



**HAL**  
open science

## Simulation des expériences de physique des particules : le logiciel GEANT3

M. Maire

► **To cite this version:**

M. Maire. Simulation des expériences de physique des particules : le logiciel GEANT3. École thématique. Ecole Joliot Curie "Physique nucléaire instrumentale: des éléments pour un bon choix", Maubuisson, (France), du 12-17 septembre 1994 : 13ème session, 1994. cel-00648812

**HAL Id: cel-00648812**

**<https://cel.hal.science/cel-00648812>**

Submitted on 6 Dec 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# SIMULATION DES EXPERIENCES DE PHYSIQUE DES PARTICULES

## Le logiciel GEANT3

*Michel Maire*

In2p3 - Lapp (Annecy)

BP110 F-74941 Annecy-le-vieux, France

### Résumé

GEANT3 est un logiciel d'aide à la simulation sur ordinateur des expériences de physique des particules. On explique les deux principales fonctions que ce type de logiciel doit remplir : description géométrique des détecteurs et simulation des interactions particules-matière.

GEANT3 is a computer program which has been designed for the needs of Particle Physics experiments. We summarize two of the main components of such a program : the geometrical description of the detectors and the simulation of the particle-matter interactions.

### 1. Généralités

Les expériences de physique des particules croissent en taille et en complexité. Les simulations sur ordinateur de ces expériences deviennent essentielles pour :

- définir et optimiser les détecteurs;
- développer et tester les algorithmes de déclenchement et les programmes de reconstruction;
- interpréter les données expérimentales.

Le logiciel GEANT3 (pour **g**eneration **a**nd **t**racking, version **3**) a été conçu pour aider le physicien dans de telles tâches. Ce logiciel simule le passage des particules élémentaires dans la matière en tenant compte :

- de la définition géométrique des détecteurs;
- des interactions particules-matière qui peuvent survenir lors du transport de la particule. Ces interactions sont considérées comme des phénomènes aléatoires : de manière fondamentale le programme utilise des techniques de type Monte Carlo.

Par conséquent ce programme permet :

- 1 - de décrire la géométrie d'un ensemble expérimental;
- 2 - de créer des "événements primordiaux" ou d'accepter ceux provenant de générateurs extérieurs;
- 3 - de transporter les particules dans les différentes parties de l'appareillage;
- 4 - d'enregistrer les trajectoires des particules et la réponse des détecteurs;
- 5 - de visualiser les détecteurs et les particules.

Le programme peut fonctionner soit en mode "batch", lorsque l'on veut simuler un grand nombre d'événements pour obtenir un résultat statistique significatif, soit en mode interactif lorsque l'on veut analyser et visualiser le détail de ce qui arrive dans un événement donné. Etant donné la complexité des détecteurs et des événements le programme doit donc offrir des fonctionnalités graphiques et interactives qui soient à la fois simples et puissantes.

La simulation des interactions particules-matière dans le domaine d'énergie couvert par ce logiciel (10 KeV ---> 10 TeV) n'intéresse pas seulement la physique des particules. Il existe des applications dans des activités aussi différentes que les sciences médicales, la radioprotection, l'astronautique ...

## 2. Le "tracking" des particules

Faire le "tracking" (je ne chercherai pas à traduire ce terme) d'une particule à travers un détecteur signifie calculer un ensemble de points (7-tuple :  $x, y, z, t, p_x, p_y, p_z$ ) qui est appelé la trajectoire de la particule. Ceci est réalisé en intégrant les équations de mouvement d'un point de la trajectoire au suivant (on appelle ce pas d'intégration *un step*) et en appliquant les corrections à la trajectoire dues à la présence de matière.

Pour avoir une description détaillée de la cinématique de la particule, il serait nécessaire de calculer un point de la trajectoire chaque fois que l'impulsion de la particule change. Ceci n'est pas possible puisqu'il impliquerait le calcul d'une quantité énorme de points : des processus tels que la déviation d'une particule chargée dans un champ magnétique ou l'énergie perdue par ionisation sont essentiellement continus. Par conséquent on fait une distinction entre processus 'discrets' et processus 'continus'. Un processus discret est caractérisé par une probabilité d'occurrence du phénomène. Ceci définit une longueur sur laquelle la particule peut voyager librement avant que le phénomène ne se produise (voir paragraphe suivant : interactions particules-matière). Les processus continus, quant à eux, sont pris en compte systématiquement à chaque step.

On peut diviser le tracking d'une particule sur un step en trois phases : la première phase est l'estimation *a priori* de la longueur du step à venir. Ceci est effectué automatiquement par le programme. Pour une particule d'énergie donnée la dimension du step dépend d'abord de ses propriétés intrinsèques (masse, charge, durée de vie) et des caractéristiques du milieu ambiant. Cette dépendance peut être due soit aux processus (quasi)continus qui, imposent une limite supérieure à l'intervalle d'intégration, soit à l'occurrence d'un processus discret qui introduit une discontinuité dans la trajectoire. En plus des effets physiques il y a des contraintes de nature géométrique : la longueur du step est limité par la distance à la frontière du milieu ambiant.

En définitive la longueur d'un step est contrainte par un ensemble de conditions qui sont, par défaut, définis automatiquement (mais que l'utilisateur peut optimiser) tels que :

- les probabilités des processus discrets,
- la distance à la frontière,
- la déflexion maximum autorisée dans un champ magnétique,
- la fraction maximum d'énergie perdue sur un step,
- la précision sur la longueur du step lors de la traversée d'une frontière.
- ...etc...

Deuxième phase : lorsque la dimension du step a été décidée on transporte la particule, c'est-à-dire que l'on intègre les équations de mouvement sur ce step. Ce transport est simplement une droite pour une particule neutre, ou en l'absence de champ. C'est une hélice dans un champ magnétique uniforme; si le champ n'est pas uniforme, l'utilisateur doit fournir la carte du champ, et la trajectoire est calculée par une méthode de type Runge Kutta.

Troisième phase : à la fin du transport sur le step, le mécanisme discret éventuel qui a déterminé la longueur de ce step est simulé (par exemple l'émission d'un photon de rayonnement de freinage par un électron : le photon est créé), et les corrections à la trajectoire dues aux processus continus sont appliquées : énergie perdue par ionisation, diffusion Coulombienne multiple. Les particules éventuellement créées sont placées dans une file d'attente en vue d'un tracking ultérieur.

On voit donc que le déroulement du programme est intrinsèquement séquentiel, en ce sens que les particules sont traitées une à une, et step par step.

### 3. Les interactions particules - matière.

On doit prendre en compte toutes les interactions particules-matière depuis 10 KeV jusqu'à 10 TeV. Ce domaine d'énergie correspond aux besoins actuels de la physique des particules. Pour les électrons et les photons il est souhaitable de descendre en dessous de 10 KeV dans les milieux peu denses tels que les gaz; ceci est en cours de développement. Pour ce qui concerne les interactions hadroniques la coupure inférieure est en fait de l'ordre de la dizaine de MeV.

#### • Les Processus de physique

On a listé ci-dessous les phénomènes (on dit processus) qui sont actuellement simulés par le programme, en les classant suivant la nature de la particule incidente : photon, électron, muon, tous les hadrons.

- Photons
  - création de paire électron/positon
  - collision Compton
  - effet photo électrique
  - diffusion Rayleigh (option)
  - photo fission des éléments lourds
- Electrons / Positons
  - diffusion multiple (Molière)
  - ionisation et production de 'rayons delta'
  - rayonnement de freinage (bremsstrahlung)
  - annihilation des positons
  - photons Cerenkov
  - rayonnement synchrotron
- Muons
  - diffusion multiple (Molière)
  - ionisation et production de 'rayons delta'
  - désintégration en vol
  - rayonnement de freinage (bremsstrahlung)
  - création directe de paire électron/positon
  - interactions nucléaires
  - photons Cerenkov
- Hadrons
  - diffusion multiple (Molière)
  - ionisation et production de 'rayons delta'
  - désintégration en vol
  - interactions hadroniques
  - photons Cerenkov
- Ions lourds
  - diffusion multiple (Molière)
  - ionisation et production de 'rayons delta'
  - interactions hadroniques
  - photons Cerenkov

Comme il a été indiqué dans le paragraphe précédent on distingue les processus discrets et les processus quasi continus (diffusion multiple et ionisation).

#### • Simulation des processus discrets

Simuler un tel processus signifie : - évaluer la probabilité d'occurrence du phénomène;  
- s'il se produit, calculer l'état final qui en résulte.

Tous les processus discrets obéissent au même schéma général que nous allons exposer maintenant.

La section efficace totale d'un processus donné est généralement fonction de l'énergie de la particule incidente et des caractéristiques de l'atome cible, c'est à dire du milieu ambiant :  $\sigma(E, Z, A)$ .

Désignons par  $N$  le nombre d'Avogadro et  $\rho$  la densité du milieu. La quantité  $\eta = (N \cdot \rho \cdot \sigma / A)$  est la section efficace totale macroscopique du phénomène dans ce milieu. Elle est homogène à l'inverse d'une longueur ( $\text{cm}^{-1}$ ), et peut être interprétée comme la probabilité d'interaction par unité de longueur (de ce processus dans ce milieu). La distance que parcourt une particule depuis sa création jusqu'à son point d'interaction est une variable aléatoire,  $\ell$ , de densité de probabilité :

$$f(\ell) = \eta \exp(-\eta \ell)$$

Par conséquent  $\lambda = \eta^{-1}$  est le libre parcours moyen associé au processus considéré. Lorsqu'une particule est créée on peut choisir  $\ell$  suivant la formule  $\ell = -\lambda \text{Log}(r)$  où  $r$  est un nombre aléatoire de densité uniforme sur  $[0,1]$ .

Ceci est correct dans un milieu homogène infini. Mais  $\lambda$  et  $\ell$  dépendent du milieu et, donc, changent de valeur lorsque la particule passe une frontière. On définit donc le 'nombre de libre parcours moyen'

$$n_\lambda = \ell / \lambda$$

C'est une variable aléatoire *indépendante* du milieu matériel, de densité de probabilité  $f(n_\lambda) = \exp(-n_\lambda)$ . C'est ce nombre que l'on fixe à la naissance de la particule :  $n_\lambda = -\text{Log}(r)$ .

Lorsque la particule décrit sa trajectoire on décompte le nombre de libre parcours moyen déjà parcourus :  $n_\lambda' = n_\lambda - (\Delta / \lambda_i)$ , où  $\Delta$  est le step qui vient d'être effectué et  $\lambda_i$  le libre parcours moyen dans le milieu matériel actuel.

Le parcours potentiel restant avant interaction est donc  $\ell = n_\lambda' \lambda_i$ , qui servira à évaluer le prochain step de la trajectoire. On procède ainsi indépendamment pour chaque mécanisme concurrentiel que la particule est susceptible de subir, et le prochain step effectif sera le minimum de tous les parcours potentiels possible (et des contraintes de géométrie).

Il y a lieu d'éviter de recalculer  $\lambda$  à chaque step. Cette quantité est donc stockée pour chaque milieu, comme une fonction de l'énergie de la particule incidente. On procède ensuite par interpolation dans ces tables. Sur la figure 3 on montre la structure d'une telle banque de données. On peut faire l'histogramme de ces sections efficaces : voir un exemple sur la figure 4.

