

LES SIMULATIONS DE L'INTERACTION GCR/ATMOSPHERE PAR LE CODE FLUKA

CE DOCUMENT CONTIENT LES INFORMATIONS NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE GEOMETRIQUE TERRE-ATMOSPHERE ET DU BEAM DE GCR MIS AU POINT PAR LE CERN. IL A ETE REDIGE DANS LE CADRE DE L'UTILISATION DU CODE FLUKA PAR LE SERVICE D'ASTROPHYSIQUE DU CEA. DES INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES A CE MANUEL PEUVENT ETRE TROUVEES DANS « FLUKA : A MULTI-PARTICLE TRANSPORT CODE », REFERENCE PRINCIPALE DE CE DOCUMENT. NOUS RAPPELONS QU'IL NE S'AGIT PAS LA D'UN MANUEL OFFICIEL, MAIS D'UN DOCUMENT DE TRAVAIL, A MANIPULER AVEC TOUTES LES PRECAUTIONS NECESSAIRES. DE MANIERE GENERALE IL EST FORTEMENT CONSEILLE A L'UTILISATEUR DE SE REFERER A LA DOCUMENTATION OFFICIELLE EN CAS DE DOUTE.



Natacha Combier

combier.natacha@gmail.com

Juin 2013

Fichiers et cartes nécessaires au spectre GCR	3
Les fichiers phi (all particle spectrum) :	3
BEAM :	4
GCR SPE :	4
SPECSOUR :	4
Decription de la geometrie	6
Geometrie de la terre et de l'atmosphere :	6
Geometrie de scoring :	7
Les differents modeles de champs magnetiques	9
Le modele dipolaire	9
Le modele dipolaire excentré tilté	9
Le modele IGRF	9
Physique du modele et transport des particules	11
Les modeles physiques a haute energie:	11
Les cartes PHYSICS et cartes associées:	11
les cartes transport	12
En conclusion	Erreur ! Signet non défini.

FICHIERS ET CARTES NECESSAIRES AU SPECTRE GCR

La simulation du spectre GCR repose sur les cartes permettant le BEAM ainsi que sur les fichiers contenant les spectres (fichiers phi). Nous détaillons tout ceci dans ce chapitre. L'onglet « primary » fait apparaître dans notre simulation les cartes suivantes :

```

BEAM                               Beam: Momentum ▼                p: 30000.0                Part: PROTON ▼
  Δp: Flat ▼                       Δp:                       Δφ: Flat ▼                Δφ:
  Shape(X): Rectangular ▼          Δx:                       Shape(Y): Rectangular ▼  Δy:

#define dpmjet                      :
#define OffDipole                   :

#if dpmjet ▼
  #if OffDipole ▼
    Max Z          R_emiss          Min.Ener.          Max.Ener.
    SPECSOUR      Type: GCR-IONF ▼
    #1 28.0        #2 1.160E+09      #3 0.03            #4 3000.0
    #5 1.75        #6 500.0          #7 3.0            #8
    #9             #10             #11             #12 1.0
    #13           #14           #15           #16
    #17           #18

  #else
    Max Z          R_emiss          Min.Ener.          Max.Ener.
    SPECSOUR      Type: GCR-IONF ▼
    #1 28.0        #2 1.090E+09      #3 0.03            #4 3000.0
    #5 1.75        #6 500.0          #7 1.0            #8
    #9             #10             #11             #12 1.0
    #13           #14           #15           #16
  #endif

  ----- IONTRANS : 1 card hidden -----
** End Dpmjet
#else
  #if OffDipole ▼
    Max Z          R_emiss          Min.Ener.          Max.Ener.
    SPECSOUR      Type: GCR-IONF ▼
    #1 28.0        #2 1.160E+09      #3 0.03            #4 3000.0
    #5 1.75        #6 500.0          #7 3.0            #8
    #9             #10             #11             #12 1.0
    #13           #14           #15           #16
  #else
    Max Z          R_emiss          Min.Ener.          Max.Ener.
    SPECSOUR      Type: GCR-IONF ▼
    #1 28.0        #2 1.090E+09      #3 0.03            #4 3000.0
    #5 1.75        #6 500.0          #7 1.0            #8
    #9             #10             #11             #12 1.0
    #13           #14           #15           #16
  #endif

  ----- IONTRANS : 1 card hidden -----
** End no Dpmjet
#endif

  ----- DISCARD ... RANDOMIZ : 1040 cards hidden -----
#if OffDipole ▼
  B0_eq en T
  GCR-SPE          Field: undefined ▼          Shells: 101          Radius:
  Equatorial Field: 2.99502E-5          Dump shell: 0          Unit: 0          DateFile: phi1440
  Radius phi lambda NP latit NP longit
  GCR-SPE          Field: ?563 ▼          Shells: 0          Radius: 80.02
  Equatorial Field: -72.21          Dump shell: 0          Unit: 0          DateFile: DIFCOORD
#else
  Centered dipole:          B0_eq en T
  GCR-SPE          Field: naive dipole ▼          Shells: 101          Radius:
  Equatorial Field: 2.99502E-5          Dump shell: 0          Unit: 0          DateFile: phi1440
#endif

START          No.: 3000000.          Core: ▼
              Time:          Report: default ▼

  ----- STOP : 1 card hidden -----

