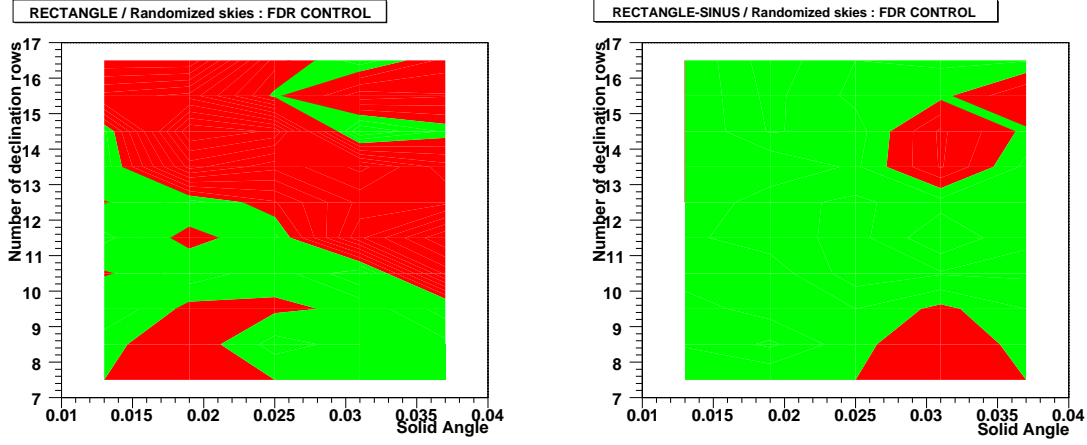


FIG. 3 – Configurations contrôlant le FDR (vert) pour l’ensemble des pixelisations RECTANGLE (gauche) et RECTANGLE-SINUS (droite) étudiées.

balayant l’espace de paramètres (Fig 3-gauche). C’est cependant le découpage de type RECTANGLE-SINUS (Fig 3-droite) qui offre une stabilité du FDR sur la zone la plus importante de l’espace des paramètres.

2.4.2 Pouvoir de détection du FDR

Il sera question dans cette section de déterminer, d’une part, si le FDR est toujours contrôlé lorsque la méthode est appliquée sur un ciel contenant une source et, d’autre part, le pouvoir de détection de cette méthode, c-à-d, la probabilité de détecter une source d’une luminosité donnée.

Nous avons donc superposé une série de 100 sources positionnées aléatoirement, à l’ensemble des réalisations de bruit de fond étudiés. Chaque source est composée de 1 à 30 neutrinos répartis selon une gaussienne à deux dimensions⁷. Une seule source est incorporée par réalisation de bruit de fond.

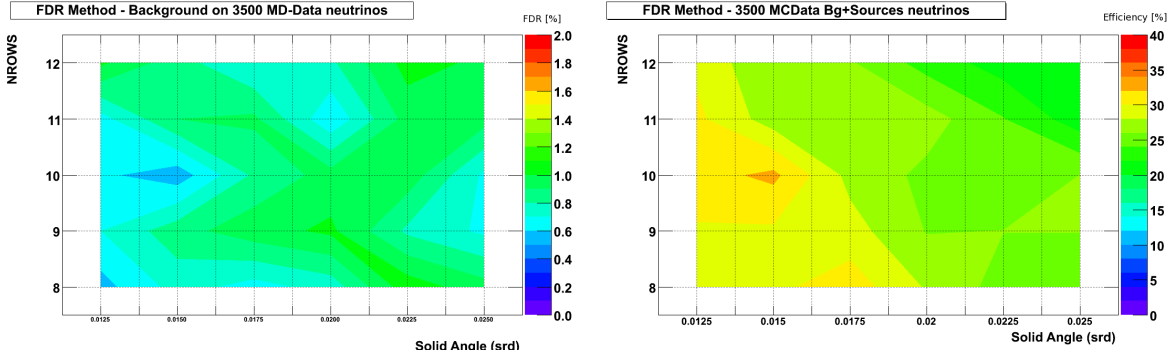


FIG. 4 – False Discovery Rate (à gauche) et pouvoir de détection (à droite) pour l’ensemble des pixelisations RECTANGLE-SINUS étudiées.

Au final, la configuration qui garantit le meilleur pouvoir de détection, tout en contrôlant le FDR est la pixelisation RECTANGLE-SINUS composée de cellules de 15 msrd sur 10 bandes de déclinaison.

C’est dorénavant cette configuration qui sera utilisée pour la suite de l’analyse.

