

T H E S E

PRESENTEE

**A L'UNIVERSITE DE PARIS SUD
CENTRE D'ORSAY**

POUR OBTENIR

**LE TITRE DE DOCTEUR D'UNIVERSITE
Spécialité : SCIENCES PHYSIQUES**

par

Jean-Claude DUCHAZEAUBENEIX

**RADIOGRAPHIE PAR DIFFUSION NUCLEAIRE
DE PROTONS D'ENERGIES INTERMEDIAIRES**

Soutenue le 5 février 1982, devant la Commission d'Examen

MM. JEAN

Président

**MESSIAH
CHARPAK
SALAMON
SAUDINOS**

Examineurs

Remerciements

L'expression de mes plus vifs remerciements va tout d'abord à Monsieur Jean Saudinos qui par sa bienveillance, ses constants encouragements, ses conseils inlassablement prodigués, m'a permis, sous sa direction, de présenter ce travail. Je lui exprime ici ma plus profonde gratitude.

J'exprime également ma profonde gratitude à Monsieur Goerges Charpak pour m'avoir reçu dans son laboratoire quand cela était nécessaire, pour ses précieux conseils et son soutien permanent.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur Maurice Jean qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse, à Monsieur Georges Charpak, Albert Messiah, Georges Salamon et Jean Saudinos pour m'avoir fait l'honneur de constituer mon jury malgré leurs lourdes charges.

J'exprime ma gratitude à Messieurs Denis Garreta, Dominique Legrand et Jean Saudinos pour l'examen critique, toujours amical mais rigoureux, qu'ils ont apporté à la rédaction de ce texte.

Les résultats présentés ici sont, pour beaucoup, le fruit d'un travail de coopération entre le DPh-N/ME de Saclay, le CERN et des médecins du CHU La Timone de Marseille.

J'exprime ma grande reconnaissance à Messieurs Jean Claude Faivre, Denis Garreta, Bernard Guillerminet, Dominique Legrand, Charles Raybaud, Michel Rouger, Jean Claude Santiard et Fabio Sauli dont le rôle a été déterminant à certaines étapes.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, à un titre ou un autre, à ce travail, particulièrement à Messieurs R. Benoit, Roger Bouclier, Jean Habault, Jean Lemeur, Gilbert Millon, J.P. Mouly et Bernard Perrocheau pour leurs assistance amicale, au personnel des Services techniques, du Bureau d'Etudes et de l'Atelier du DPh-N/ME.

J'adresse enfin mes sincères remerciements au personnel de la bibliothèque du DPh-N, en particulier à Madame Eliane Thureau qui a assuré la dactylographie sous la direction de Madame Paulette Gugenberger, ainsi qu'à Madame Roberte Chevaux et Monsieur Denis Bouziat. Leur compétence a permis de donner à cette thèse la meilleure présentation. Qu'elles soient remerciées d'avoir toujours gardé le sourire malgré ces travaux longs et fastidieux.

Tables des matières

Chapitre I : INTRODUCTION	1
Chapitre II : ORIGINALITE ET PRINCIPE DE LA METHODE	3
Chapitre III : INTERACTIONS NUCLEAIRES	7
A. LA REACTION NUCLEAIRE INTERESSANT LA RDN	8
B. CINEMATIQUE DE LA REACTION NUCLEAIRE	10
1. Coplanarité	10
a) Cas de la diffusion élastique p-p (cas de l'hydrogène)	10
b) Cas de la diffusion quasi-élastique p-noyau	10
2. Relations angulaires : cas de la diffusion élastique (p-p).	11
C. SECTIONS EFFICACES	13
D. QUANTITES MESUREES DANS UNE RDN	18
E. LONGUEUR D'INTERACTION NUCLEAIRE	20
Chapitre IV : ENSEMBLE EXPERIMENTAL	23
A. ENSEMBLE DE DETECTION ET DE LOCALISATION	23
B. ELECTRONIQUE ET SYSTEME D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT	27
I. La voie élémentaire	27
II. La section	27
III. Codage des plans de chambre - Les codeurs	29
IV. Corrélation des codeurs	32
V. Lecture des codeurs	33
VI. Le SAR (Satellite d'Acquisition Rapide)	33
VII. La mémoire de masse	34
Chapitre V : LES LIMITES DE RESOLUTION ET DE SENSIBILITE DE LA RDN	37
A. ETUDE DES ERREURS	37
I. Les erreurs géométriques dues à la détection	38
II. Erreurs dues à la diffusion multiple coulombienne (DMC) ..	41

B. SOMME DES ERREURS ET RESOLUTIONS	51
1. Résolution transverse et longitudinale	51
2. Résolution volumique : ϵ_v	54
C. AMELIORATIONS DE LA QUALITE D'UNE RADIOGRAPHIE	57
1. Sélection des événements pour améliorer la qualité de la radiographie	57
2. Les corrections	60
D. LIMITES DE DETECTION DES DEFAUTS	62
E. LES EFFETS DU LISSAGE	64
F. LE LISSAGE ET L'ASPECT VISUEL	65
G. CHOIX DES PARAMETRES - DOSE ET SENSIBILITE	65
Chapitre VI : LES RESULTATS	70
A. APPLICATION DE LA RDN A LA RADIOGRAPHIE DES MATERIAUX LOURDS. DETECTION DE DEFAUTS. RADIOGRAPHIE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE	70
I. Détection de défauts	70
II. Radiographie d'un moteur électrique	73
B. RADIOGRAPHIE D'UNE CIBLE EN MOUVEMENT -- MATRICE A QUATRE DI- MENSIONS (4-D)	79
C. APPLICATIONS DE LA RDN A LA RADIOGRAPHIE MEDICALE	81
I. Généralités	82
II. Radiographie RDN d'une colonne vertébrale et os sphé- noïdal	83
III. Radiographie de têtes humaines non vivantes fixées par solution formolée : (CERN 1978, Saclay 1981)	92
1. Radiographie RDN d'une tête complète (CERN 1978)	92
a) Coupes horizontales	93
b) Coupes frontales	94
c) Coupes sagittales	94
d) Radiographie de l'hydrogène	95
e) Différents types de radiographies possibles en RDN	95
f) Comparaison RDN-scanner-X	105
2. Radiographie RDN d'une tête sur champ réduit (Saclay 1981)	105
2.1. Etat actuel du système de RDN	105
2.2. La radiographie RDN à partir du nouveau système	106
3. Radiographie en configuration (1111) ou (1121) à champ d'irradiation faible (Saclay 1981)	109

Chapitre VII : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	121
Annexe I : RELATION ANGULAIRE : CAS DE LA DIFFUSION ELASTIQUE	127
Annexe II : CALCUL DU VERTEX	131
Annexe III :	135
Références	137

Chapitre II

ORIGINALITE ET PRINCIPE DE LA METHODE

Pour bien montrer le caractère original de la Radiographie par Diffusion Nucléaire (RDN), il faut rappeler les caractères spécifiques de la radiographie par rayons X et par protons de relativement basse énergie (100 à 250 MeV).