```

LES FICHIERS PHI (ALL PARTICLE SPECTRUM) :

Ils contiennent les spectres GCR des différentes particules incidentes (tirés de [Badwar and O'Neil 96](#), modifiés pour être en adéquation avec des données AMS et BESS). Ils ne prennent pas en compte le cutoff géomagnétique car ils correspondent au spectre hors champ magnétique terrestre. Ils seront ensuite traités analytiquement (formule de Störmer) au travers de la carte SPECSOUR.

01phi1440.scp contient le spectre proton, 02phi1440 celui des noyaux d'hélium etc. jusqu'à Z=28. Ces 28 fichiers doivent être contenus dans le dossier du projet et sont automatiquement appelés par la carte GCR-SPE.

Il est possible de générer ainsi le spectre correspondant à différentes années en utilisant l'exécutable hiz. On choisit soit une date soit un coefficient de modulation solaire et les fichiers spc sont générés automatiquement. Sont également générés des fichiers scu qui correspondent au spectre après cutoff. Dans notre cas, étant donné que le cutoff est appliqué lors de la simulation, nous utilisons les fichiers spc uniquement.

BEAM :

Il s'agit d'une carte classique pour la description du faisceau incident (par exemple pour un faisceau de protons de 20 MeV). Dans notre cas elle est insuffisante pour décrire le spectre GCR (trop compliqué). Cependant elle doit quand même apparaître et recouvrir le spectre que l'on va envoyer. On choisit donc $p=30000$ Ge/c (valeur supérieur au momentum max de notre spectre).

De la même façon, lorsque l'on utilise une routine pour décrire un spectre complexe, la carte BEAM doit apparaître et avoir une valeur d'énergie supérieure au maximum de la routine.

GCR SPE :

Elle permet (avec la carte SPECSOUR) de définir le champ magnétique que l'on souhaite utiliser. Dans l'exemple ci-dessus il y a 2 possibilités :

- Avec l'option « off dipole » c'est le dipôle excentré tilté qui est utilisé (dans ce cas, 2 cartes sont nécessaires)
- Sinon c'est le dipôle centré

Des explications plus détaillées sur les 3 modèles existants seront fournies dans le chapitre suivant¹.