Lorsque  $n_\lambda = 0$  on déclenche le processus, c'est à dire que l'on calcule l'état final qui résulte du phénomène. Les variables cinématiques qui définissent cet état final sont choisies de façon aléatoire, la densité de probabilité étant donnée par la section efficace différentielle du phénomène. Les formules sont généralement assez compliquées, et le ou les tirages aléatoires se font selon une technique "d'acceptation - rejection". Voir le manuel Geant, article PHYS 211, pour une explication de cette méthode.

La figure 5 montre un électron de 200 MeV entrant dans un bloc d'Aluminium de 10 cm (longueur de radiation : 9 cm). Un champ magnétique uniforme de 5 Tesla est perpendiculaire au plan de la feuille. Les particules sont suivies jusqu'à 10 KeV. Les photons de rayonnement de freinage, les créations de paires, les diffusions Compton sont bien visibles : on a le début d'une gerbe électromagnétique. Sur la figure 10 un électron de 10 GeV déclenche une gerbe dans 60 cm d'Argon liquide (longueur de radiation : 14 cm). On n'a dessiné que les traces des particules chargées :  $e^+$ ,  $e^-$ .

#### • Ionisation

Une particule chargée d'énergie  $E$  heurte un électron d'un atome du milieu ambiant. Cet électron est éjecté avec une énergie  $\varepsilon$ . Après le choc la particule incidente a une énergie  $E' = E - \varepsilon$ ; sa déviation angulaire est généralement négligeable. Soit  $\alpha(E, \varepsilon)$  la section efficace de ce processus.

Appelons  $\varepsilon_{\text{max}}$  l'énergie maximum transférable de la particule incidente à l'électron (souvent appelé rayon delta) :  $\varepsilon$  peut varier de 0 à  $\varepsilon_{\text{max}}$ .  $\sigma(E) = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon_{\text{max}}} \alpha(E, \varepsilon) d\varepsilon$  est donc la section efficace d'éjection

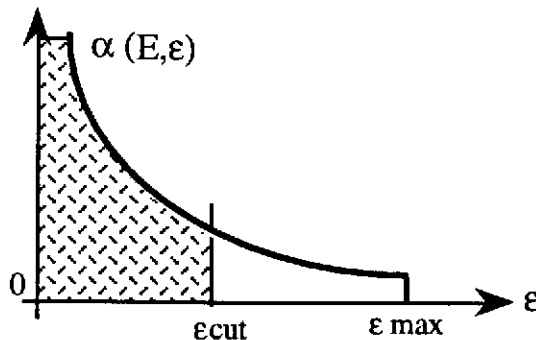
d'un électron quelque soit son énergie. Or  $\alpha(E, \varepsilon)$  tend vers l'infini lorsque  $\varepsilon \rightarrow 0$  et l'intégrale ci-dessus est divergente.

Cependant l'intégrale  $\langle \varepsilon \rangle = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon_{\max}} \alpha(E, \varepsilon) \varepsilon d\varepsilon$  est convergente, et représente l'énergie moyenne de l'électron éjecté. La quantité macroscopique  $\frac{dE}{dx} = \frac{N\rho}{A} \langle \varepsilon \rangle$  est l'énergie moyenne perdue par la particule incidente par unité de longueur : c'est la formule de Bethe et Bloch.

Soit  $\varepsilon_{\text{cut}}$  une valeur arbitraire entre 0 et  $\varepsilon_{\max}$ . on peut définir :

$$\langle \varepsilon \rangle_{\text{cut}} = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon_{\text{cut}}} \alpha(E, \varepsilon) \varepsilon d\varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma(E, \text{cut}) = \int_{\varepsilon=\varepsilon_{\text{cut}}}^{\varepsilon_{\max}} \alpha(E, \varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$



L'intégrale (1) conduit à la valeur moyenne de l'énergie perdue par la particule ionisante par unité de longueur due à l'éjection d'électrons d'énergie inférieure à  $\varepsilon_{\text{cut}}$  : c'est la formule *restreinte* de Bethe et

Bloch  $\left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{cut}}$

L'intégrale (2) est la section efficace totale d'éjection d'un électron d'énergie supérieure à  $\varepsilon_{\text{cut}}$ . On a donc divisé le phénomène d'ionisation en deux parties :

- 1 - le calcul de l'énergie moyenne perdue par la particule ionisante le long de sa trajectoire, due aux électrons d'énergie inférieure à  $\varepsilon_{\text{cut}}$ . Ces électrons ne sont pas explicitement générés, mais le calcul de la perte d'énergie de la particule incidente doit être effectué à chaque step de sa trajectoire. C'est un processus "continu".
- 2 - l'éjection explicite d'électrons d'énergie supérieure à  $\varepsilon_{\text{cut}}$ . C'est un processus discret qui est traité comme les autres processus discrets.

Il faut souligner que la valeur de coupure  $\varepsilon_{\text{cut}}$  est arbitraire entre le seuil de tracking des électrons (10 KeV) et  $\varepsilon_{\max}$ . Le choix en est laissé à l'utilisateur et dépend des situations expérimentales à simuler.

L'émission des photons de rayonnement de freinage présente la même particularité : la section efficace diverge lorsque l'énergie des photons émis tend vers 0. Le traitement est identique.

La perte d'énergie de la particule ionisante,  $\Delta E$ , est une quantité aléatoire puisque l'éjection de rayons delta est lui-même aléatoire. Les fluctuations peuvent être larges. Il n'est pas suffisant de calculer seulement la valeur moyenne : une telle simulation ne rendrait pas compte de la résolution intrinsèque des détecteurs. La loi de probabilité de  $\Delta E$  est fonction de l'énergie de la particule ionisante et de la

densité du milieu : distributions de Landau, de Vavilov, ou de Gauss, créant parfois des situations confuses. De plus ces distributions supposent que  $\epsilon_{cut} = \epsilon_{max}$  : pas de génération explicite de rayons delta.

Laszlo Urban (KFKI - Budapest) a développé un modèle simple d'excitation - ionisation d'un atome permettant de reproduire les distributions de  $\Delta E$  (y compris la valeur moyenne !) lorsque  $\epsilon_{cut} \leq \epsilon_{max}$  (donc compatible avec la génération de rayons delta). Ce modèle fonctionne aussi bien pour les électrons que pour les particules lourdes, quelque soient l'énergie de la particule, l'épaisseur et la densité du milieu ambiant. Ce modèle est utilisé dans Geant : voir le manuel, article PHYS 332.

#### • Les interactions hadroniques

Par interactions hadroniques on entend toutes les interactions pion-nucléon, nucléon-nucléon et plus généralement hadron-noyau. Depuis de nombreuses années la simulation de cette physique a été développée dans des codes spécialisés. Geant utilise certains d'entre eux (GHEISHA, FLUKA, MICAP) de la manière suivante : les sections efficaces totales et différentielles ainsi que l'état final de la réaction sont calculés par ces codes, mais Geant garde le contrôle de la description géométrique des détecteurs et du transport de tous les produits de la réaction.

La figure 11 montre l'interaction d'un proton incident de 1 GeV dans 1 m<sup>3</sup> d'Argon liquide. En pointillé sont représentées les particules neutres : gammas, neutrons, neutrinos. On doit comparer la topologie et l'extension d'un tel événement avec ceux d'une gerbe électromagnétique : voir figure 10.

#### • Les ions lourds

Le traitement de ce type de projectile est embryonnaire. Geant ne calcule aucune interactions noyau-noyau, c'est à l'utilisateur de les prévoir. L'interface est identique aux autres interactions hadroniques : dans le sous programme GUPHAD il faut calculer un libre parcours à la naissance de l'ion lourd; les produits finaux d'une réaction donnée doivent être créés dans le sous programme GUHADR. Geant effectue alors le tracking de ces produits en tenant compte de la diffusion multiple et de l'ionisation. Geant attribue à chaque ion une charge effective qui dépend du milieu ambiant et de l'état cinématique de l'ion. On rend ainsi compte de résultats expérimentaux récents sur le parcours des ions dans la matière (voir le manuel Geant, article PHYS 431)

### 4. Définition de la géométrie du détecteur

A chaque étape de son déplacement (chaque step) une particule doit pouvoir :

- 1- reconnaître dans quelle partie du détecteur elle se trouve (localisation).
- 2- évaluer la distance jusqu'à la prochaine frontière (extrapolation).

Des ensembles de détecteurs, même aussi complexes que ceux du Lep, peuvent être assez soigneusement décrits par la définition d'un assemblage de différents volumes de matière homogène. En limitant le nombre de formes de base de ces volumes (les primitives) et en fixant avec précision les règles d'assemblage, il est possible d'automatiser les procédures correspondant aux deux questions ci-dessus. C'est ce qui est fait dans le programme Geant. Par conséquent il est capital de noter que, une fois la géométrie définie suivant des règles que nous allons expliciter ci-dessous, *le tracking des particules à travers les différents volumes ne nécessite plus aucune intervention de l'utilisateur.*

#### • Définition des volumes

Chaque volume possède un nom et est caractérisé par :

- 1- une forme, obligatoirement choisie parmi les 12 formes de bases connues du système (voir figures 6). Chaque type de forme possède un système de référence intrinsèque (un référentiel), généralement situé au centre du volume.
- 2- un ensemble de paramètres définissant les dimensions intrinsèques du volume.
- 3- les caractéristiques physiques du milieu matériel homogène qui remplit ce volume.

Tant qu'il n'est pas positionné par rapport à un autre volume, un volume donné est une entité qui n'a pas de relation spatiale avec les autres volumes : il ne fait pas parti de l'assemblage du détecteur.

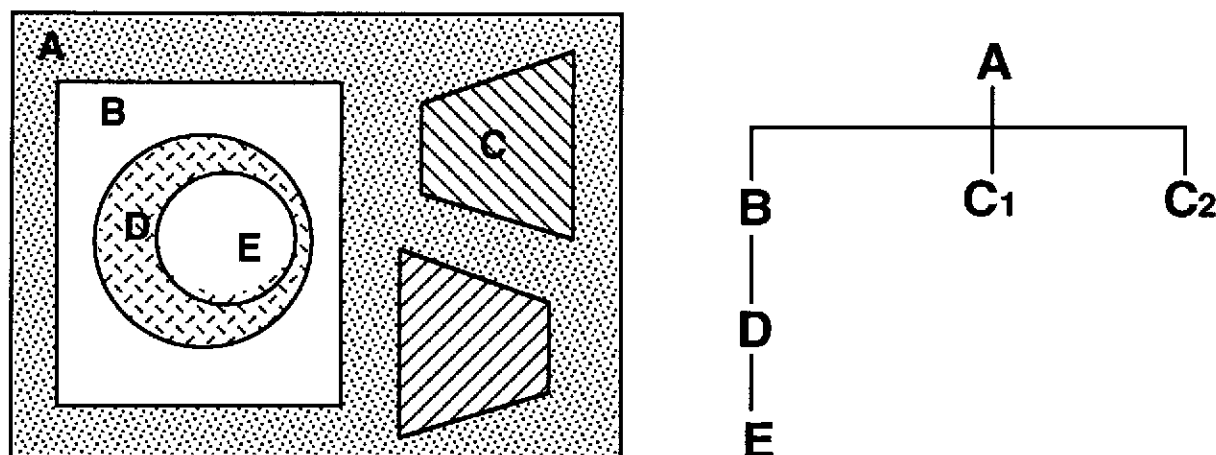
#### • Assemblage des volumes

- 1- Tout volume doit être positionné à l'intérieur d'un volume mère. (excepté pour le premier volume)
- 2- Tout volume peut recevoir un ou plusieurs contenus.