⁷ afin de tenir compte de la résolution du détecteur

3 Neutrinos ponctuels

Après cette étude préliminaire sur les possibilités d'utilisation de la méthode FDR et la détermination de la pixelisation qui offre les meilleures perspectives, il est nécessaire de développer l'analyse des possibilités offertes par cette méthode de manière plus quantitative.

3.1 Génération MonteCarlo

Ainsi, il paraît naturel de privilégier une génération MonteCarlo des événements de bruit de fond, plutôt que d'utiliser exclusivement les données 2000-2003 collectée par AMANDA-II. Ceci nous permettra, d'une part, d'éviter un possible biais introduit par l'utilisation d'une distribution fixe et, d'autre part, de bénéficier d'une statistique beaucoup plus importante. Cette nécessité est également rencontrée lors de l'injection d'une source ponctuelle sur un ciel de bruit de fond.

3.1.1 Bruit de fond

Dans un soucis de se rapprocher au plus près de la réalité, la génération MonteCarlo des événements de bruit de fond se base sur la distribution en déclinaison des 3369 événements sélectionnés après coupures, issus des données 2000-2003 utilisées pour les tests préliminaires. Un ajustement polynomial en termes de $\sin \delta$ a été réalisé sur cette distribution :

$$p(\sin \delta) = 0.32183 + 5.5696 \sin \delta - 22.5 \sin^2 \delta + 36.848 \sin^3 \delta - 19.048 \sin^4 \delta$$

3.1.2 Source

La génération d'une source consiste en la génération de neutrinos selon une distribution représentant la résolution du détecteur (Point Spread Function) autour du centre théorique de la source. Tant les coordonnées du centre⁸ que les positions relatives des neutrinos composant la source sont générées aléatoirement. Seul le nombre de neutrinos composant la source est fixé au préalable.

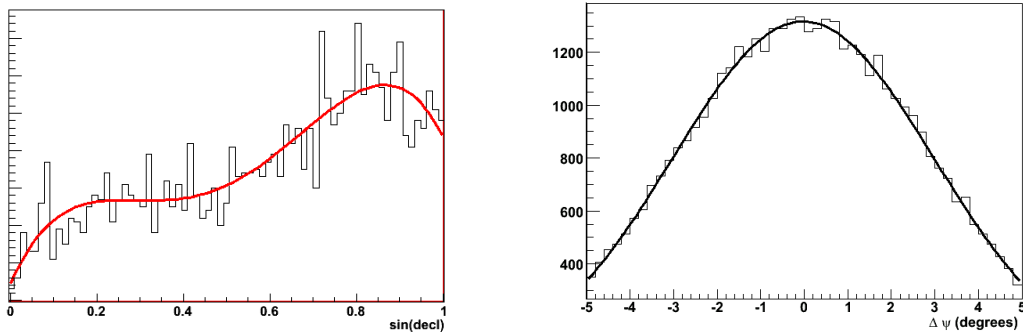


FIG. 5 – Gauche : Distribution en déclinaison du bruit de fond et ajustement polynomial d'ordre 4 en sinus. - Droite : Distance angulaire radiale d'un neutrino par rapport au centre de la source.

⁸distribution uniforme sur l'ensemble du ciel

3.2 Analyse

L'objectif de la méthode FDR étant d'augmenter le pouvoir de détection de sources ponctuelles, nous avons testé la capacité de la méthode à déceler une source de N_s neutrinos dans un ciel de N_{bg} neutrinos de bruit de fond, tout en conservant le niveau de confiance de l'observation.

Afin de quantifier à la fois l'efficacité de détection et le taux de fausses rejections, il est nécessaire de tenir compte des positions relatives de la source générée et des cellules rejetées. Trois cas ont été distingués :

Détection (SRC) : le centre de la source est situé dans la cellule rejetée. La détection est comptabilisée : $SRC = 1$.

Déplacement (DEPL) : le centre de la source est situé dans une cellule voisine à la cellule rejetée. La détection n'est pas comptabilisée ($SRC = 0$) mais le rejet n'est pas non plus considéré comme faux ($FDR = 0$), puisque celui-ci n'est pas exclusivement dû à une fluctuation du bruit de fond. DEPL est incrémenté ($0 < DEPL \leq 1$). Ce cas est essentiellement prévu lorsque la source est localisée en frontière de cellules et/ou est très lumineuse.

Fausse rejection (FDR) : Lorsque la source et la cellule rejetée sont éloignées. Le rejet est dû à une fluctuation du bruit de fond. La détection n'est pas comptabilisée ($SRC = 0$) et le FDR est incrémenté ($0 < FDR \leq 1$).