SPECSOUR :

Cette carte est utilisée dans tous les cas où l'on souhaite utiliser un spectre un peu complexe (GCR ou non). Dans notre cas, les différents champs à remplir sont :

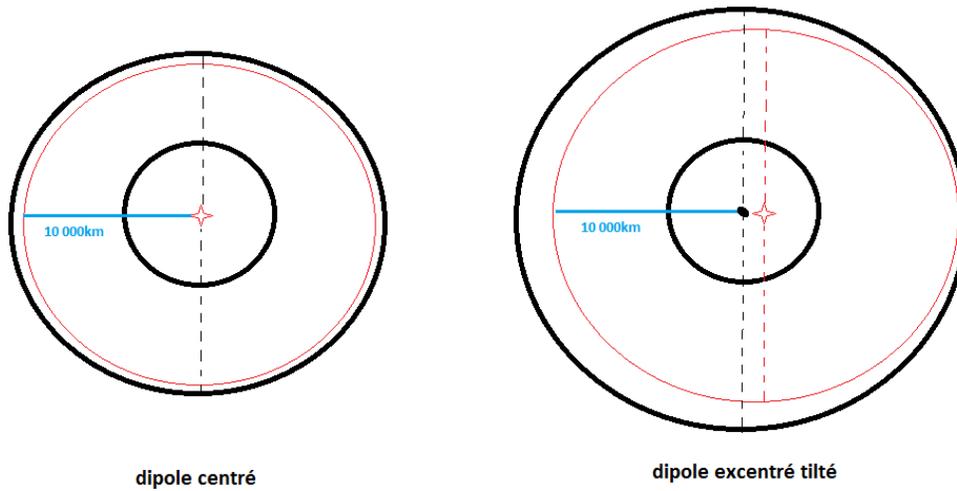
- Le numéro atomique maximum
- Le rayon de la sphère de scoring qui doit être le même que celui indiqué dans la partie « géométrie » (pour pouvoir calculer analytiquement le cutoff de chaque particule avant de les tirer).
- La bande d'énergie
- L'échantillonnage pour les basses énergies (1.75)
- L'énergie de transition pour échantillonnage (500)
- Le cutoff géom. (1:cutoff activé, 3 :(dans le cas de l'IGRF) cutoff calculé à l'aide du modèle excentré tilté)
- le transport (1)

¹ Voir chap. « Les différents modèles de champ magnétique »

Énergie de transition:

On augmente artificiellement la quantité de particules tirées à haute E (les plus actives). Il s'agit donc d'un biaisage du beam qui permet d'avoir une statistique correcte à haute énergie sans avoir à envoyer un nombre de particule inutilement élevé à basse énergie.

Lorsque l'option « offdipole » est active il faut augmenter la taille de la sphère du BEAM. En effet le modèle est toujours centré sur le centre géographique de la terre alors que le centre du champ magnétique (et donc la sphère de BEAM) est décalé d'environ 500km. Donc pour que notre modèle soit toujours valide jusque 10 000km, on augmente la sphère de BEAM. La limite du void doit aussi être augmentée.