Positionner un volume **B** dans un volume **A** signifie expliciter le vecteur translation et la matrice de rotation du référentiel **B** par rapport au référentiel **A** : **B** devient une fille de **A**. Il est possible de poser plusieurs copies de **B** en différents points de **A**, ou dans un autre volume. Les filles éventuelles de **B** sont reproduites dans toutes les copies de **B**.

Il arrive fréquemment qu'un détecteur, ou une partie de détecteur, puisse être décrit en terme de cellules élémentaires nombreuses et toutes identiques. Le concept de division d'un volume a été introduit pour décrire ce cas. C'est une alternative plus simple et plus efficace au positionnement de plusieurs copies d'un même volume (voir figures 7). Ces cellules, comme les autres volumes, peuvent à leur tour être divisées ou recevoir des filles.

Ces opérations définissent donc une structure hiérarchique (une arborescence) qui détermine complètement l'assemblage du détecteur. Dans l'exemple ci-dessous un volume **A** (boîte) contient une boîte **B** et deux copies d'un volume **C** (trapeze) avec des matrices de rotations différentes. **B** contient lui même un tube **D** qui contient un tube **E**.



La figure 8 montre un détecteur (qui a été utilisé en physique nucléaire), ainsi que la structure hiérarchique de l'organisation des volumes. Sur la figure 9 un  $\pi^0$  se désintègre en deux gammas au centre du détecteur. L'un des gammas interagit dans un bloc de verre au plomb de la couronne extérieure.

## 5. Organisation du programme et structure des données

Les figures 1 et 2 résument le fonctionnement du programme et l'organisation logique des données tels qu'un utilisateur doit les comprendre. Ce schéma est commenté ci-dessous.

Assez naturellement on distingue deux grandes phases dans le déroulement du programme. Il faut d'abord définir toutes les constantes, les matériaux...etc...et construire la géométrie des détecteurs; c'est la phase d'initialisation. On peut alors effectuer la génération et le tracking des événements, un par un. Un événement est défini par la donnée de la cinématique initiale d'un ensemble de particules.

### A - Phase d'initialisation

- 1) L'utilisateur définit une bibliothèque de particules (**JPART**). Pour une particule instable il doit stocker également les produits de désintégration et les rapports de branchement.



2) L'utilisateur définit une bibliothèque de matériaux (**JMATE**). Ces matériaux peuvent être des éléments simples ou des corps composés. Le système Géant complète ces informations en créant des tables de différentes quantités physiques :  $de/dx$  , sections efficaces ...

3) Dans la banque **JTMED** (i.e. tracking medium) l'utilisateur précise les conditions dans lesquelles le tracking doit être effectué : nature des matériaux utilisés (référence à la banque **JMATE**) , existence ou non d'un champ magnétique , précision désirée sur le tracking ...

4) L'utilisateur définit ensuite le setup expérimental en terme de volumes (**JVOLUM**). Il dispose d'une bibliothèque de volumes élémentaires qu'il peut copier en plusieurs exemplaires , emboîter les uns dans les autres , diviser.

L'utilisateur doit aussi créer une banque auxiliaire **JROTM** qui contient les matrices de rotations décrivant les positions relatives des volumes.

Outre ces informations géométriques , l'utilisateur doit spécifier les caractéristiques physiques du milieu matériel homogène de chaque volume : référence à la banque **JTMED**.

*Durant la phase de tracking d'un événement le système GEANT déterminera automatiquement dans quel volume se trouve un point donné , quels sont les caractéristiques géométriques et physiques de ce volume , et évaluera la distance à parcourir jusqu'à la prochaine frontière.*

5) Certains des volumes définis ci-dessus sont en fait des détecteurs sensibles. Dans la banque **JSET** l'utilisateur précise quels sont ces volumes , et définit les paramètres caractérisant un détecteur donné.

## **B - Génération et Tracking séquentiel d'un événement**

6) La cinématique initiale de l'événement est généralement stockée dans les banques **JVERTX** et **JKINE**. Ce système de banques décrit l'histoire cinématique des traces dites 'permanentes'.

*Géant effectue alors le tracking de ces particules , une à une, et step par step, sur l'ensemble du dispositif expérimental. A chaque step du tracking d'une particule le contrôle est donné à l'utilisateur via le sous programme GUSTEP.*

7) Durant ce tracking, d'autres particules peuvent être créées. L'utilisateur décide alors si ces particules sont 'permanentes' (banques **JVERTX/JKINE**) ou 'temporaires' (banque **JSTAK**).

La distinction entre les banques **JKINE** et **JSTAK** est la suivante : les informations enregistrées dans **JKINE** sont conservées tout au long du tracking de l'événement , et les banques de réponse des détecteurs font référence aux traces contenues dans **JKINE**. Au contraire, une particule stockée dans **JSTAK** est perdue dès que le tracking de cette particule est achevé. Aucune autre banque de Géant ne fait référence à la structure **JSTAK** , qui est simplement une zone de travail.

Après avoir achevé le tracking d'une particule 'permanente' , Géant effectue le tracking de toutes les particules 'temporaires' qui lui sont attachées avant de commencer le tracking de la particule 'permanente' suivante.

8) Dans la banque **JHITS** , l'utilisateur peut enregistrer à chaque step des informations sur le passage d'une particule dans un détecteur donné.

9) Dans la banque **JDIGI** , on simule la réponse du détecteur à l'événement entier , en tenant compte des inefficacités , des résolutions ..etc... Cette banque est généralement remplie à la fin de l'événement (sous programme **GUOUT**).

10) La banque **JXYZ** est destinée à contenir les positions spatiales d'un certain nombre de points des traces . Elle est en principe utilisée pour le dessin des traces principales et le "debugging" de l'événement.

## 6. Epilogue

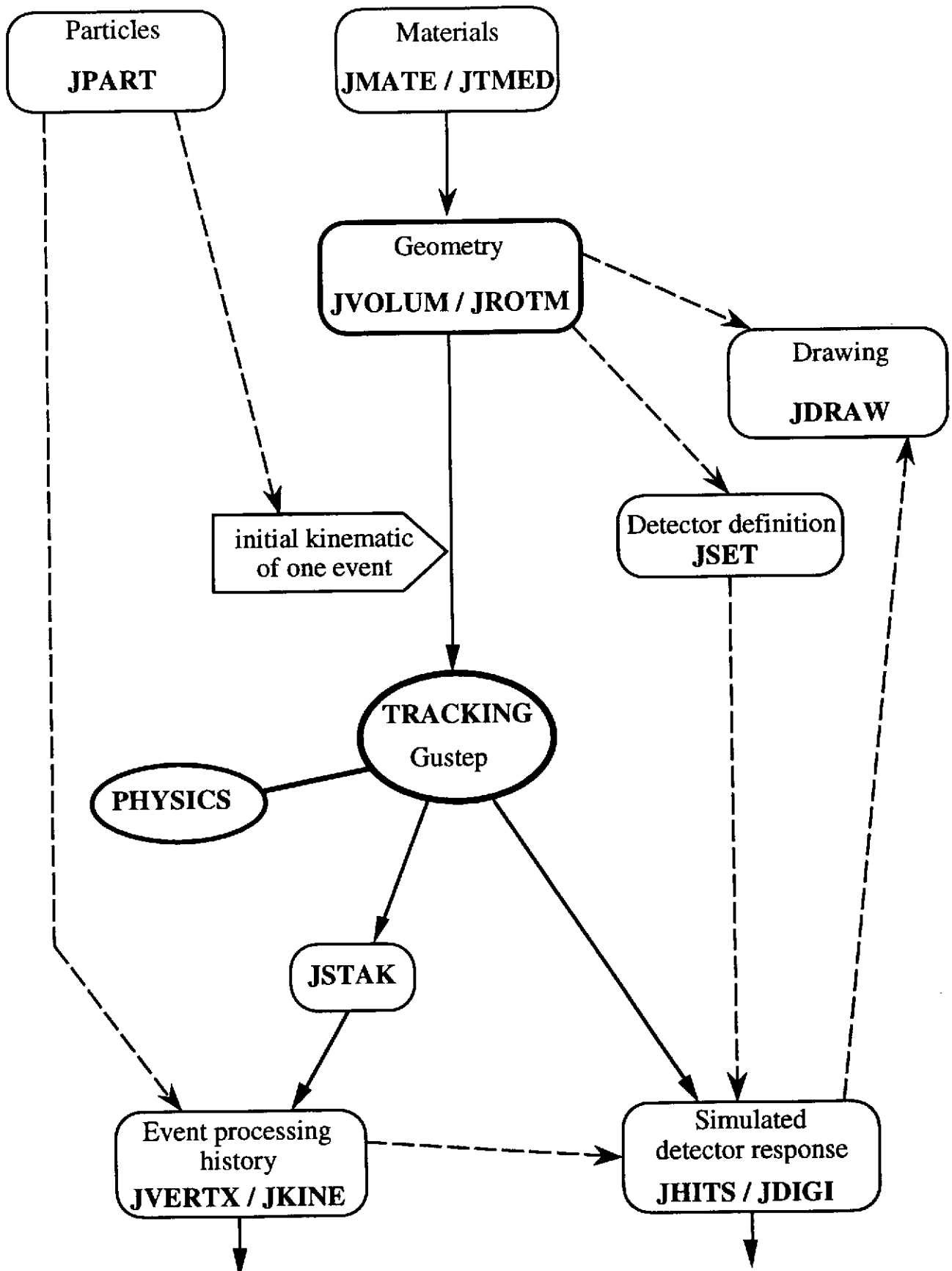
Le logiciel GEANT3 est une réalisation collective. Le projet a débuté à la fin des années 1970 à partir d'idées originales de A. Mcpherson et R. Brun, qui en a dirigé le développement jusqu'en 1991. Le projet est actuellement coordonné au Cern par une petite équipe de 3 à 4 personnes. Mais plusieurs dizaines de physiciens de la communauté internationale de physique des particules ont apporté - et apportent continuellement - des contributions de toutes sortes. Enfin la simulation des interactions électromagnétiques doit beaucoup au programme EGS du SLAC.

Comme tous les logiciels du Cern les sources du code sont publiques. De plus il existe un forum de discussions par messagerie électronique : [Lgeant@cernvm.cern.ch](mailto:Lgeant@cernvm.cern.ch)

Je remercie vivement le Comité d'Organisation de l'Ecole Joliot-Curie de m'avoir proposé ces lectures.