La radiographie par rayons X est basée sur le phénomène d'absorption due à l'interaction électromagnétique des photons X, sur les électrons d'un atome cible, principalement par effet Compton dans le domaine d'énergie utilisée. Ici, la loi d'absorption est une loi exponentielle avec, par conséquent, un gradient important de la dose déposée dans les tissus biologiques. Plus l'épaisseur de la cible à radiographier est importante, plus il est nécessaire d'augmenter le flux incident et plus la dose déposée en surface est forte.

La radiographie par protons d'énergie comprise entre ≈ 100 et 250 MeV est basée également sur l'interaction électromagnétique. Lorsqu'ils traversent la matière, les protons perdent une partie de leur énergie, essentiellement par ionisations successives des atomes qui constituent la cible. L'énergie est choisie de manière que le parcours du proton soit légèrement supérieur à l'épaisseur de la cible à radiographier. On mesure les variations de ralentissement correspondant aux différentes trajectoires. L'absorption du faisceau incident est bien plus faible que dans le cas des rayons X et la dose déposée est plus homogène dans le milieu irradié.

Dans les deux types de radiographie, l'image obtenue est une image bidimensionnelle (plan perpendiculaire à la direction d'irradiation) où chaque point est la projection de l'intégrale de l'absorption ou de la perte d'énergie le long de la direction d'irradiation dans le volume radiographié.

La tomographie assistée par ordinateur ou scanner, a permis d'améliorer l'analyse et de réaliser une imagerie nettement supérieure en qualité. Elle utilise une source de rayonnement quasi ponctuelle et consiste à mesurer, dans le plan à radiographier, un très grand nombre de projections indépendantes. Des techniques mathématiques de rétro-projection permettent alors d'obtenir la valeur de l'absorption correspondant à un élément de surface du plan radiographié. Pour obtenir le nombre de projections indépendantes nécessaires, il faut faire effectuer des rotations et des translations soit à la source (scanner X) soit à l'objet à radiographier, soit aux deux [8]. Pour radiographier un volume donné (tête par exemple), il faut effectuer une succession de coupes planes.

La RDN est basée sur l'interaction forte nucléaire des protons d'énergie intermédiaire ($E_p \geq 600$ MeV) avec le noyau d'un atome de la cible. Les produits de cette interaction ont généralement une énergie suffisamment grande pour sortir de la cible. Cette diffusion nucléaire se traduit par une importante déviation angulaire (figure 1) pouvant atteindre plusieurs dizaines de degrés.

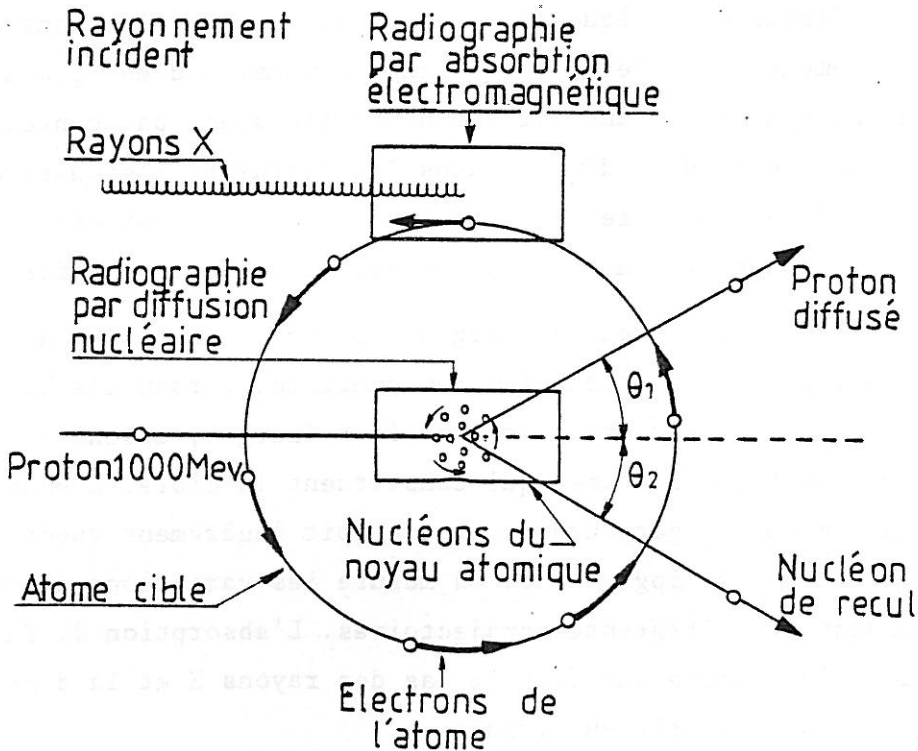


Figure 1 - Différents types d'interaction particule-matière

Si l'on est capable de reconstituer dans l'espace les trajectoires, donc les angles formés entre le nucléon incident et les nucléons sortants, on est

à même de déterminer la position dans l'espace de cette réaction (appelé *vertex*).

La figure 2 montre le principe de cette reconstitution du vertex de réaction.

Ainsi, avec un faisceau de protons (d'énergie > 600 MeV) on obtient directement une image tri-dimensionnelle de l'objet radiographié sans translation ni rotation. Ceci permet l'observation du volume suivant une série de tomographies pour lesquelles leur orientation et leur position dans l'espace ainsi que leur épaisseur sont des paramètres choisis à postériori par l'observateur.