Il est important de noter que dans le cas de rejet multiple d'une réalisation, le FDR^9 ne prend pas nécessairement la valeur 1. Celle-ci est calculée selon le rapport de cellules erronément rejetées, sur le nombre de cellules totales rejetées. Par exemple, si un ciel déclenche sur la cellule contenant la source, 2 de ses cellules voisines et une cellule quelconque, la contribution de ce ciel sera : $SRC = 1 - FDR = 0.25 - DEPL = 0.5$.

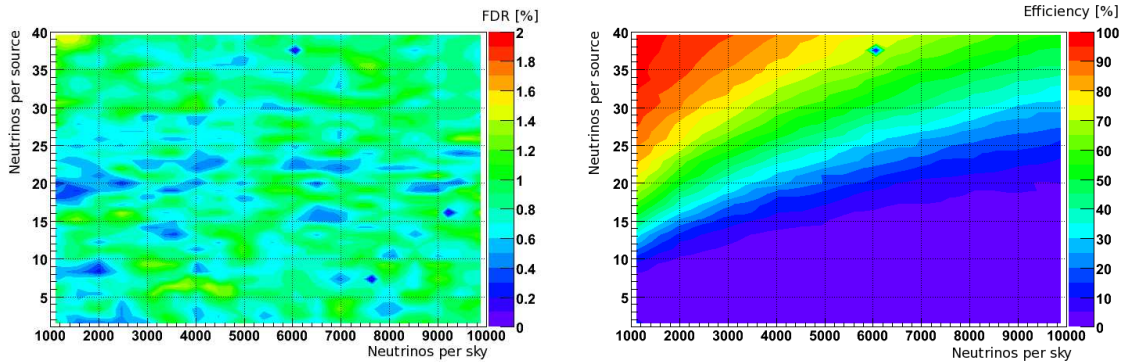


FIG. 6 – False Discovery Rate (à gauche) et pouvoir de détection (à droite) en fonction du nombre de neutrinos de bruit de fond (abscisse) et de la luminosité de la source (ordonnée) avec la pixelisation RECTANGLE-SINUS 10 ROWS - 15 msrd.

L'ensemble des résultats est cartographié sur la Fig-6, où l'on a représenté le FDR (à gauche) et l'efficacité de détection (à droite) pour 100 positions de sources et 10 réalisations du bruit de fond, en fonction du nombre de neutrinos de bruit de fond (abscisses) et du

⁹ainsi que la variable DECL

nombre de neutrinos de sources (ordonnées). Ces variables peuvent être interprétées comme respectivement le temps de vie du détecteur et le flux de neutrinos.

Nous pouvons constater que le taux de fausses découvertes (FDR) est contrôlé quelque soit le nombre de neutrinos de bruit de fond ou de source, assurant le conservatisme et la robustesse de la méthode, indépendamment des données. Le pouvoir de détection augmente bien évidemment avec l'importance de la source et diminue progressivement avec l'accumulation d'événements de bruit de fond.

3.3 Comparaison avec une méthode à seuil fixe

Afin de pouvoir estimer qualitativement l'apport de la méthode FDR dans ce type d'analyse, une étude similaire à été réalisée avec une méthode dite "à seuil fixe" .

3.3.1 Principe

Cette procédure se déroule en deux temps. Premièrement, une étude sur des réalisations de bruit de fond est effectuée. Pour chaque réalisation, le paramètre d'excès maximal¹⁰ est relevé. L'étude de leur distribution (Fig.7) permet de fixer une valeur de seuil ξ_t pour laquelle 1% de ces paramètres seront supérieurs à ce seuil.

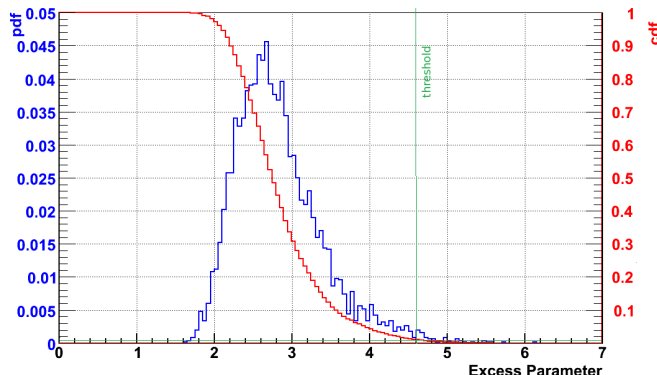


FIG. 7 – Illustration de la méthode à seuil fixe : Distribution (en bleu) du paramètre d'excès maximal pour la configuration SINUS-RECTANGLE 10 bandes - 15 msrd sur 1000 réalisations de 10000 neutrinos de bruit de fond, ainsi que la probabilité (en rouge) d'atteindre au moins cet excès. Le seuil (en vert) est fixé au paramètre d'excès dont la probabilité est de 0.01 et garantit le niveau de confiance d'une observation équivalent au FDR sur le bruit de fond.