### Bibliographie succincte

- [1] GEANT user's guide. R. Brun and al. Cern Program Library W5013, March 1994.  
(email : [cernlib@cernvm.cern.ch](mailto:cernlib@cernvm.cern.ch))
- [2] Review of particle properties. Particle Data Group. Physical Review D, 45(11), June 1992.
- [3] The EGS manual. R. Ford and W. Nelson. SLAC210, UC32, SLAC, June 1978.
- [4] EGS - GEANT comparison. R. Brun and al. Cern/DD/85-1, March 1985.
- [5] GHEISHA. H.C. Fesefeldt. PITHA 85-02, RWTH, Aachen, September 1985.
- [6] FLUKA user's guide. A. Ferrari, J. Ranft and al. TIS-RP-190, Cern, 1990.
- [7] A user's guide to MICAP. J.O. Johnson and T. Gabriel. TM-10340, ORNL, 1988.
- [8] B. Rossi. Prentice-Hall, 1952.



Organisation logique du programme et structure des données

Figure 1

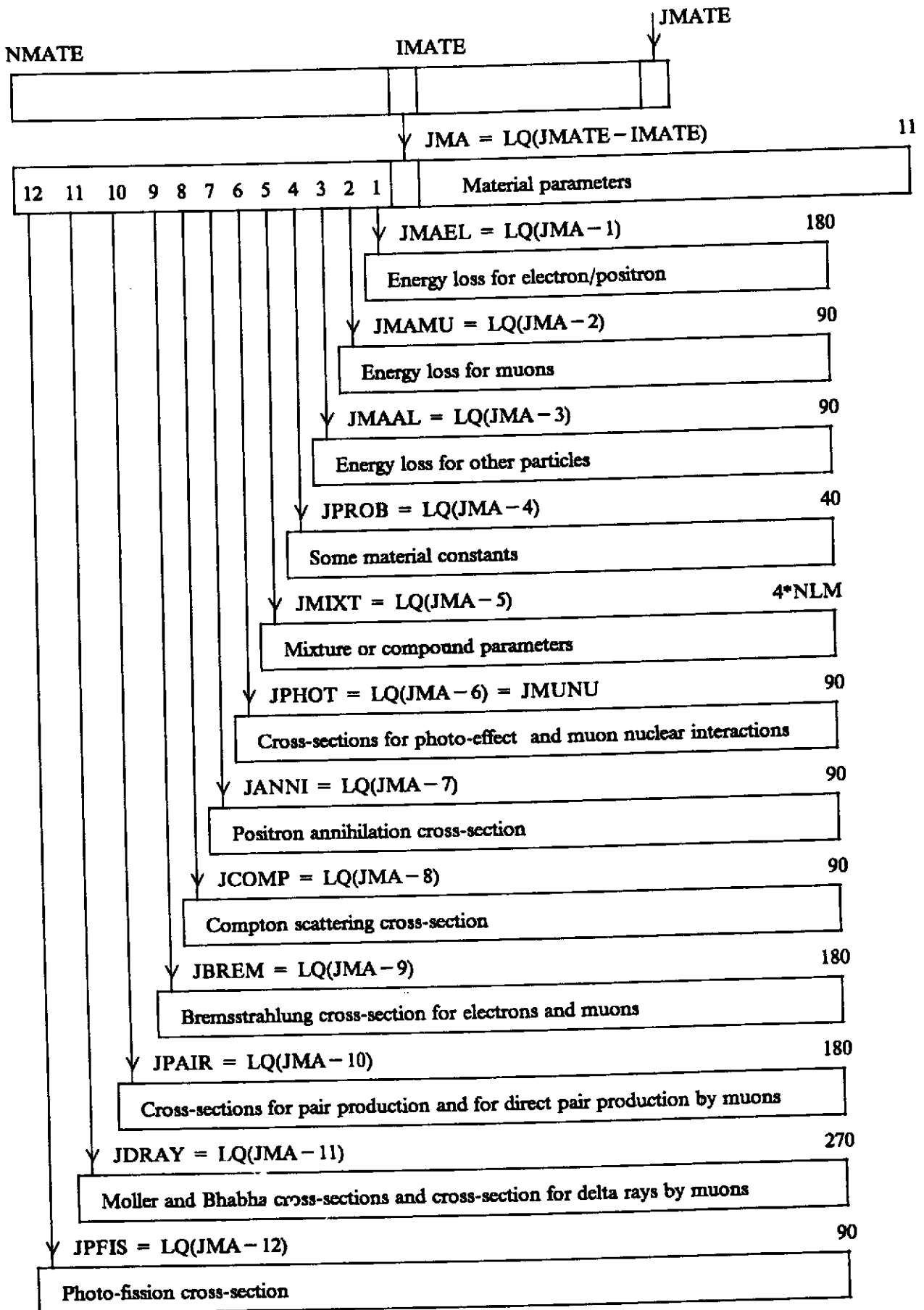
## Simplified Program Flow Chart

MAIN (user)

- GZEBRA initialisation of ZEBRA system, dynamic core allocation
- UGINIT (user)
  - GINIT initialisation of GEANT3 variables
  - GFFGO interpretation of data cards
  - GZINIT initialisation of ZEBRA core divisions and link areas
  - GPART creation of the 'particle' data structure JPART
  - GMATE creation of the 'material' data structure JMATE
  - 'user code' description of the geometrical setup, of the sensitive detectors  
creation of data structures JVOLUM, JTMED, JROTM, JSETS
  - GPHYSI preparation of cross-section and energy loss tables for all used materials
- GRUN loop over events
  - GTRIGI initialisation for event processing
  - GTRIG event processing
    - GUKINE (user) generation (or input) of event initial kinematics
    - GUTREV (user)
      - GTREVE (loop over tracks, including any secondaries generated)
        - GUTRAK (user)
          - GTRACK control tracking of current track
            - GMEDIA find current volume/tracking medium
            - GTVOL loop over successive media seen by the particle
              - GTGAMA/GTELEC/.... tracking of particle according to type
              - GUSTEP (user) recording of hits in data structure JHITS  
and of space points in data structure JXYZ
      - GUDIGI computation of digitisations and recording in data structure JDIGI
      - GUOUT output of current event
    - GTRIGC clearing of memory for next event
  - UGLAST (user)
    - GLAST standard GEANT3 termination.