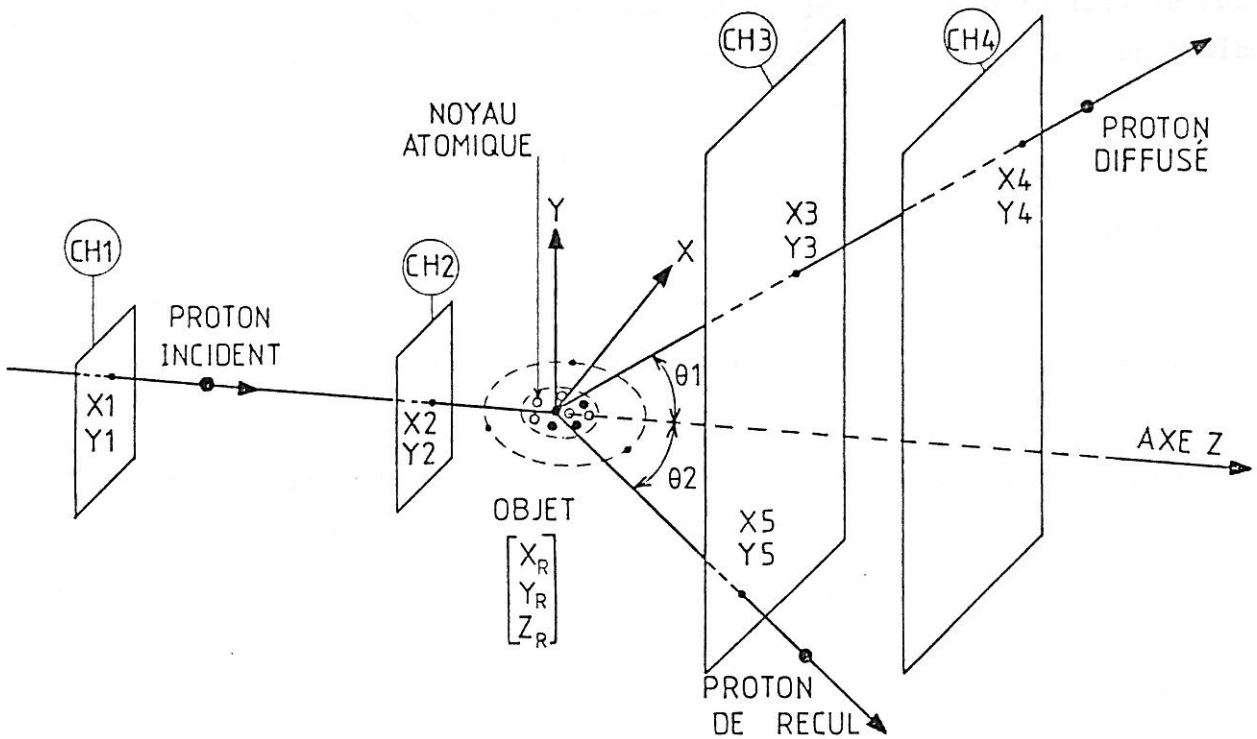


Figure 2 - Principe de la radiographie par diffusion nucléaire. Les détecteurs CH1, CH2, CH3 et CH4 mesurent les coordonnées du proton incident et du proton diffusé. On en déduit la position dans l'espace où a eu lieu la diffusion. Lorsqu'un proton de recul sort aussi de l'objet, il est détecté par CH3.

La dose déposée dans les tissus biologiques est pratiquement la même en surface et en profondeur, donc également répartie, contrairement à ce qui se passe avec les rayons X. Nous verrons que la sensibilité de cette méthode en fonction du numéro atomique ou de la masse atomique est totalement différente de celle des rayons X et permet, entre autres, d'envisager la radiographie de pièces métalliques épaisses.

La possibilité propre à la RDN, de distinguer, comme nous le verrons plus loin et grâce à l'interaction forte nucléaire, la diffusion sur le noyau d'hydrogène de celles se produisant sur les autres atomes fournit une information

supplémentaire dans l'analyse des cibles complexes contenant de l'hydrogène : telles que les tissus biologiques plus ou moins riches en cet atome. Nous l'appellerons la "radiographie de l'hydrogène".

Il est possible, moyennant une prise de synchronisation, d'envisager la radiographie d'objets animés de mouvements périodiques. Ceci permet à la RDN d'accéder à la quatrième dimension et de fournir ainsi des radiographies en espace-temps (cinéradiographie).

Pour mieux apprécier les qualités spécifiques de la RDN, nous consacrons le chapitre suivant à un rappel des propriétés de l'interaction nucléaire forte. Au chapitre IV, nous décrivons l'ensemble expérimental, le système d'acquisition et traitement. Les limites de résolution spatiale et de sensibilité sont étudiées au chapitre V. Les résultats déjà obtenus sont présentés au chapitre VI.

Chapitre IV

ENSEMBLE EXPERIMENTAL

Il est composé de cinq parties distinctes :

- Un ensemble de détection et de localisation qui est l'appareil à radiographe proprement dit.
- Une électronique d'amplification, de mise en forme, de décision, de codage sélectif.
- Un SAR (Satellite d'Acquisition Rapide) [14] qui est un ordinateur réalisé au DPh-N/ME de Saclay. Il traite l'information codée, calcule les coordonnées du vertex de réaction.
- Une mémoire de masse, gérée en matrice tri-dimensionnelle de 2×10^6 mots de 12 bits, dans laquelle sont rangés les événements en fonction des coordonnées spatiales du vertex calculé.
- Une unité de visualisation des tomographies de l'objet radiographié à partir des informations stockées dans la mémoire de masse.

A. ENSEMBLE DE DETECTION ET DE LOCALISATION

Il comprend (figure 13) :

- Un système de localisation des particules incidentes et des produits de la réaction nucléaire sur la cible.
- Un système de déclencheur (Trigger) indiquant qu'un "bon événement" a été détecté.

1. La localisation (figure 13)

L'ensemble comporte 4 détecteurs à localisation X, Y qui sont des chambres multifils classiques du type Charpak [15,16] : CH1, CH2, CH3, CH4.

Deux de ces détecteurs sont utilisés pour reconstituer les trajectoires dans l'espace du faisceau incident (CH1, CH2). Ils ont une surface de 400 cm^2 et des fils au pas de 1,27 mm soit 160 fils dans le plan horizontal (coordonnées X1, X2) et 160 fils dans le plan vertical (coordonnées Y1, Y2) soit au total 640 fils. la distance entre ces deux détecteurs est de 2049 mm. Ce groupe fait partie de ce que nous appellerons la "voie incidente".