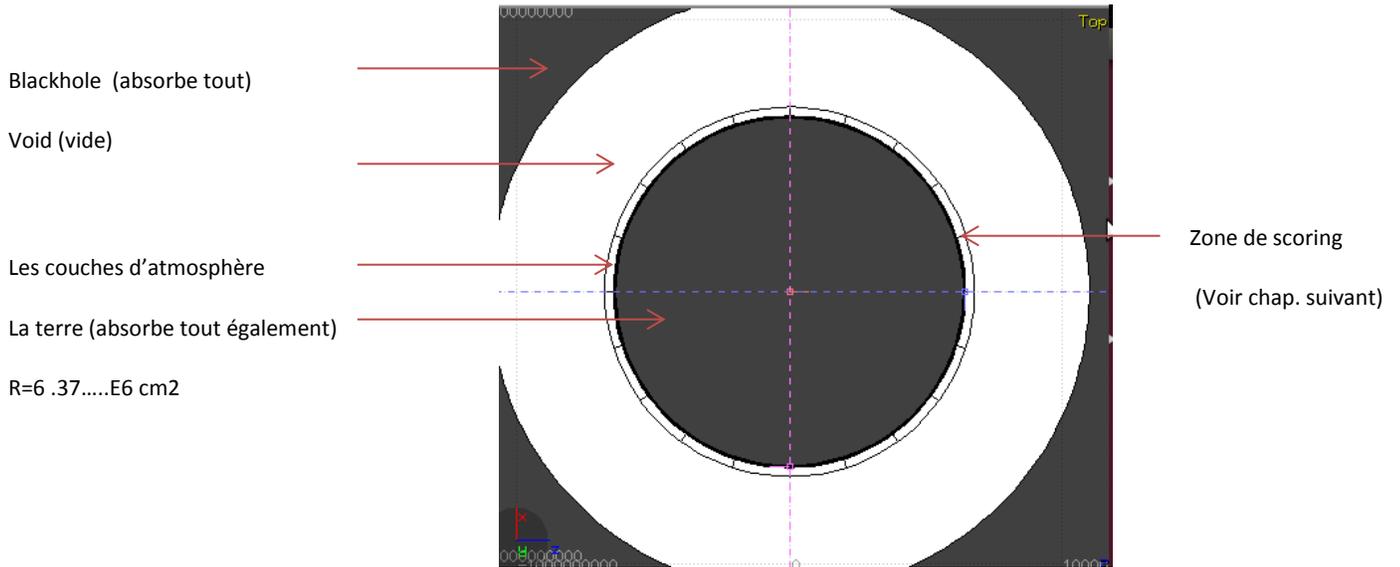


DESCRIPTION DE LA GEOMETRIE

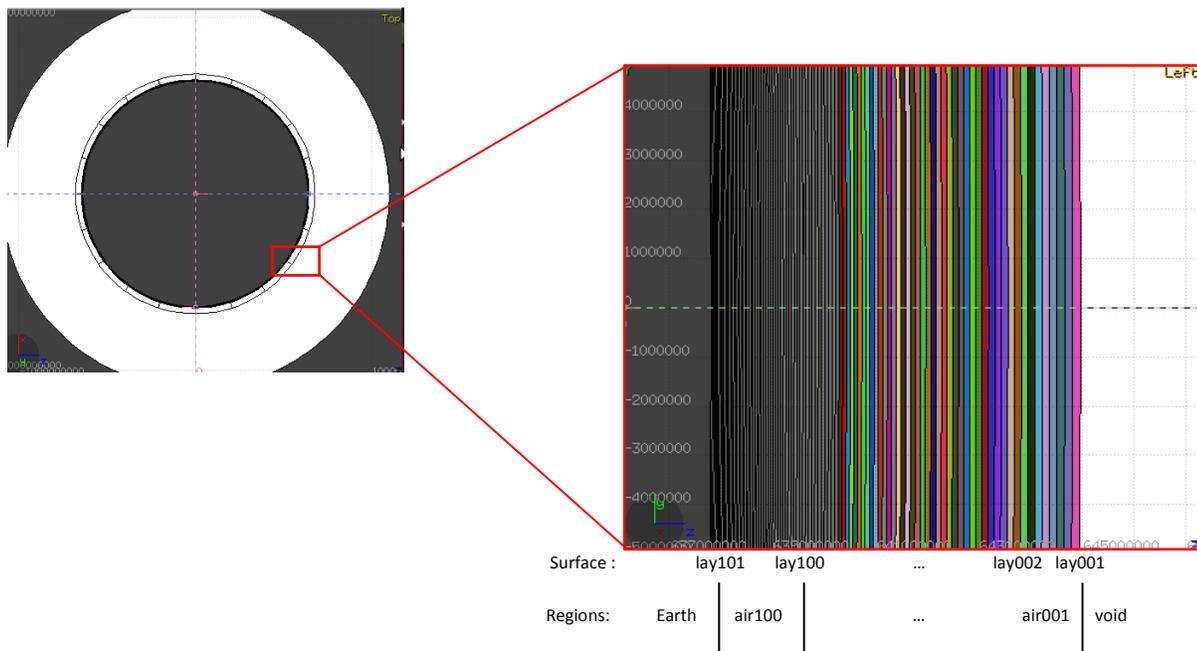
Nous présentons notre géométrie qui simule la terre, les couches d'atmosphère et le Beam. Ensuite sera exposé le scoring utilisé.