stop

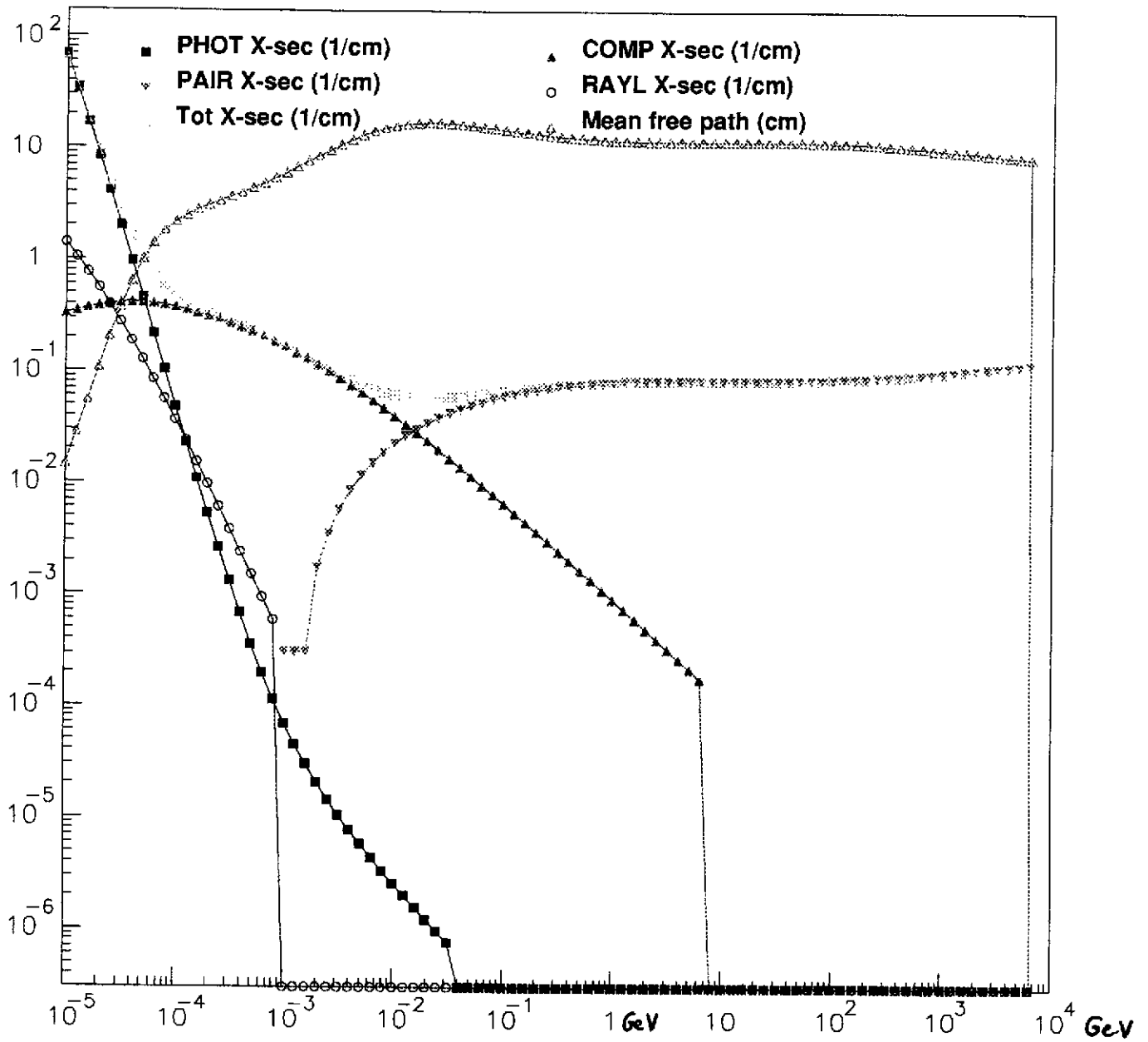
Figure 2



Exemple de structure de données : la banque de définition d'un matériau

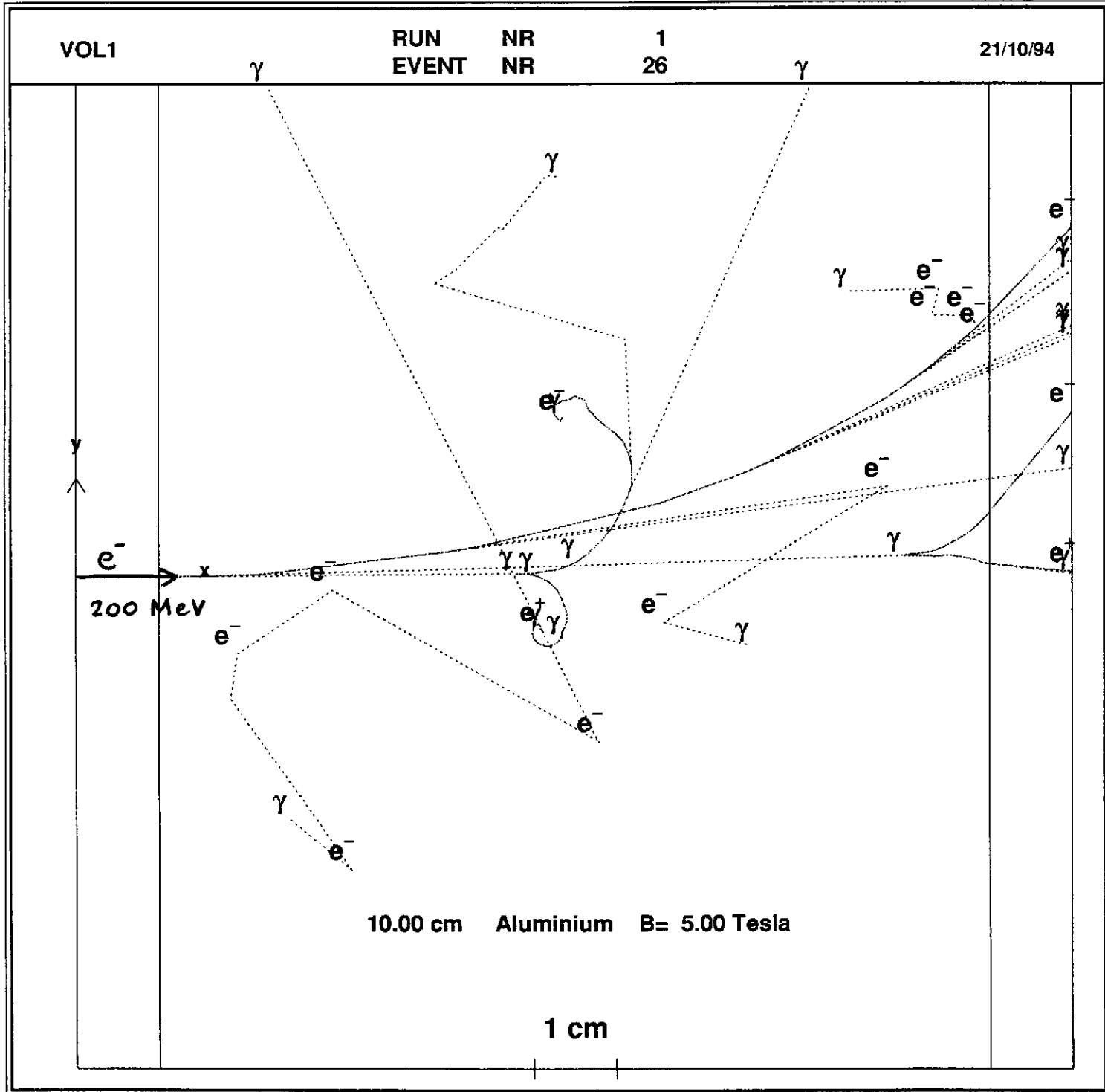
Figure 3

## Tables for GAMMA in Aluminium



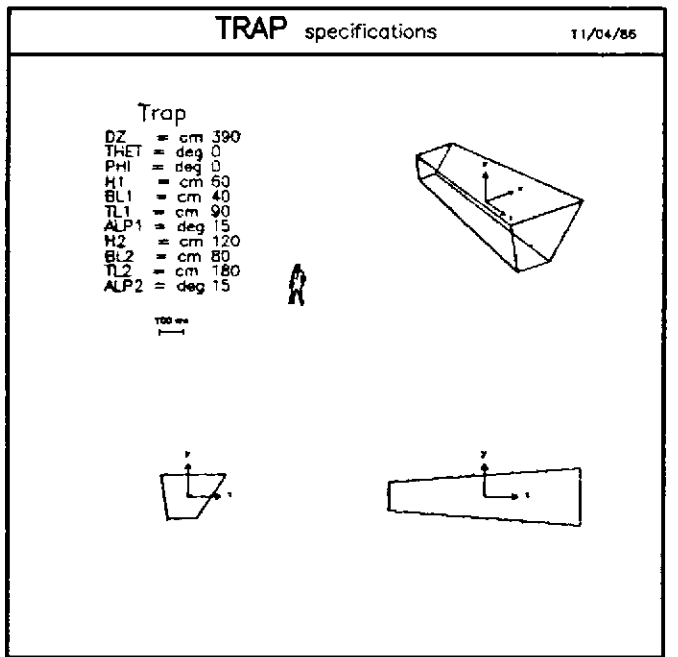
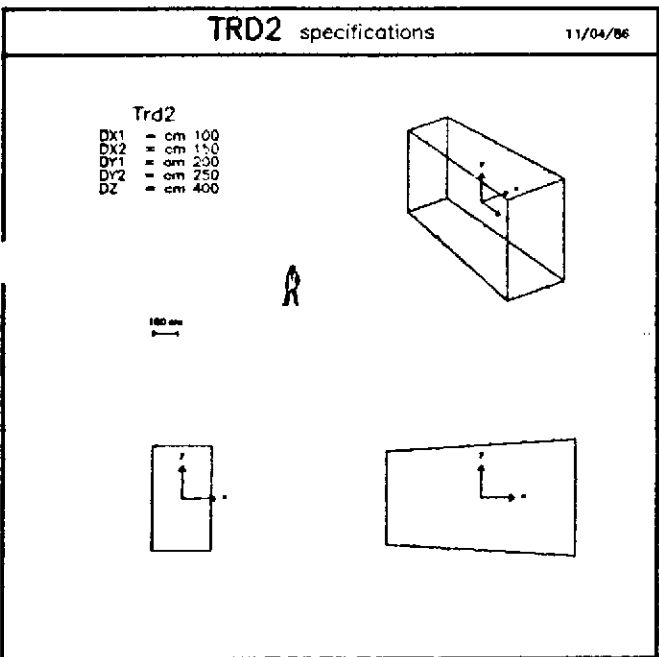
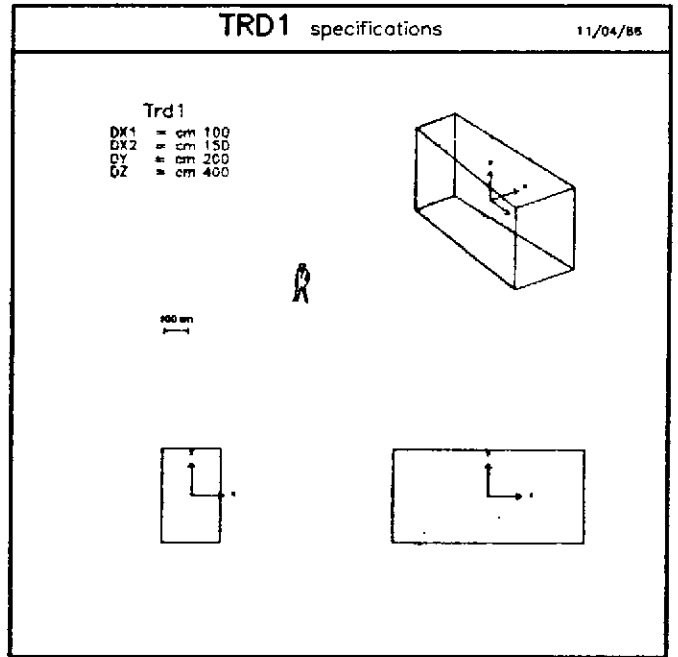
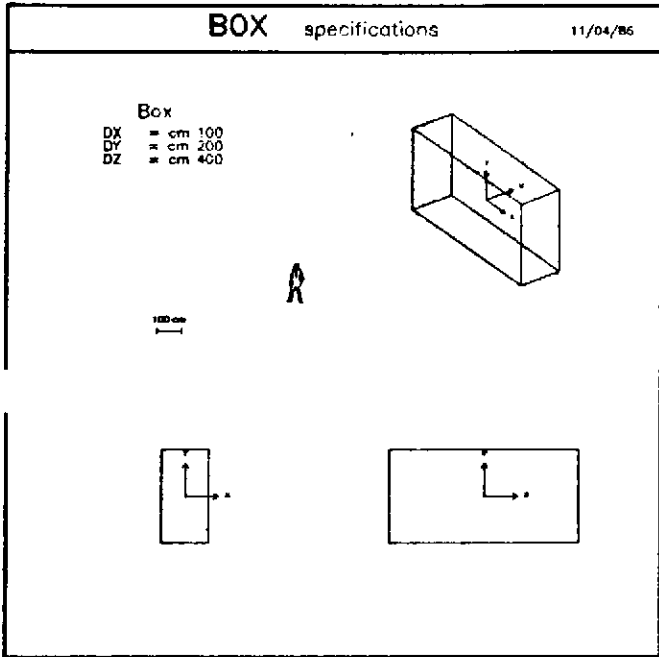
Sections efficaces pour un Gamma dans l'Aluminium

Figure 4



Le début d'une gerbe électromagnétique dans un bloc d'Aluminium.  
 Le champ magnétique est perpendiculaire au plan de la feuille