Les deux autres détecteurs situés après la cible à radiographier sont également des chambres à fils, mais de 1 m^2 de surface (CH3, CH4). Elles localisent dans l'espace les trajectoires des produits de réaction venant de la cible. Le pas des fils est de 2 mm et, à raison de 512 fils par plan (soit 2048 fils au total), donnent les coordonnées X3, Y3, X4, Y4. La distance entre ces deux détecteurs est de 512 mm. Cette distance a été choisie d'une part pour une commodité de rentrée des données dans les programmes de reconstitution du vertex (tout comme la voie incidente), d'autre part pour que le détecteur CH4 puisse couvrir les angles de diffusion jusqu'à 40° (pratiquement la totalité de la distribution angulaire des particules diffusées). Ce groupe de détecteur fait partie de ce que nous appellerons la "voie de diffusion".

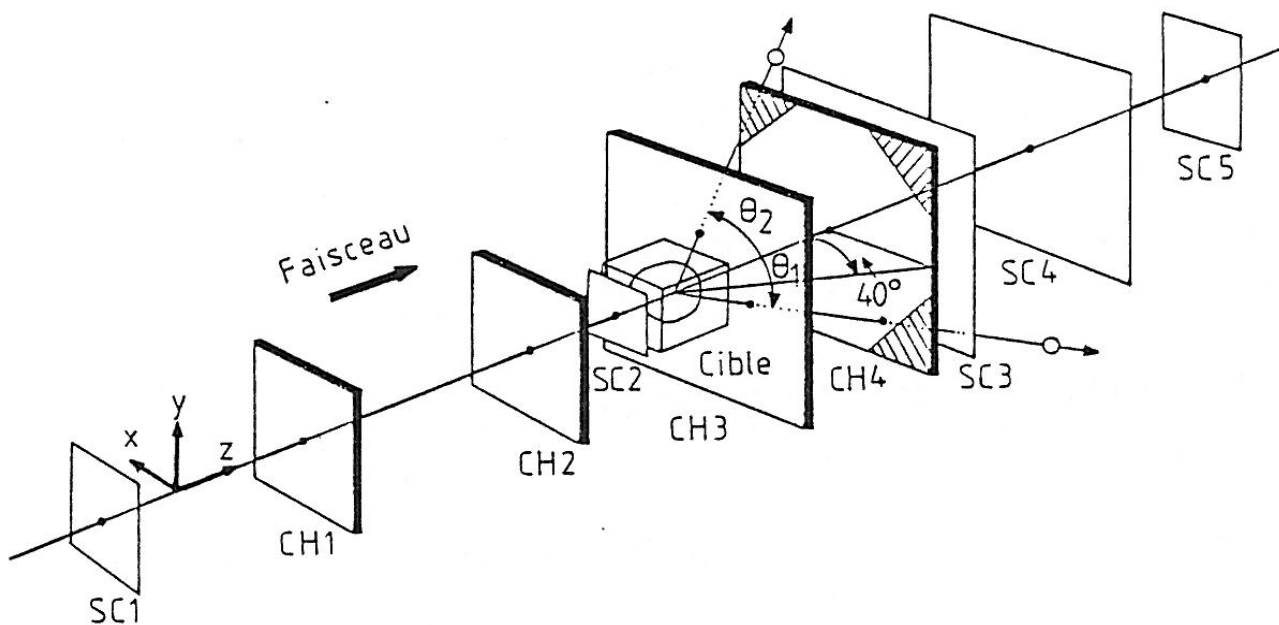


Figure 13 - Ensemble de détection pour la RDN

Actuellement les chambres à fils sont alimentées par un mélange gazeux composé de 35 % d'éthane et 65 % d'argon. Le choix de ce mélange permet, entre autres, de conserver l'information de l'ionisation primaire dans tout le "gap",

et, de ce fait, de localiser plus précisément la particule par un calcul simple de centroïd (la résolution est ramenée ainsi, en moyenne, au demi-pas des fils). Pour le faisceau incident, et pour bénéficier pleinement de cette interpolation, les chambres CH1 et CH2 sont inclinées de ≈ 6 degrés par rapport aux deux axes X et Y.

2. Déclencheur (figure 13)

Il est constitué par une batterie de scintillateurs SC1 à SC5 associés chacun à un photomultiplicateur. Il a pour fonction la discrimination d'un "bon événement", en associant temporellement les particules incidentes et les particules diffusées. Il autorise la prise en compte des impulsions au niveau de l'électronique.

- Sur la voie incidente, deux scintillateurs SC1 et SC2 en coïncidence déterminent le faisceau incident et sont utilisés également comme moniteur de dose d'irradiation (un collimateur d'ouverture réglable définit le champ d'irradiation choisi).

- Sur la voie de diffusion, trois scintillateurs SC3, SC4, SC5.