GEOMETRIE DE LA TERRE ET DE L'ATMOSPHERE :

- Notre géométrie est composée des éléments suivants :



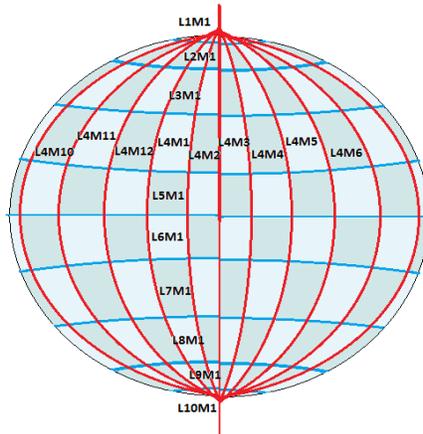
- Les couches d'atmosphère sont organisées de la façon suivante :



Il existe donc 100 couches allant de 0 à 70km d'altitude. Leur composition, leur épaisseur et leur densité varie avec l'altitude (suivant l'US Standard Atmosphère, air sec).

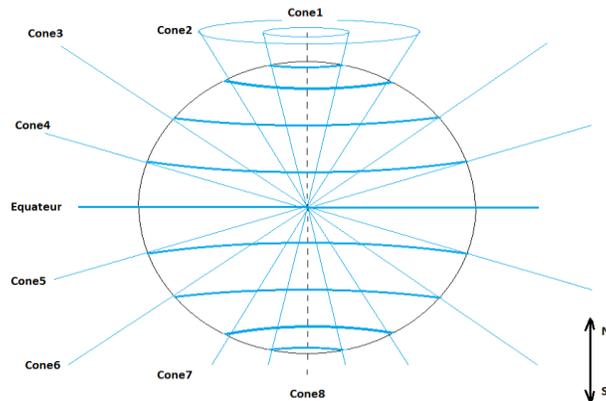
GEOMETRIE DE SCORING :

La géométrie de scoring a été choisie de manière à permettre un scoring de type « maillage », à différentes altitudes. Nous mesurons la fluence des neutrons à la traversée (vers le zénith) de chaque surface que nous appellerons désormais détecteurs. Le découpage est de 12 détecteurs en longitude (aux noms allant de M1 à M12, M comme « méridien ») et 10 détecteurs en latitude (aux noms allant de L1 à L10). Chaque détecteur a donc un nom la forme $LyMx$ qui permet de le situer géographiquement.

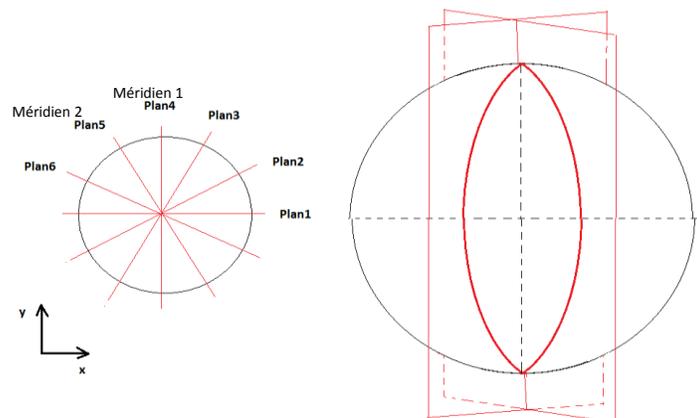


Ce découpage a été réalisé aux moyens de 3 types de surfaces :