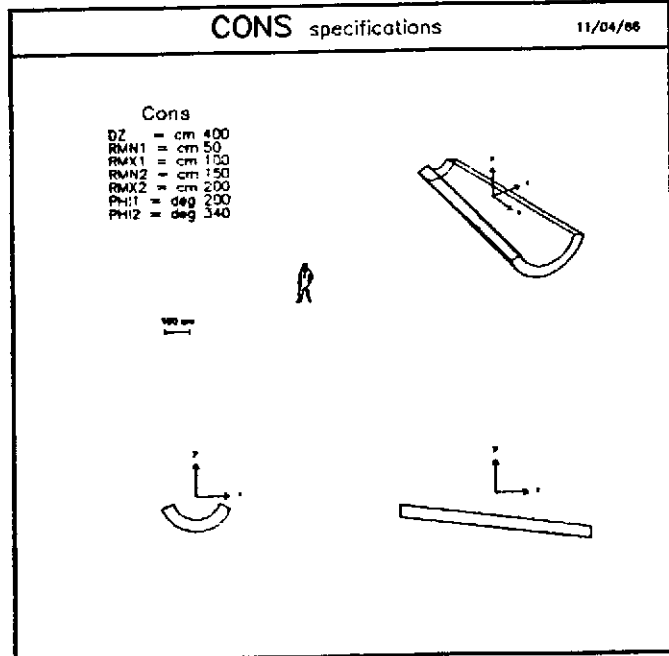
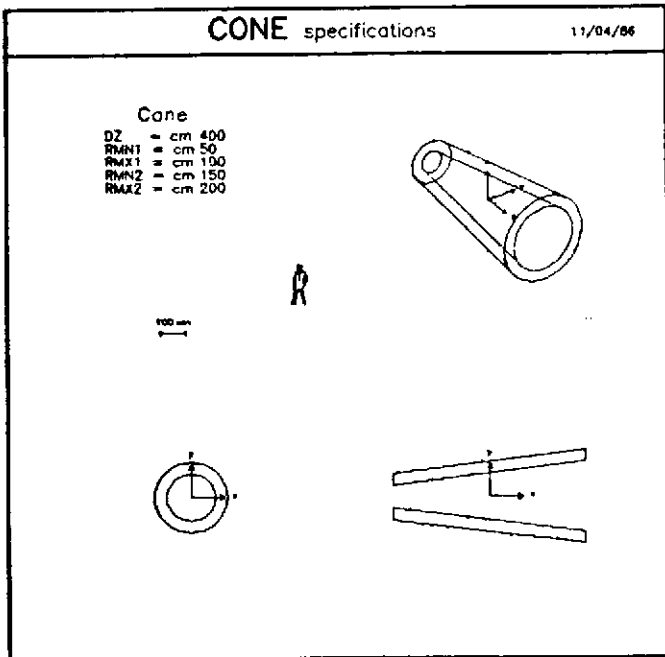
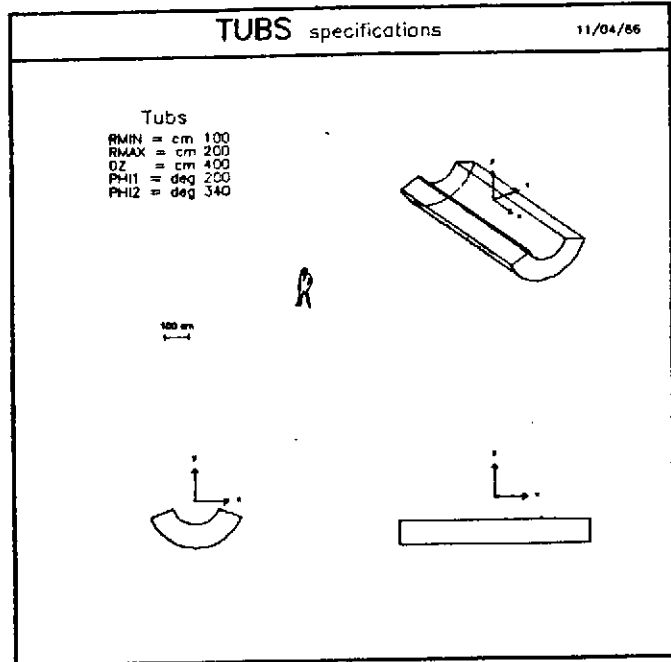
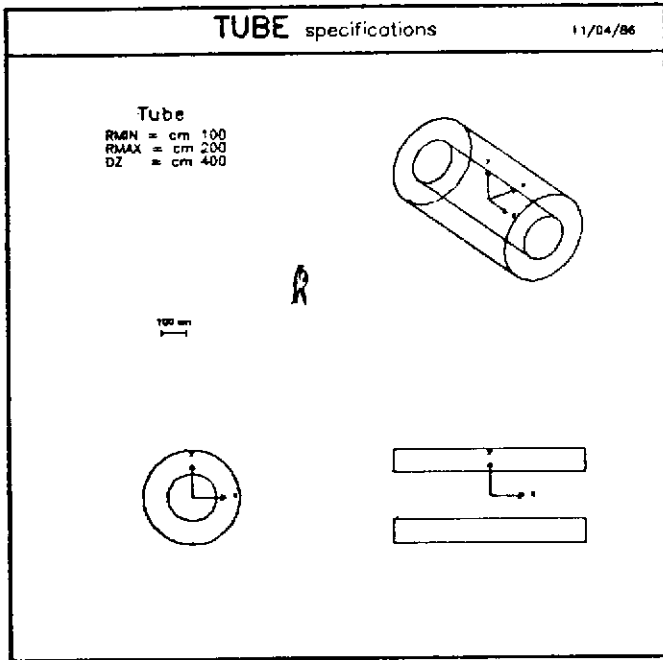
Figure 5



Les formes géométriques primitives

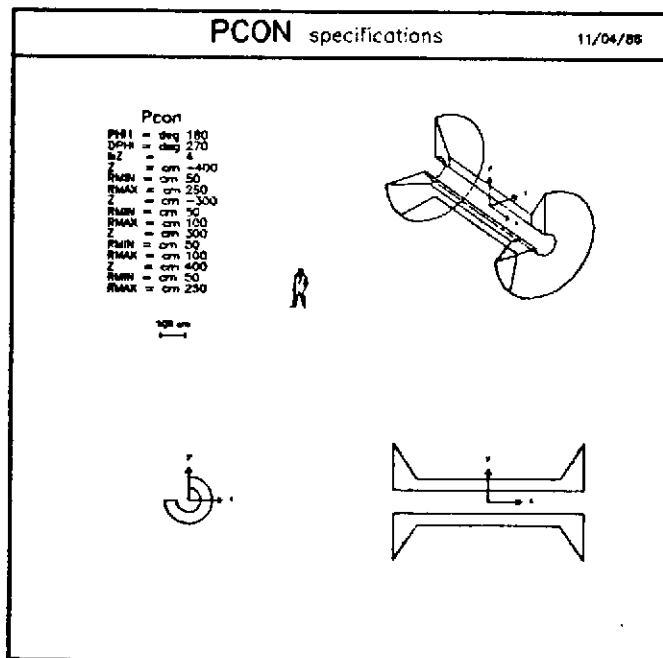
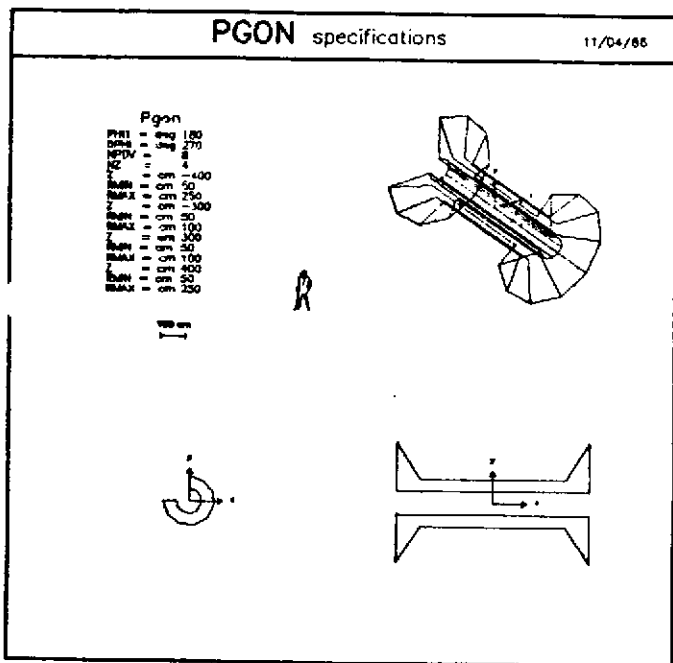
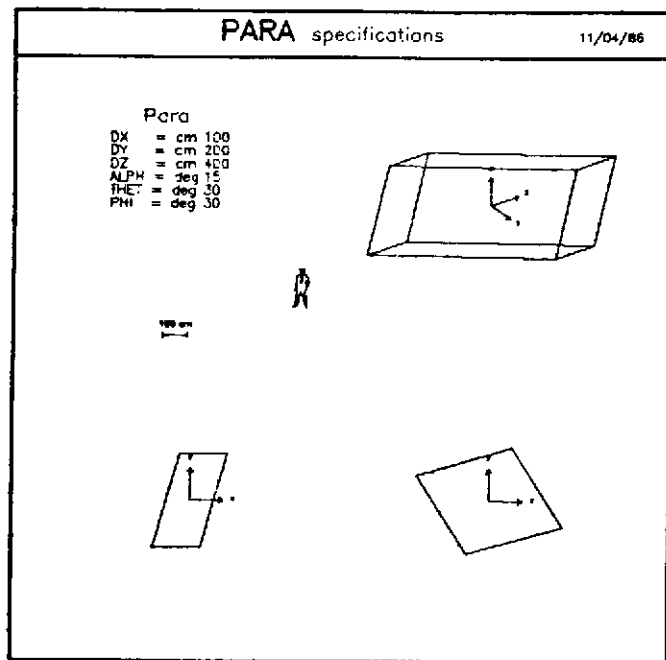
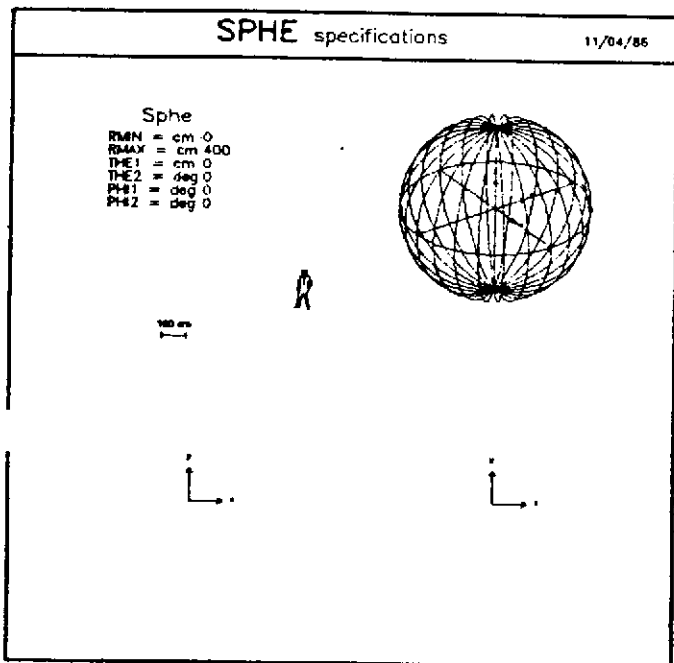
Figure 6a





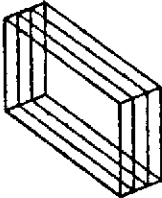
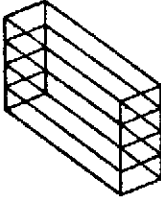
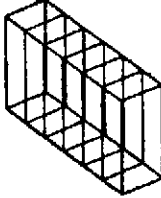
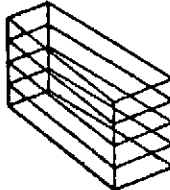
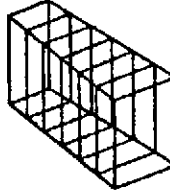
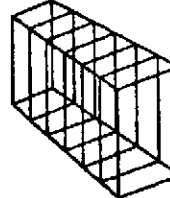
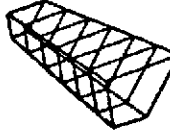
Les formes géométriques primitives

Figure 6b



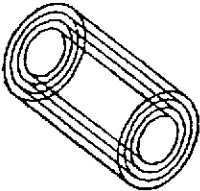
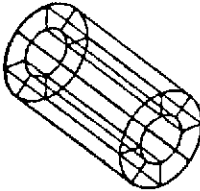
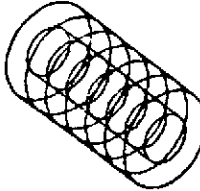
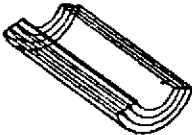
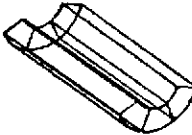
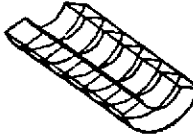
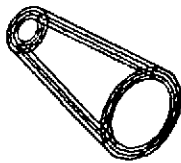
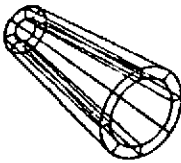
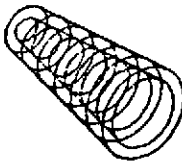
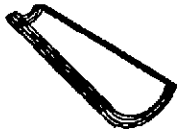
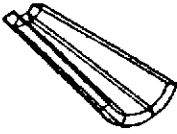
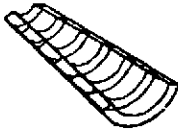
Les formes géométriques primitives