La seconde étape consiste à comptabiliser, sur les réalisations avec sources, le nombre et la nature des cellules dont le paramètre d'excès est supérieur au seuil fixé par l'étude des réalisations de bruit de fond.

3.3.2 Résultats

Cette méthode à seuil fixe a été appliquée sur les mêmes paramètres ayant été utilisés pour l'analyse de la méthode FDR. Il ressort de l'étude du bruit de fond que le seuil de paramètre, déterminé pour chaque configuration $(N_{bg}; N_s)$, est relativement stable et oscille entre $\xi_t = 4.45$ et $\xi_t = 4.65$. Les mêmes réalisations que précédemment ont été utilisées pour cette étude, garantissant ainsi que les différences observées soient uniquement dues

¹⁰la cellule ayant la probabilité la plus faible

aux deux approches. Ainsi, les cartographies présentées Fig-8 représentent les résultats obtenues avec cette méthode.

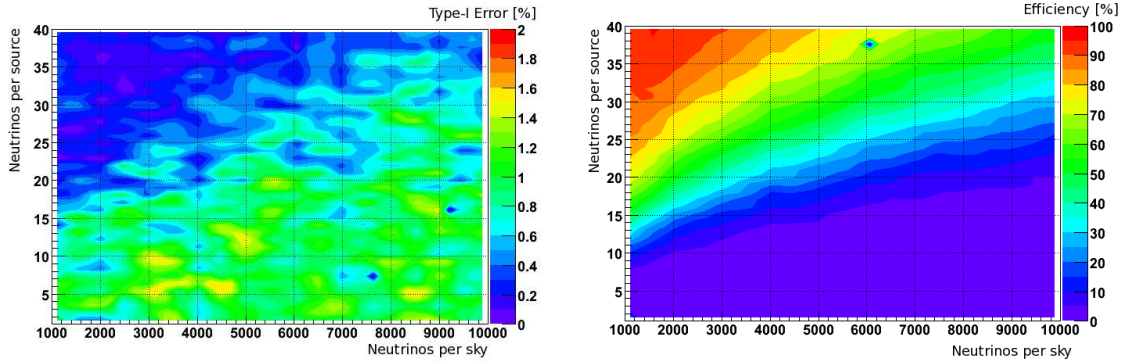


FIG. 8 – Erreur de type-I (équivalent FDR) (à gauche) et pouvoir de détection (à droite) en fonction du nombre de neutrinos de bruit de fond (abscisse) et de la luminosité de la source (ordonnée) avec la pixelisation RECTANGLE-SINUS 10 ROWS - 15 msrd, avec la méthode à seuil fixe

On peut constater que, du point de vue de l'efficacité de détection, les deux méthodes semblent presque rigoureusement équivalentes. Cependant, la méthode à seuil fixe n'assure plus le contrôle du taux de fausses rejections pour l'ensemble des configurations utilisées, son niveau de confiance dépend donc des données, critère essentiel qui est remarquablement contrôlé avec la technique FDR.

4 Neutrinos diffus

Afin de tenir compte de la résolution du détecteur, et par conséquent une incertitude sur la position réelle du neutrino, une méthode alternative de comptabilisation du nombre de neutrinos par cellule a été réalisée.

4.1 Principe

Cette méthode consiste, non plus à considérer le neutrino comme ponctuel, mais à définir une probabilité de présence autour de sa position reconstruite (Fig-9-Droite), estimée selon la fonction de diffusion du détecteur (Fig-9-Gauche).