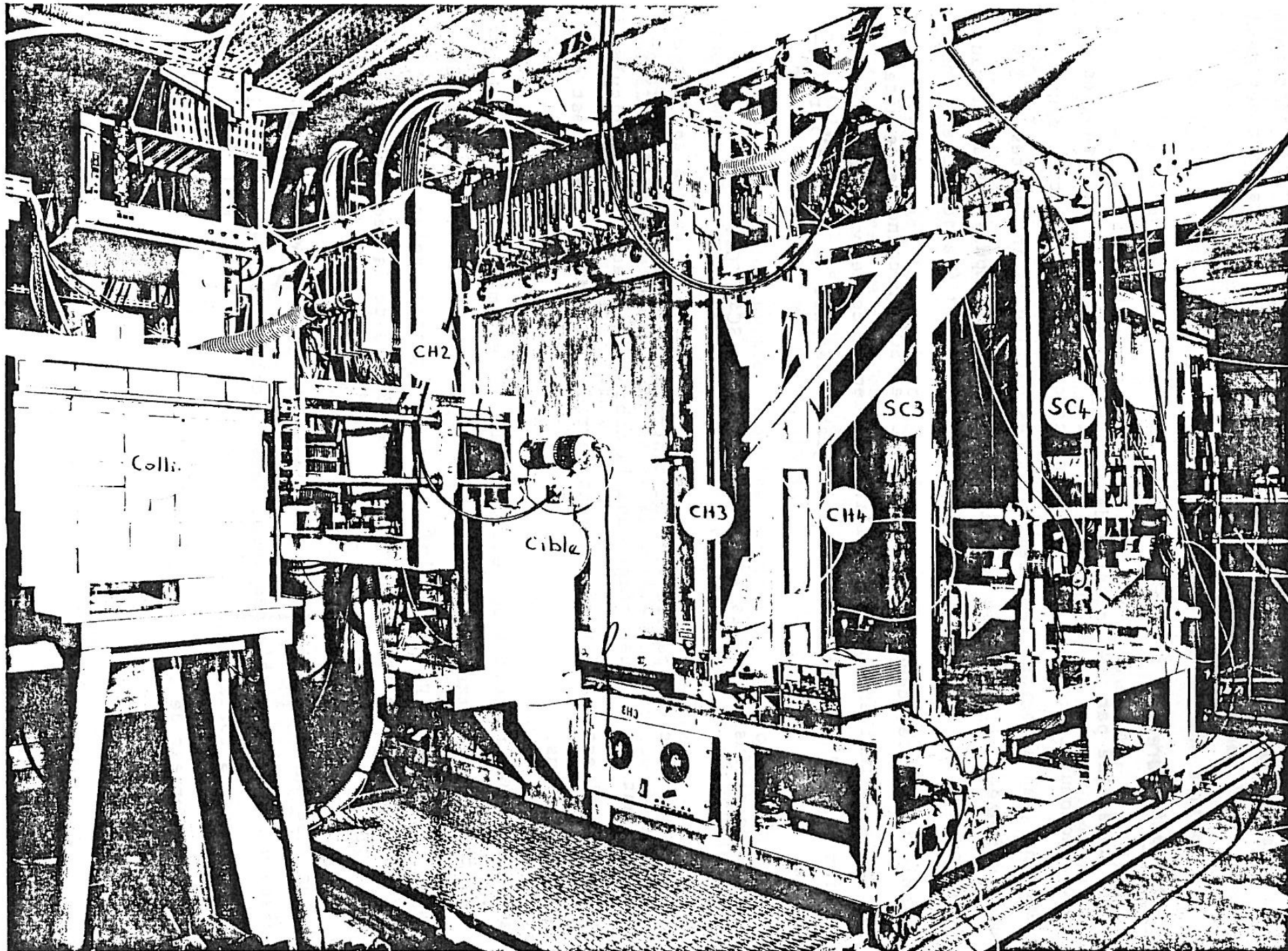
SC3 : il est conçu avec une partie vide au centre pour laisser passer le faisceau incident qui n'a pas réagi dans la cible. Il détecte les particules diffusées. Il est situé immédiatement derrière la chambre CH4 et est de mêmes dimensions.

SC4 : sa distance par rapport à SC3 est variable. Il est mis en anti-coïncidence avec SC3 pour permettre, en fonction de cette distance, de couper des angles de diffusion plus ou moins petits (les petits angles induisent, nous le verrons, une imprécision sur l'axe Z lors de la reconstitution du vertex).

SC5 : est utilisé en anti-coïncidence sur l'ensemble pour éliminer la partie du faisceau incident qui n'a pas réagi dans la cible afin de diminuer le taux de coïncidences fortuites.

Le déclencheur est de la forme logique :

$$\left[SC1 \cdot SC2 \cdot SC3 \cdot \overline{SC4} \right] \cdot \overline{SC5} .$$



Vue du poste expérimental de RDN

B. ELECTRONIQUE - SAR - MEMOIRE DE MASSE

L'électronique de chaque plan de fils est organisée en plusieurs niveaux :

- les voies élémentaires (une voie par fil),
- les sections, constituées de 16 voies élémentaires,
- la lecture des sections touchées, le codage de l'adresse des fils touchés et le calcul logique du centroïd de la trace,
- une mémorisation dans une petite mémoire tampon (FIFO),
- la lecture de la FIFO de chaque plan de fil et le transfert des données vers le calculateur pour le traitement.

Cette électronique [17] a été conçue pour traiter en ligne environ 50 000 événements par seconde. Le cycle utile de l'accélérateur Saturne auprès duquel est montée l'expérience, a un cycle utile de l'ordre de 40 % ; ceci représente donc une fréquence d'acquisition de l'ordre de 125 KHz. On en déduit que le temps total de traitement devrait être inférieur à 8 μ s compte tenu de l'arrivée aléatoire des événements.

I. La voie élémentaire (figure 14)

C'est une voie électronique associée à chaque fil des détecteurs CH1, CH2, CH3, CH4. Elle comprend un amplificateur à faible impédance d'entrée. Son gain est tel qu'il permet d'obtenir une sensibilité du discriminateur, ramenée à l'entrée de l'amplificateur, de l'ordre de 0,5 μ A à 1 μ A.

Un élément de retard du signal est inséré pour permettre l'échantillonnage de la voie, à partir d'un signal fourni par le déclencheur. Le signal échantillonné est mis alors dans un premier niveau de mémoire. Cet ensemble de fonctions est réalisé par un circuit LECROY PC800, qui a été choisi pour ses bonnes caractéristiques de stabilité de seuil et de délai. Il possède en outre, un double circuit de retard, ce qui nous permet de réduire à 50 ns l'intervalle minimum devant séparer deux événements pour qu'ils soient pris en compte. Cette particularité a conduit à rajouter au circuit LECROY un second niveau de mémoire. La sortie du premier niveau vers le second sera conditionnée par un signal d'autorisation de transfert délivré quand le premier événement aura été codé et qu'en plus aura été détectée la présence effective d'un second événement durant le temps de codage du premier.

II. La section (figure 14)

Elle regroupe 16 voies élémentaires (16 fils). Un plan de fils sera constitué de 10 sections pour les chambres CH1-CH2 et de 32 sections pour les chambres CH3-CH4. Chaque section touchée fournit un signal de présence (Memory-or).