Figure 6c

SHAPE \ IAXIS	1	2	3
BOX			
TRD1			
TRD2			
TRAP			

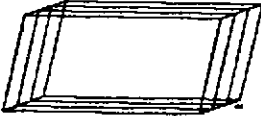
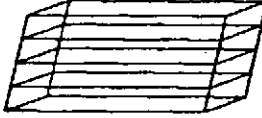
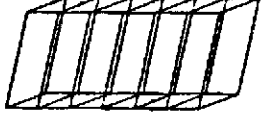
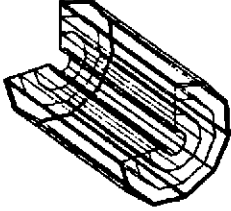
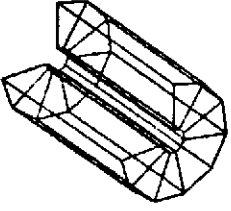
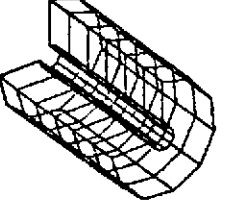
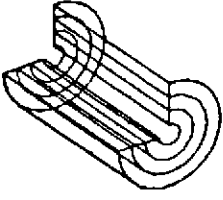
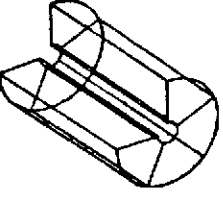
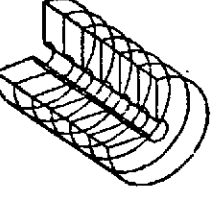
Division des formes primitives

Figure 7a

SHAPE \ IAXIS	1	2	3
TUBE			
TUBS			
CONE			
CONS			

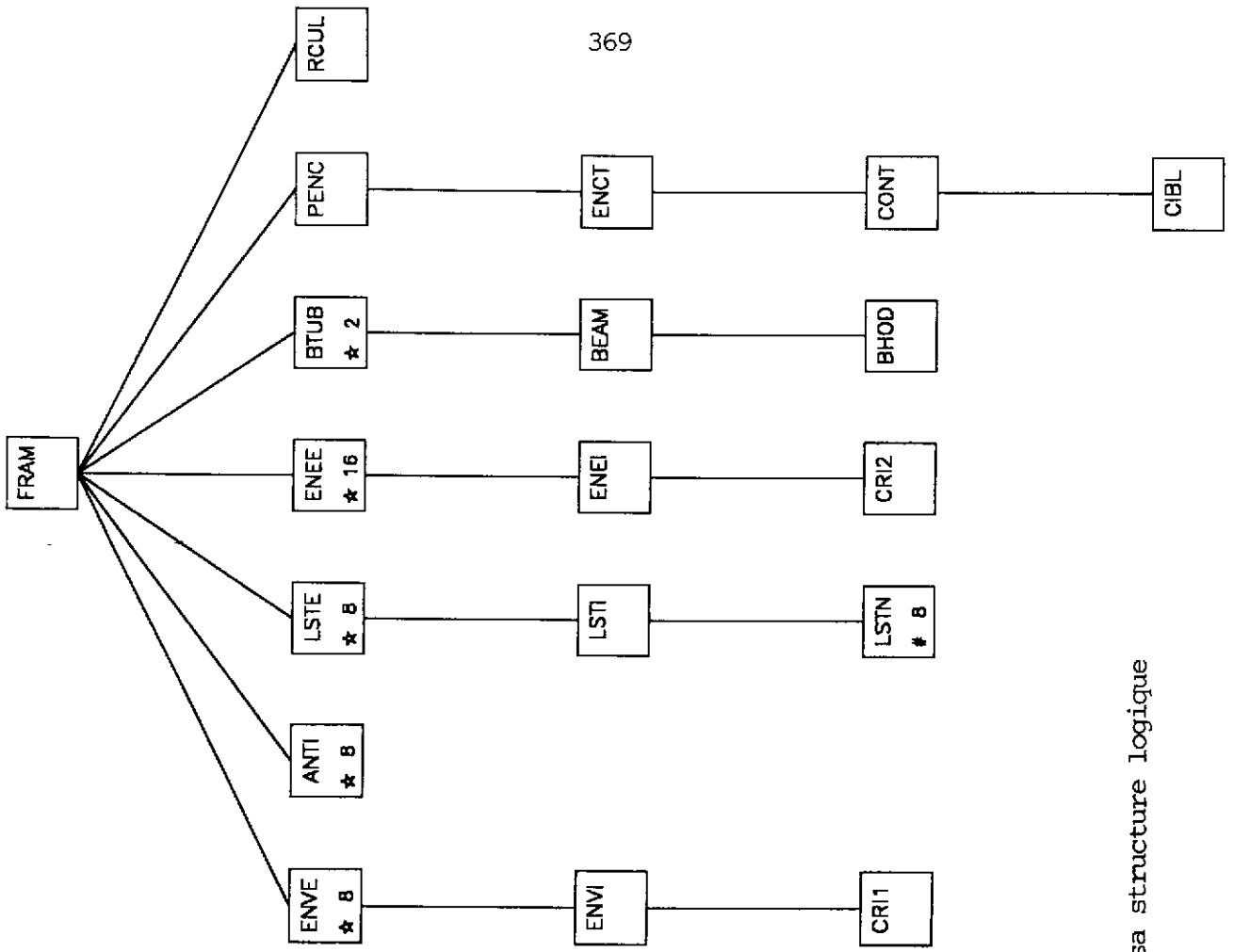
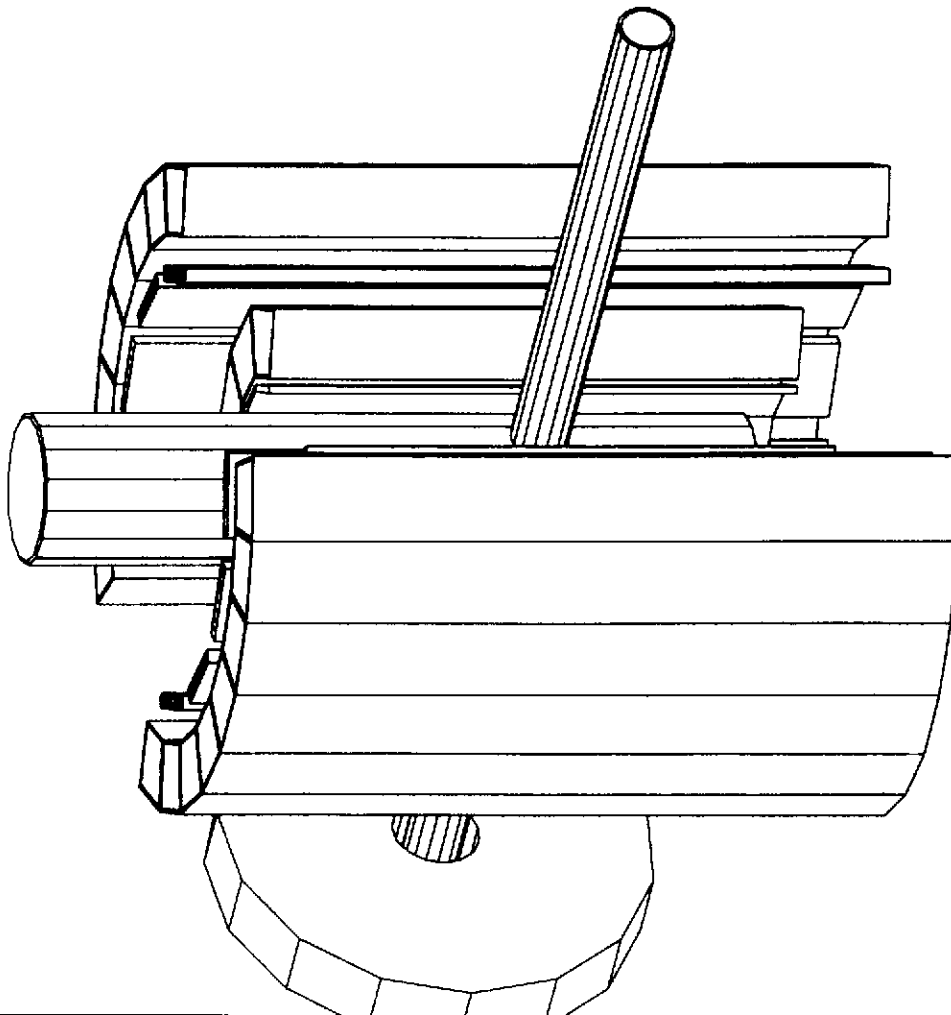
Division des formes primitives

Figure 7b

SHAPE \ IAXIS	1	2	3
SPHE			
PARA			
PGON			
PCON			

Division des formes primitives

Figure 7c



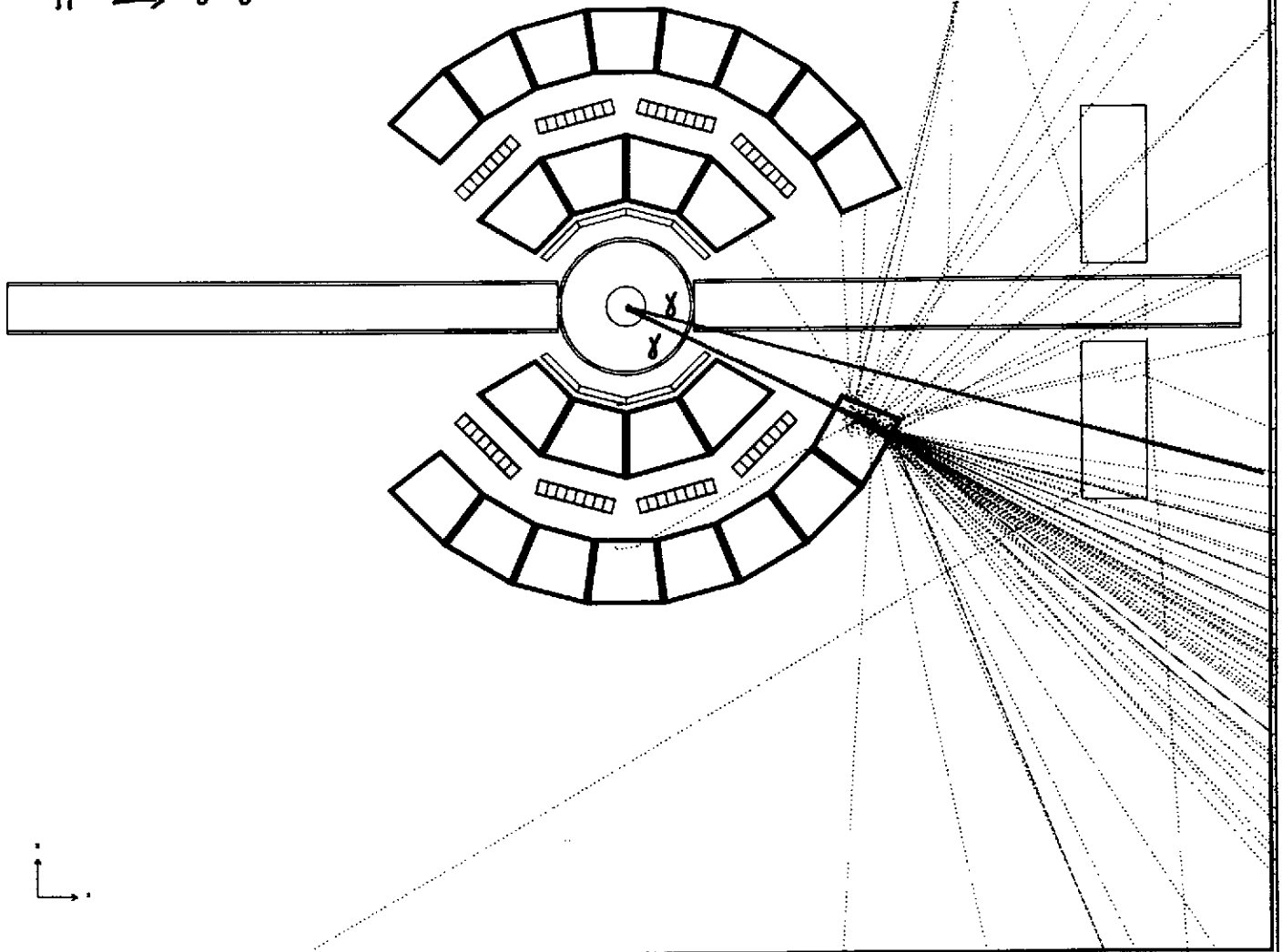
Le détecteur SPESO et sa structure logique