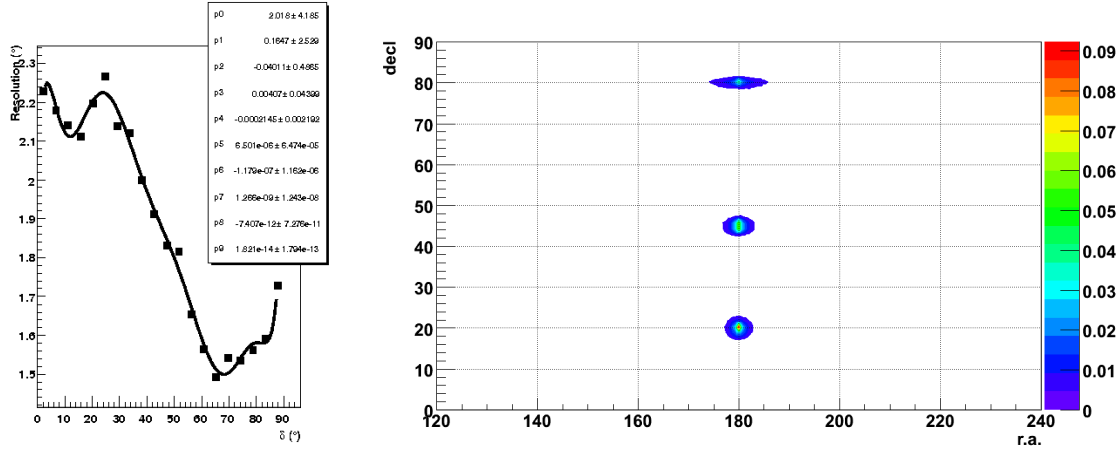


FIG. 9 – Gauche :Fonction de diffusion du détecteur en fonction de la déclinaison et l’ajustement par un polynôme de degré 9 - Droite : Illustration de la diffusion de 3 neutrinos situés à 20, 45 et 80 degrés de déclinaison

Un neutrino pourra donc être comptabilisé dans plusieurs cellules, proportionnellement à sa probabilité de présence dans celles-ci. Bien évidemment, l’ensemble des contributions d’un neutrino vaut 1.

L’utilisation de ce nouveau mode de recensement pourra permettre de réduire les problèmes de bords rencontrés aux frontières de cellules, et par conséquent de diminuer l’influence de la pixelisation.

4.2 Fonction de distribution (PDF) du bruit de fond

La distribution du nombre de neutrinos par cellule étant évaluée de manière continue¹¹, il est nécessaire de redéfinir l’ensemble des fonctions de distributions utilisées pour estimer le bruit de fond.

Ces distributions de probabilités sont plus complexes que les distributions de Poisson utilisées précédemment, puisque des corrélations importantes entre cellules sont introduites. Une définition mathématique se révélant délicate, voire impossible, il est préférable de déduire les fonctions de diffusion directement d’un grand nombre de simulations de bruit de fond¹², et de manière indépendante pour chaque ligne et de les ajustées ensuite par des exponentielles de polynôme d’ordre 4.(Fig-10).

¹¹cette distribution (Poissonienne) était discrète dans le cas ponctuel

¹²5000 générations ont été effectuées

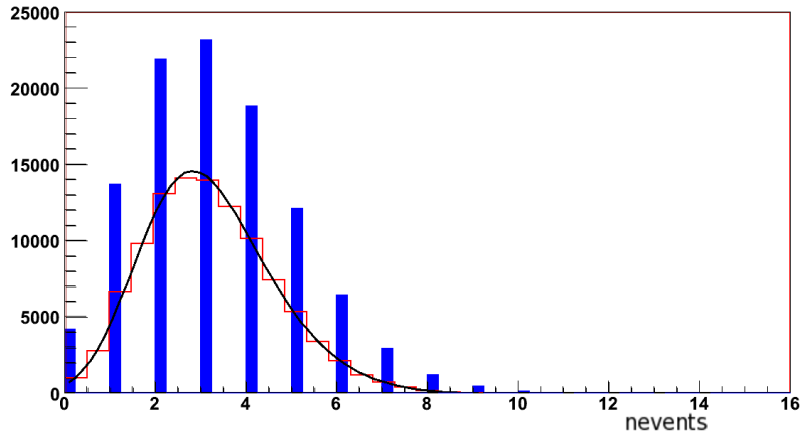


FIG. 10 – Comparaison des fonctions de distribution du nombre d'événements de bruit de fond par cellule pour la troisième bande de déclinaison. En bleu, la fonction de distribution de probabilités (PDF) des neutrinos ponctuels suit une distribution de Poisson. En rouge, l'effet de la diffusion et l'ajustement de la PDF correspondante.

4.3 Analyse

4.3.1 Test de contrôle du False Discovery Rate sur le bruit de fond

Puisque des nouvelles corrélations sont introduites par l'intermédiaire de la diffusion, le coefficient de corrélation appliqué à la méthode pour des neutrinos ponctuels ne sera plus valable et entraînera une surestimation de FDR.

Il est donc nécessaire de déterminer le coefficient de corrélation qui exprime de manière correcte ces nouvelles corrélations, et garantit le contrôle du FDR. Une étude systématique a été réalisée à faible statistique (1000 réalisations), afin de déterminer le comportement du FDR en fonction de coefficient de corrélation impliqué (Fig-11).