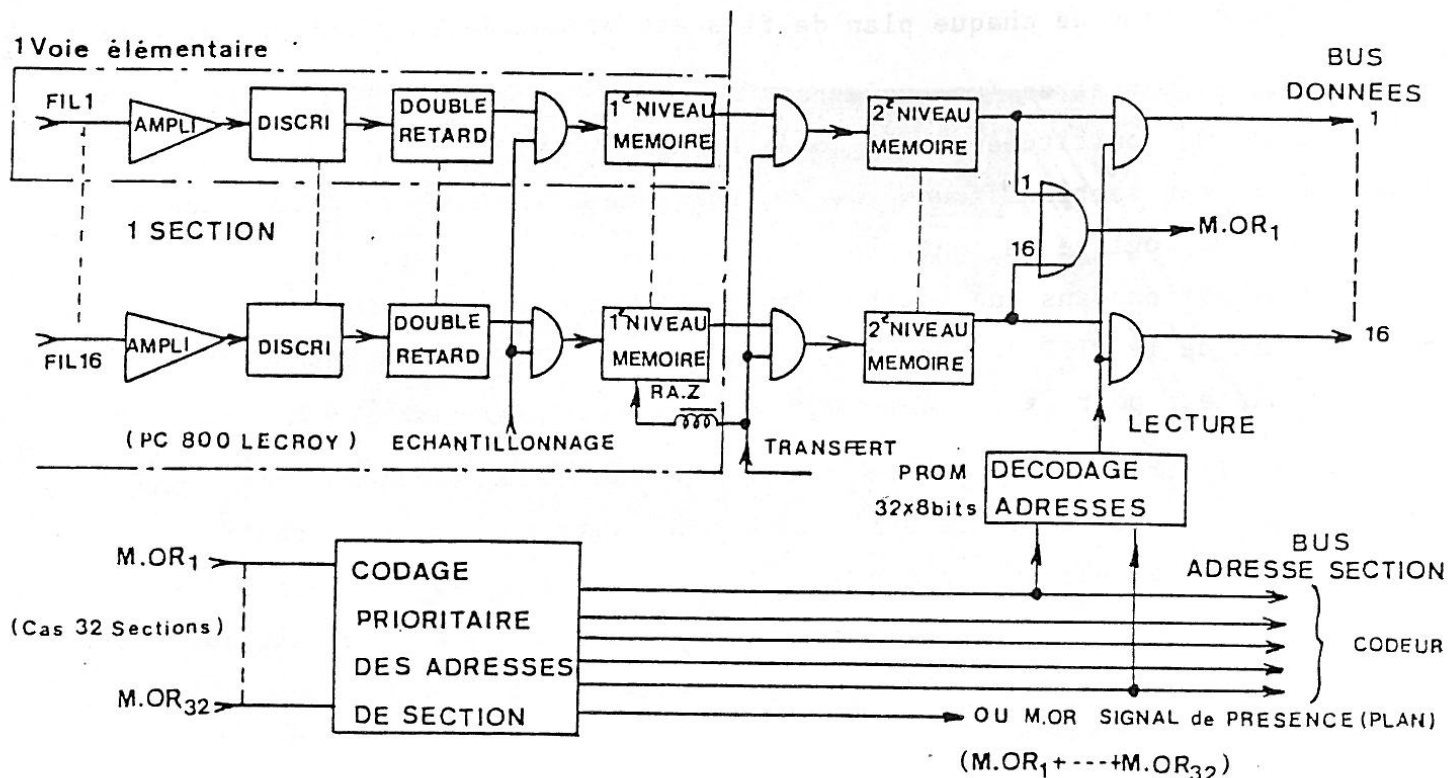


Figure 14 - Organisation d'une voie élémentaire et d'une section

C'est le traitement de ces signaux qui définira la lecture sélective des sections. En effet on ne vient lire que les sections présentant au moins 1 fil touché.

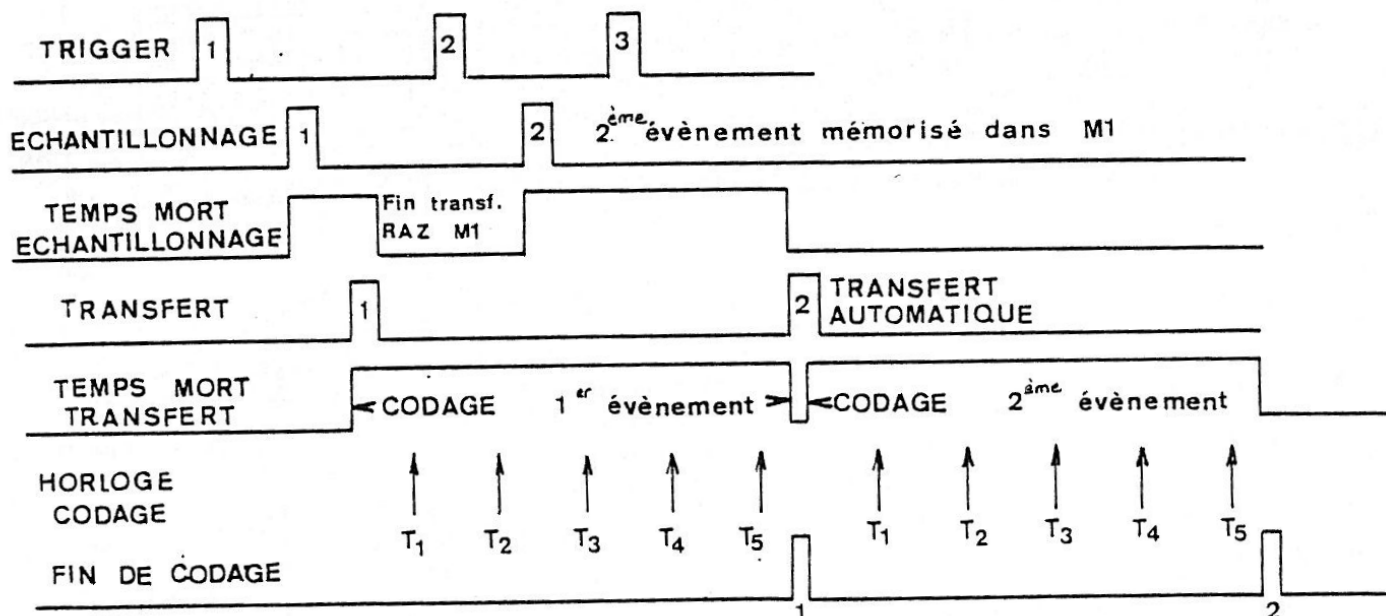
On définit un sens de lecture prioritaire qui est le même pour tous les plans X_i et le même pour tous les plans Y_i . La lecture sélective est réalisée par l'ensemble des OU-M.OR qui est codée par des encodeurs prioritaires, lesquels fourniront l'adresse de la section la plus prioritaire codée en binaire. Ce codage est envoyé comme adresse à une mémoire qui a été programmée précédemment, de telle manière que, pour cette adresse, elle fournit le signal de lecture de cette section (opération de décodage binaire-décimal).