Figure 8

SPES

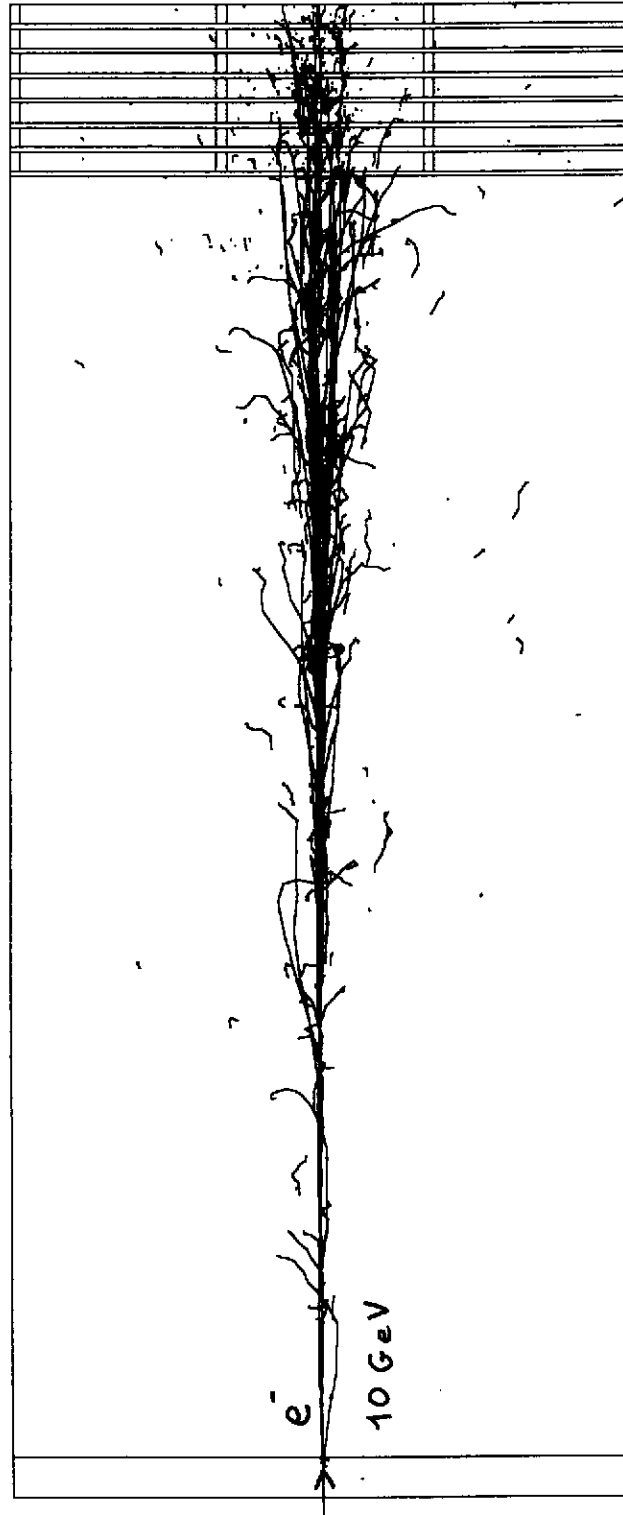
RUN	NR	1
EVENT	NR	1

1/6/92

 $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 

Un pi zéro se désintègre en 2 gammas dans SPES0

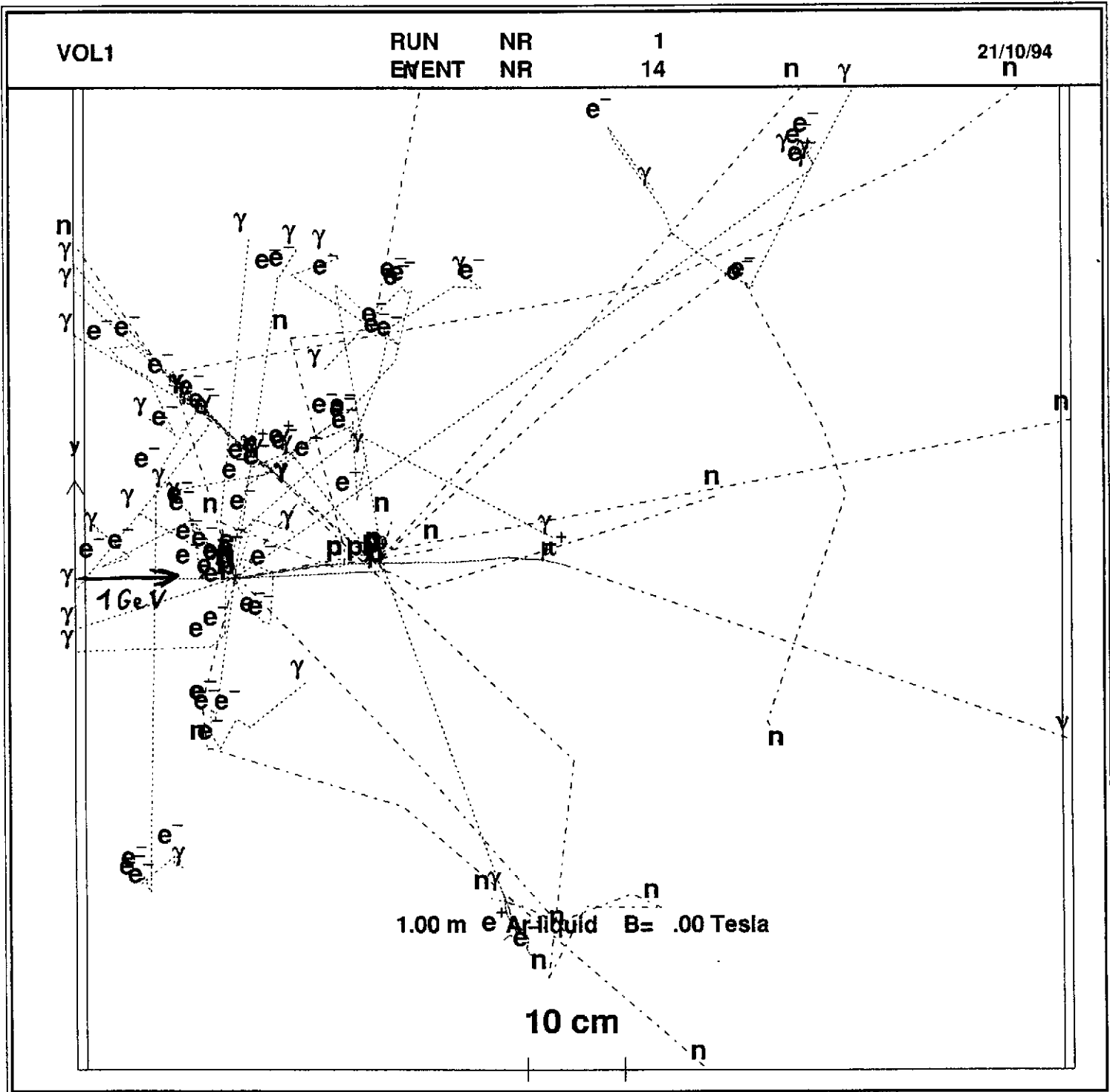
Figure 9



Une gerbe électromagnétique de 10 GeV dans 60 cm d'Argon liquide

Figure 10





Un proton incident de 1 GeV dans 1 m<sup>3</sup> d'Argon liquide

Figure 11

**PHYSIQUE NUCLEAIRE ET BIOLOGIE**  
**Luc VALENTIN, IPN d'Orsay et LPN de Paris VII**

Cet exposé, couplant instrumentation nucléaire et concepts biologiques, a été articulé sur le thème "Imagerie quantitative en génétique moléculaire". Il s'est déroulé à partir d'une bonne cinquantaine d'images obtenues à l'aide de détecteurs  $\beta$  appropriés. Il était exclu, pour des raisons à la fois techniques et économiques, d'en donner ici une version écrite. Nous avons donc opté pour la production d'un plan détaillé, offrant au lecteur intéressé une sélection des articles que nous avons publiés sur le sujet.

## **I - INTRODUCTION**

Pratiquement tous les domaines de la biologie exploitent aujourd'hui trois méthodes complémentaires d'investigation issues de la génétique moléculaire : la cartographie des gènes, le séquençage de l'ADN et l'hybridation in situ. Ces trois méthodes ont en commun de recourir à des marquages par sondes radioactives  $\beta$  qu'elles révèlent grâce à des films et des émulsions autoradiographiques. Nous avons développé trois détecteurs spécifiques qui présentent en particulier les avantages suivants :

- environ 100 fois plus rapides que les films ;
- quantification absolue des résultats ;
- traitement automatique des données.

Dans cette brève note on définira tout d'abord les trois méthodes citées ci-dessus et les trois types de détecteurs associés. Ensuite on fera un bilan de la situation actuelle. Enfin on citera les nouveaux imageurs que nous développons dans le but d'accéder à des études cinétiques.

## **II - LA CARTOGRAPHIE DES GENES**

La cartographie est la méthode qui consiste à répertorier et analyser les gènes (ou assemblages, ou fragments) d'un organisme. Par exemple l'homme, dans ses 23 paires de chromosomes, comporte environ  $5 \cdot 10^4$  gènes, chacun constitué en moyenne de  $5 \cdot 10^4$  paires de bases (A,T ; G, C) ; soit à peu près  $3 \cdot 10^9$  pb pour le génome humain.