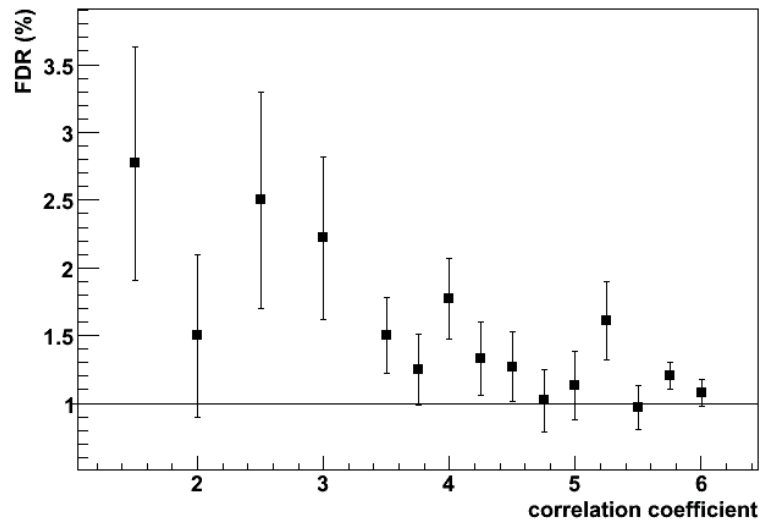


FIG. 11 – Evolution du FDR en fonction du coefficient de corrélation

Une analyse plus précise nous permet de fixer le nouveau coefficient de corrélation à

	FDR	SRC	DEPL	TOTAL
PONCTUELS	53	31	1	85
DIFFUS	102	933	64	1099
PONCT + DIFF	63	1779	14	1856
TOTAL	218	2743	79	3040

TAB. 1 – Comparaison entre l’utilisation de neutrinos ponctuels et diffus. 25 générations de bruit de fond - 25 positions de sources comptant 1 à 20 neutrinos sur 3500 neutrinos de bruit de fond

6.0, lors de l’utilisation de neutrinos diffus.

4.3.2 Pouvoir de détection du FDR

Comme précédemment, le contrôle du FDR sur des événements de bruit de fond ne garantit aucunement que ce contrôle sera assuré en présence d’une source. De plus, l’utilisation d’un coefficient de corrélation plus contraignant pourrait diminuer le pouvoir de détection de la méthode. Ces deux critères ont donc été estimés de manière similaire à ce qui avait été effectué avec les neutrinos ponctuels.

Dans le même temps une comparaison des deux méthodes a été réalisée en effectuant la même analyse, sur les mêmes réalisations, avec et sans diffusion des neutrinos. Cela nous permet d’exprimer l’influence de la diffusion sur le FDR et le pouvoir de détection.

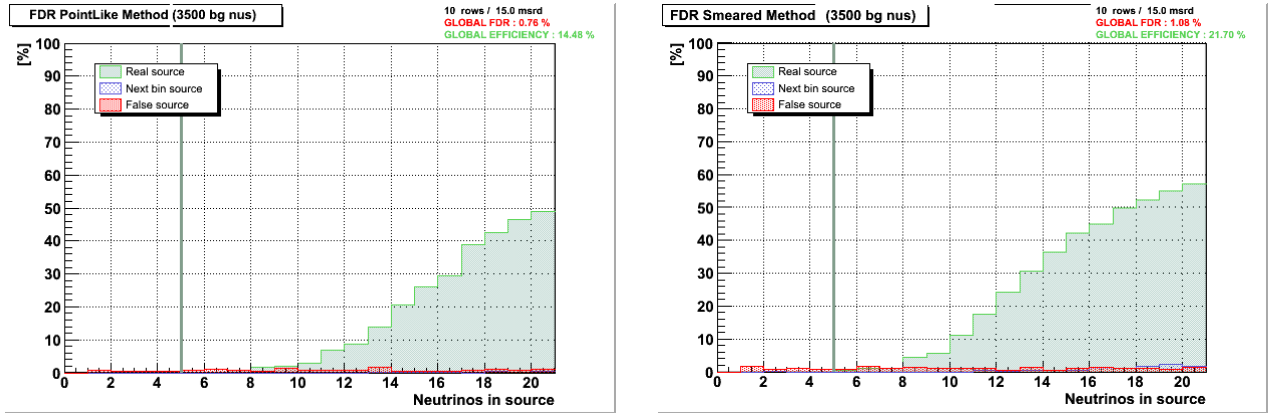


FIG. 12 – Comparaison entre l’utilisation de neutrinos ponctuels (gauche) et diffus (droite) sur 3500 neutrinos de bruit de fond

Nous pouvons constater(Fig-12) que la diffusion des neutrinos apporte un meilleur pouvoir de détection ($+7.22 \% \pm 0.23$) tout en garantissant le contrôle du FDR ($1.08 \% \pm 0.09$). De plus, l’analyse des résultats - en absolu sur 12500 réalisations - synthétisés dans le Tab-1, montre que l’apport de la méthode ponctuelle sur le pouvoir de détection est négligeable (31 événements détectés soit 1.13 %) par rapport à l’apport de la diffusion (933 événements soit 34.01 %). Il est également intéressant de noter que le nombre de sources détectées mais mal positionnées (DEPL)¹³, est presque exclusivement dû à la diffusion des neutrinos.