Quand les informations correspondant à une section auront été acquises, on remettra à zéro le deuxième niveau de mémoire de cette seule section, ce qui entraîne l'obtention du signal de lecture de la section immédiatement moins prioritaire et ainsi de suite, jusqu'à un maximum de 4 lectures. En effet, pour diminuer à la fois le temps de lecture et le temps de traitement, il a été décidé de ne traiter qu'un maximum de 2 traces par plan (1 trace pouvant être à cheval sur 2 sections), ce qui correspond à l'événement le plus

complexe envisagé

Un signal de présence par plan est réalisé en faisant le "OU" entre les Memory-OR ce qui donne un OU-M.OR.

La figure 15 est le chronogramme du fonctionnement choisi pour un plan de chambre.



Sur les temps T₁ T₂ T₃ T₄ (transition positive de l'horloge), on mémorise dans les codeurs les données correspondant aux 4 lectures possibles

Figure 15 - Chronogramme de lecture des plans

III. Codage des plans de chambre - Les codeurs

A chaque plan de chambre est affecté un codeur (figure 17) organisé comme un système à propagation et travaillant sur une horloge.

Il aura les fonctions principales suivantes :

1. Mémorisation dans le registre M1 (22 bits) à l'instant T₁ de l'adresse de la section lue, de l'état des fils de cette section et du signal de présence du plan associé.

2. de calculs : (entre T₁ et T₂)

- du centre de gravité logique qui fournit une précision du demi-pas des fils,
- de la largeur de la trace (cluster),
- si l'on a à faire à un cluster indépendant (CI) ou à un cluster unique

(CU) en fonction d'une largeur de "trou" (L_T) quand la trace est à cheval sur deux sections.

La figure 16 donne des exemples de codage.

FORMULES UTILISEES

	CENTRE DE GRAVITE $\frac{1}{2}$ PAS	LARGEUR CLUSTER nb PAS	LT largeur fils inefficaces
C.I	$2C = C_1 + \overline{C_2}$	$(\overline{C_1} + \overline{C_2} + 1) - 16$	$C_1 + C_2 + 1$
C.U	$2C = C_1 + \overline{C_2} + 16$	$\overline{C_1} + \overline{C_2} + 1$	

si $\begin{cases} A' - A - 1 = 0 \\ \text{et} \\ L_T \leq \text{option} \end{cases} \Rightarrow \text{CU}$

$\text{INIT} + A' - A - 1 \neq 0 + L_T > \text{option} \Rightarrow \text{C.I}$

EXEMPLES

C.I $\begin{cases} C_1 = 11 & 2C_{CI} = 11 + 14 = 25 \quad (12, 5) \\ C_2 = 1 & I_{CI} = 4 + 14 + 1 - 16 = 3 \end{cases}$

$L_T = 1 + 1 + 1 = 3$ si L_T choisie = 4 \Rightarrow CU
 $A' - A - 1 = 0$

CU $\begin{cases} C'_1 = 1 & 2C_{CU} = 11 + 3 + 16 = 30 \\ C'_2 = 12 & I_{CU} = 4 + 3 + 1 = 8 \end{cases}$

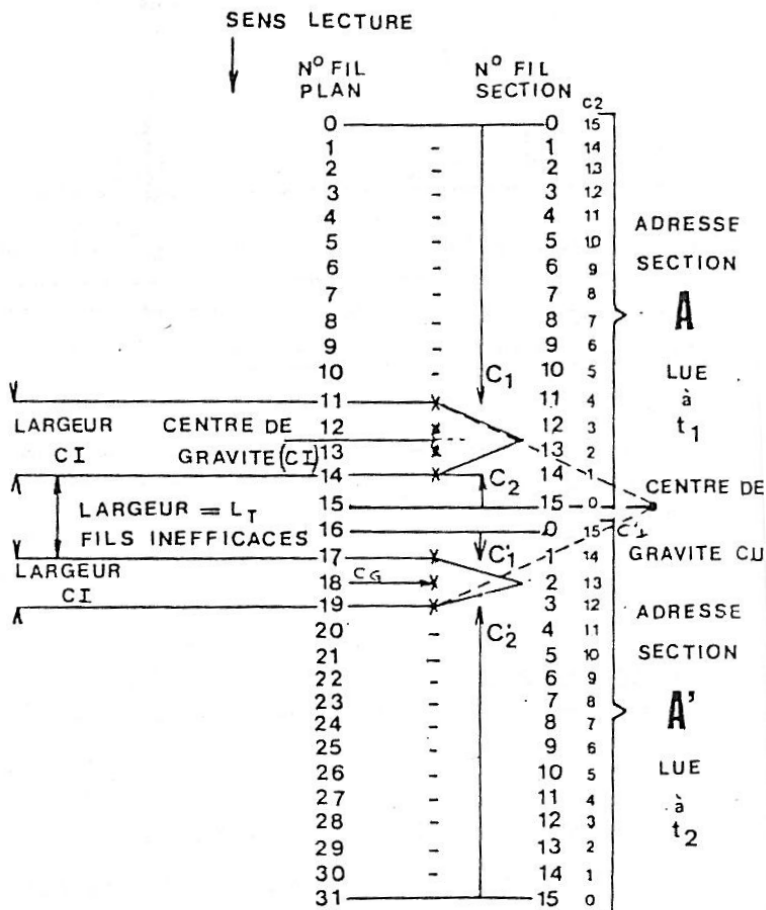


Figure 16 - Exemples de codage

3. de comparateur avec une présélection optionnelle sur : la configuration (nombre de traces acceptées sur le plan associé), le nombre maximal de fils touchés sur une trace, le nombre de fils "inefficaces" tolérés à l'intérieur d'un cluster (choix de 1 ou 2 traces quand deux sections adjacentes sont touchées).

Cette fonction de comparateur est essentielle car elle permet une grande souplesse dans le choix des paramètres cités. Par ailleurs, elle permet un rejet rapide de tout ce qui ne satisfait pas aux conditions finales choisies pour une acquisition de type donné.

4. de réinitialisation selective de la section lue.