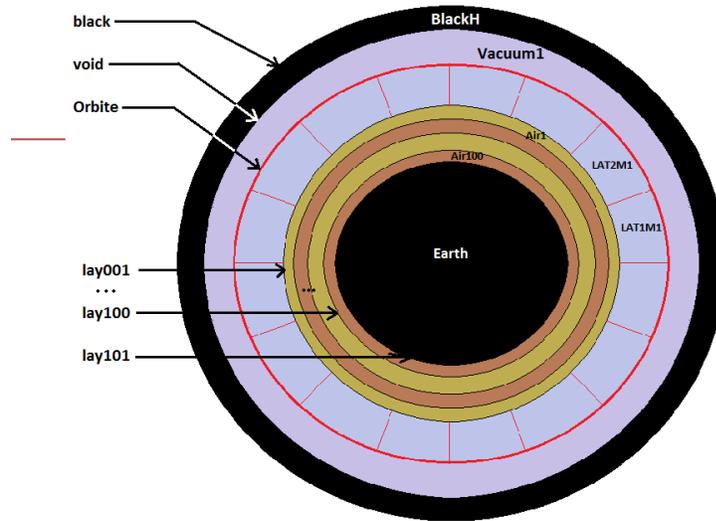
- Des cônes délimitant les parallèles :



- Des plans délimitant les méridiens :



- La surface de scoring (appelle « Orbite » dans l'onglet « géométrie » de Flair) qui délimite l'altitude de scoring :



LES DIFFERENTS MODELES DE CHAMPS MAGNETIQUES

Comme il a été vu précédemment, il existe 3 différents type de champ magnétique que l'on peut utiliser pour notre simulation : le modèle dipolaire, le modèle dipolaire excentré tilté et le modèle IGRF.

LE MODELE DIPOLAIRE

Il est défini par la carte GCR-SPE. Pour activer cette carte, il faut désactiver le flag « offdipole ». Pour cela, il suffit d'ouvrir le fichier input et de supprimer la ligne de code « define offdipole ».

```
Centered dipole: B0_eq en T
GCR-SPE Field: naive dipole
Equatorial Field: 2.99502E-5 Dump shell: 0 Shells: 101 Unit: 0 Radius: DateFile: phi1440
```

LE MODELE DIPOLAIRE EXCENTRE TILTE

Pour être défini, ce modèle nécessite l'introduction de 2 cartes dans flair. A l'heure actuelle, les cartes de Flair ne sont pas mise à jour par rapport au code et donc Flair détecte une erreur (en rouge) là où il n y en a pas.

```
B0_eq en T
GCR-SPE Field: undefined
Equatorial Field: 2.99502E-5 Dump shell: 0 Shells: 101 Unit: 0 Radius: DateFile: phi1440
Radius phi lambda NP latit NP longit
GCR-SPE Field: ?563
Equatorial Field: -72.21 Dump shell: 0 Shells: 0 Unit: 0 Radius: 80.02 DateFile: DIPCOORD
```

Si l'on souhaite implémenter un nouveau modèle, mieux vaut donc recopier les lignes de code directement dans l input :

```
*.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
GCR-SPE 101004. 2.99502E-5 phi1440
*.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
GCR-SPE 563.28 22.49 140.22 80.02 -72.21 DIPCOORD
```

Les champs de la seconde carte correspondent à :

- Les coordonnées du centre du dipôle (R, θ , ϕ).
- Les coordonnées du pôle nord géomagnétique (lat., long).
- « Dipcoord » indique que cette carte GCR-spe permet de préciser les coordonnées du dipôle.