¹³dont on ne tient pas compte pour l’estimation du pouvoir de détection

4.4 Résultats

Nous avons comparé la méthode FDR avec d'autres approches plus traditionnelles, dont la méthode à seuil fixe décrite auparavant. Nous avons repris les résultats obtenus avec différentes approches étudiées au sein de la collaboration IceCube¹⁴ et avons reproduit les mêmes caractéristiques de ciel : un bruit de fond de 1000 neutrinos, et une source de luminosité variant de 1 à 20 neutrinos, positionnée à 22.5 degrés de déclinaison. Nous avons générés 5000 réalisations de cette configuration particulière. Nous avons ensuite effectué les trois procédés d'analyse décrits ci-dessus, toujours à un niveau de confiance de 99 %. Les courbes comparatives sont représentées à la Fig-13.

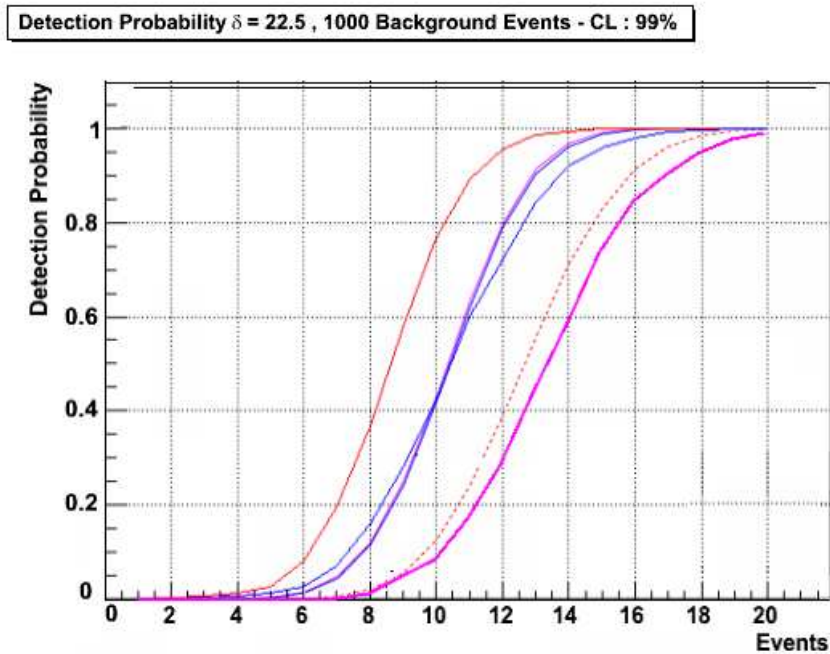


FIG. 13 – Comparaison avec différentes méthodes traditionnelles (cf. texte pour la légende)

Nous constatons que la méthode la plus efficace est le FDR combiné aux neutrinos diffus (en traits pleins rouge). 3 approches sont ensuite équivalentes : les deux méthodes dites *Unbinned Likelihood* à 5σ (en rose et bleu foncé)¹⁵ ainsi que la méthode FDR dans diffusion de neutrinos (bleu ciel). Remarquons néanmoins que cette dernière semble être plus efficace pour la détection de sources à faible luminosité. La méthode de pixelisation traditionnelle (en rouge pointillés) et la méthode à seuil fixe (en rose gras) sont relativement peu efficaces.

¹⁴voir http://wiki.icecube.wisc.edu/index.php/Unbinned_Binned_Comparison

¹⁵la différence repose sur la méthode de maximum de vraisemblance (*likelihood*) utilisée, respectivement parabolique et gaussien

5 Conclusions et perspectives

Nous avons étudié une nouvelle approche statistique afin d'augmenter le pouvoir de détection d'une source ponctuelle de neutrinos sur un bruit de fond important de neutrinos atmosphériques, tout en garantissant le niveau de confiance de l'observation.

Après avoir vérifié le faisabilité et la consistance de cette méthode en l'appliquant sur divers quadrillages, la configuration composée de 10 bandes de déclinaisons de $\sin \delta$ égales, et d'angle solide de 15 msrd s'est révélée la plus efficace, tant au niveau du contrôle du FDR que de l'efficacité de détection.