Dans la version plus récente de Flair la carte est adapté au modèle est apparait sous cette forme :

```
IGRF11: B0_eq [T]
GCR-SPE Type: Spectra
Equatorial Field: 2.99502E-5 Field: exact multipole
3456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
Radius phi lambda NP latit NP longit Shells: 101 Unit: 0 Radius: DateFile: phi1440
GCR-SPE Type: DIPCOORD
Rdip: 563.28 dip: 22.49 dip: 140.22
Date: 2010.0 north: 80.02 north: -72.21
```

LE MODELE IGRF

Ce modèle est basé sur le champ IGRF remis à jour régulièrement. Le code fournit par le modèle permet de calculer le champ magnétique en tout point de la simulation. En revanche il n y a (pour l'instant) pas de backtracking. La formule de Störmer est toujours appliquée au BEAM et s'appuie encore sur le dipôle excentré tilté. C'est pourquoi il est nécessaire de conserver la carte codant pour le modèle excentré tilté.

Pour activer ce modèle sur la version ou flair ne reconnait pas la carte, il suffit de remplacer la valeur 101004 par 101001 dans la carte GCR-SPE.

```
*.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....  
GCR-SPE      1010041                2.99502E-5                phi1440
```

Dans la version qui reconnait ce modèle, la carte apparait sous la forme suivante (101001 étant traduits par l'expression « exact multipole ») :

```
IGRF11:
GCR-SPE
Equatorial Field: 2.99502E-5

BO_eq [T]
Type: Spectra
Field: exact multipole
Dump shell: 0

Shells: 101
Unit: 0

Radius:
DateFile: phi1440
```

LES MODELES PHYSIQUES A HAUTE ENERGIE:

Flukahp est l'exécutable par défaut du code Fluka et marche très bien pour la plupart des applications. Dans certains cas où l'on manipule des ions lourds, il peut s'avérer nécessaire d'utiliser l'exécutable **flukadpm3** qui contient les 2 modèles que nous détaillons ci-dessous.

MODELE DE SUPERPOSTION RQMD:

Avec l'exécutable flukadpm3, ce modèle est utilisé automatiquement pour des énergies comprises entre 5GeV et 100MeV. Les ions primaires ne sont plus traités comme des noyaux mais comme des ensembles de nucléons indépendants. En dessous de 100MeV c'est le modèle BME qui est utilisé.

MODELE DPMJET

Au-dessus d'une certaine énergie (A-A : 5GeV/nucléon, hadrons-A : 20TeV) ce modèle simule les collisions noyau/noyau (qui sont désormais vu en tant que particules et plus en tant que groupe de nucléons). En dessous, c'est le modèle de superposition qui est utilisé. Dans ce cas, le générateur d'évènements externes est DPMJET et l'exécutable est flukadpm3. Pour le sélectionner depuis Flair, on sélectionne « flukadpm3 » comme Link dans l'onglet « compile », puis on « build ».

LES CARTES PHYSICS ET CARTES ASSOCIEES:

Nous présentons dans ce paragraphe certaines des cartes décrivant la physique utilisée dans notre modèle.

EVAPORAT:

Dans Fluka, la modélisation des phénomènes d'évaporation s'arrête normalement aux gammas. Cette carte permet d'activer cette modélisation dans le cas de particules plus lourdes. Cette carte est importante pour simuler les problèmes d'activation (transmutation des atomes (généralement en éléments radioactifs) par irradiation de particules nucléaire).

COALESCE:

Cette carte active une option qui permet la fabrication de Deutérium a très haute E (collision 2p et 2n).

PEATHRES:

Sans cette carte c'est le modèle Peanut qui est utilisé pour toutes les particules jusqu' à 5GeV. Lorsque l'on utilise cette carte le seuil est élevé à 30 TeV (particulièrement nécessaire lors des interactions A-A). Au-dessus de ce seuil, le modèle utilisé est moins bon mais plus rapide (plus ancien).

IONSPLIT:

Elle permet d'activer le modèle de superposition. Par exemple comme il n'existe pas de modèle pour le deutérium en dessous de 150MeV le modèle de superposition permet de le traiter. Lorsque Dpmjet est actif on applique le modèle superposition seulement aux ions d'énergie comprise entre 100MeV et 150MeV. Dans le cas contraire, il faut étendre le modèle pour permettre de traiter tous les ions à haute énergie.