Une première étude a été effectuée en considérant les neutrinos comme ponctuels, c-à-d en négligeant la résolution du détecteur. La méthode FDR a fourni un pouvoir de détection comparable à une méthode traditionnelle à seuil fixe, tout en garantissant le contrôle du niveau de confiance.

Une analyse prenant en compte la résolution du détecteur, par l'intermédiaire d'une diffusion des neutrinos autour de leur position reconstruite a été réalisée. Elle a également été comparée à d'autres méthodes plus traditionnelles. Celle-ci s'est révélée beaucoup plus efficace que les autres approches étudiées, tout en restant conservative.

Plusieurs tentatives d'améliorations sont envisagées afin d'augmenter la sensibilité de la méthode aux sources à faible luminosité. Deux optiques sont en cours d'investigations. D'une part, l'information sur l'énergie pourrait offrir un nouveau critère de discrimination entre les neutrinos atmosphériques et cosmiques. D'autre part, l'application de la méthode FDR combinée avec une analyse de ciel non-basée sur une pixelisation pourrait se révéler avantageux, puisque elle garantirait l'uniformité de la détection quelque soit l'ascension droite de la source. Ce qui n'était pas le cas avec les quadrillages introduits, une source étant à la frontière entre plusieurs cellules étant moins facilement détectable qu'une source centrale.

Après avoir déterminé la méthode la plus efficace, la prochaine étape consistera alors à l'appliquer aux données enregistrées par IceCube durant la période 2000-2006. Enfin, nous procéderons à l'analyse des conséquences de la découverte ou de la non-découverte de sources de neutrinos sur les modèles de production des particules d'origine cosmique en fonction de l'objet stellaire éventuellement identifié.

Liste des activités liées à la thèse

Cours

- Oct-Dec 2005 : *Astrophysique à haute énergie* (15h)
- Oct-Dec 2005 : *Vérification expérimentale du Modèle Standard* (15h)
- Nov 2005 : *Structure function and parton distribution parametrisation* (5h)
- Sep 2006 : *Joint Belgian Dutch German School* - Bad Honnef, Allemagne (50 h)
- Nov 2006 : *Statistic in hep* (5h)
- Dec 2006 : *Diffraction Scattering and Parton Densities at H1* (5h)
- Jan 2007 : *IceCube Software Bootcamp* - Uppsala, Suède
- Mar 2007 : *Introduction to Cosmology and Dark Matter* (5h)
- Mai 2007 : *Introduction to astroparticle physics* (5h)

Séminaires

- Dec 2006 : *The Amanda and Icecube neutrino telescopes and the search for cosmic steady neutrino pointlike sources*, Dr.B.Baret (IIHE)
- Jan 2007 : *Physics results of the Pierre Auger Observatory*, Dr. V. Van Elewyck (IPN Orsay)
- Fev 2007 : *Study of neutrino interactions and background estimation in the OPERA Detector*, Dr. Jozsef Janicsko-Csathy (Universite de Neuchatel, CH)
- Fev 2007 : *Diffraction at HERA and the Very Forward Proton Spectrometer*, Dr. X. Janssen (IIHE - ULB)
- Mai 2007 : *Search for sources of high energy cosmic rays with the ANTARES neutrino telescope and the Auger observatory*, Dr. Jelena Petrovic (NIKHEF)
- Mai 2007 : *Journee des doctorants EDT Physique Astrophysique* - Liège

Réunions de collaboration

- Avr 2006 : *IceCube Collaboration Meeting* - Baton-Rouge, LA, USA
- Jun 2006 : *IceCube Workshop Analysis* - Penn State, PA, USA
- Oct 2006 : *IceCube Collaboration Meeting* - Zeuthen, Allemagne
- Avr 2007 : *IceCube Collaboration Meeting* - Lake Geneva, WI, USA

Présentations et publications

- Jun 2006 : *"Influence of sky pixelisation on False Discovery Rate method for Point Sources Analysis"*
Belgian Collaboration Meeting - Bruxelles
- Oct 2006 : *"Control of False Discovery Rate method for Point Source Analysis"*
IceCube Collaboration Meeting - Zeuthen, Allemagne
- Jan 2007 : *"Update on False Discovery Rate method for Point Source Analysis"*
Belgian Collaboration Meeting - Zeuthen, Allemagne
- Mai 2007 : *"Search for High Energy neutrino Point Source Signal with AMANDA-IceCube Telescope"*
Belgian Physics Society - Antwerpen