DECAYS:

Cette carte permet de choisir le mode de simulation du phénomène de désintégration que l'on applique ensuite aux particules d'indices compris entre les 2 bornes données (dans notre cas, entre le proton et la dernière des particules). Elle est principalement utilisée pour les pions et les kaons, afin de leur donner une polarisation.

DETARAY:

Cette carte permet de n'activer la modélisation du rayonnement delta (électron issu d'une ionisation) qu'au-dessus d'un seuil d'énergie donnée (Ethres). En dessous les e- produit par ionisation ne sont pas modélisés et l'énergie d'ionisation est entièrement déposée sur le chemin de la particule incidente.

PHOTONUC:

Active la modélisation des interactions gamma-noyau.

MUPHOTON:

Contrôle les interactions photo nucléaires entre muons

PAIRBREM:

Contrôle la simulation de production de pair et le bremsstrahlung (rayonnement continu de freinage) issus de muons haute énergie, hadrons chargés et d'ions légers. Elle est principalement utilisée pour prédire le couple des muons.

DISCARD:

Cette carte permet de supprimer certaines des particules qui ne nous intéressent pas. Dans le cas où 2 cartes se suivent la seconde peut réactiver certaines des particules supprimées par la première (si elle a supprimé par exemple toutes les particules dont la référence est comprise entre 1 et 10).

LES CARTES TRANSPORT

PART-THR:

Cette carte permet de fixer le threshold des parts. En général on le met à un MeV sinon le CPU devient trop important. Dans le cas des neutrons, on peut le mettre plus bas car c'est ce qui nous intéresse et ils réagissent peu.

IONTRANS:

Active le transport des ions lourds².

EMF:

-on: les photons et les électrons sont modélisés (valeur par défaut)

-off: on ne les prend pas en compte ce qui permet de réduire le temps de calcul (sans perdre l'information utile dans le cas de spectre neutrons).

MGNFIELD:

Permet de spécifier la précision du transport de particules chargées dans un champ magnétique (angle max par pas etc.). Lorsque les 3 composantes du champ sont nulle, elle indique à Fluka d'utiliser la routine qui définit ce champ.

EMFCUT:

Permet de choisir le threshold des électrons et photons en fonction des matériaux (inutile donc si EMF sur off). N a de sens qu'avec une option EMF.

TIME-CUT:

Permet de choisir combien de temps est suivit une particule avant d'être considérée comme perdue (par défaut aucun coiffe). Dans le cas où il y aurait 2 cartes, la première peut spécifier un timecut commun à toutes les particules et la seconde à rallonger le timecut de l'une des particules (c'est pour cela qu'elle doit être placée derrière).

² Voir chap. « Les modèles physiques à haute énergie »

EN CONCLUSION

Nous avons tenté de présenter ici les informations de base permettant une première approche du modèle d'interaction GCR/atmosphère. Il s'agit d'une documentation non officielle qui s'appuie principalement sur les documents suivant :

-le site officiel de Fluka : <http://www.fluka.org/fluka.php>

-le manuel d'utilisation de Fluka disponible sur le site (notamment au chapitre 16)

Il est conseillé de se reporter à ces ouvrages en cas de doute ou pour obtenir des informations supplémentaires.

REMERCIEMENTS

Un grand merci pour leur soutien et leur patience à Alfredo Ferrari et Markus Brugger (CERN) sans qui ce travail n'aurait pas été possible.

Merci aussi à Ruben Garcias (CERN) pour son aide, notamment en ce qui concerne l'utilisation des routines Fluka.

Tous mes remerciements à Arnaud Claret (CEA) pour son implication dans ce projet et la confiance qu'il m'a accordé.

Merci enfin à toute la Fluka Team, pour leur accueil et leur aide au cours de mes différents séjours au CERN.