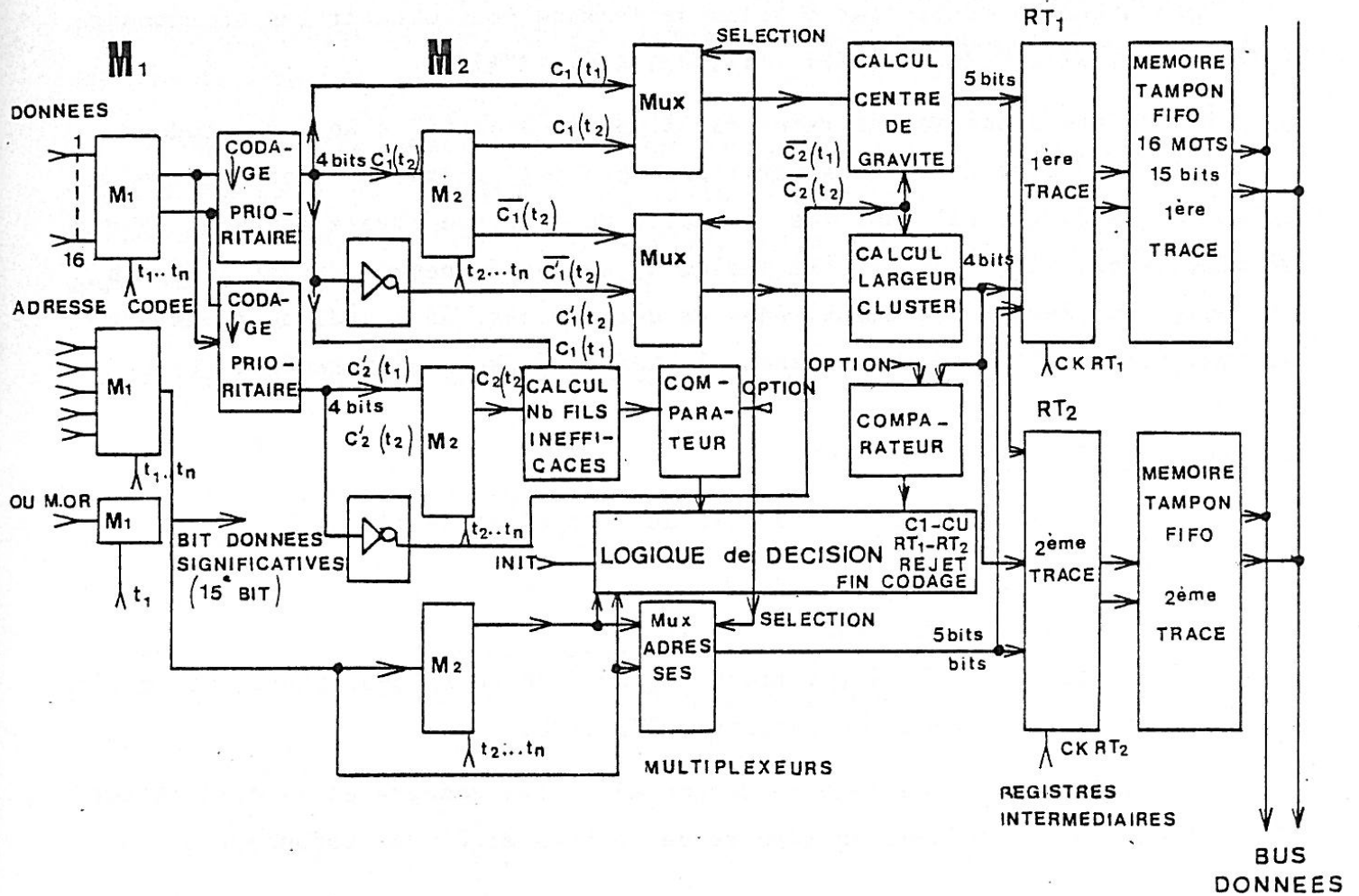


Figure 17 - Schéma synoptique d'un codeur

Comme nous avons choisi une "4 lectures" maximum, dans tous les cas on arrête le codage sur le temps T5 et le système fournit alors soit :

- un signal de fin de codage
- un rejet.

A ce moment-là, nous trouvons les informations intéressantes dans un (ou les 2) registre(s) intermédiaire(s) RT1, RT2, c'est-à-dire principalement la coordonnée de la (ou des) trace(s) dans le plan associé.

Actuellement la période de codage est de 600 ns (dont 200 ns imposées par des délais de câbles chambres → codeurs). Nous voyons donc que le temps de codage varie de 0,6 μs (1 trace, 1 section touchée) à 2,4 μs (2 traces, 4 sections touchées).

IV. Correlation des codeurs

1. Cas d'un rejet

Nous avons 8 codeurs car 8 plans de chambre pour obtenir les coordonnées (X1), (Y1), (X2), (Y2), (X3,X5), (Y3,Y5), (X4), (Y4).

Dès qu'une condition de rejet est élaborée à partir d'un des 8 codeurs, l'horloge de codage distribuée sur l'ensemble est arrêtée et l'on délivre un ordre de R.A.Z. général dans les bistables du deuxième niveau (figure 14) qui, en même temps, vient tester s'il y a eu un second événement durant le temps de codage du premier événement. Dans ce dernier cas, un signal de transfert automatique est élaboré et déclenche le codage du second événement.

2. Cas d'une fin de codage

On réalise le "ET" entre les "fin de codage" et le résultat

- . arrête l'horloge de codage
- . teste s'il y a un événement en attente
- . écrit dans les FIFOS (première information rentrée-première information sortie) le contenu des registres RT1, RT2.

Les FIFOS servent de mémoire tampon entre les codeurs et le calculateur SAR. Elles sont organisées en mémoire de 16 bits et d'une profondeur de 16 mots.

Le tableau ci-dessous présente trois exemples de configuration. On admet qu'à l'intérieur d'une même chambre à fils, on prend la même configuration pour les plans donnant les coordonnées X et Y.

Détecteur	CH1	CH2	CH3	CH4	Sélection
Configuration	1	1	1	1	1 particule dans chaque détecteur
	1	1	2	1	2 particules dans CH3
	1	1	1 ou 2	1	1 ou 2 particules acceptées dans CH3

V. Lecture des codeurs

Une horloge de lecture va permettre la lecture séquentielle des codeurs. Elle a une période de 150 ns. Après la dernière lecture, une demande d'interruption est envoyée au SAR. En même temps, on fait progresser d'un cran les données dans toutes les FIFOS.

Lorsque l'interruption SAR est reconnue, elle branche le programme principal à l'adresse du programme d'acquisition. Après avoir acquis ces données, le SAR renvoie un signal de fin de lecture qui autorisera, si nécessaire, une nouvelle séquence de lecture des FIFOS.

VI. LE SAR (Satellite d'Acquisition Rapide)

Construit autour de microprocesseurs en tranche AMD 2901, le SAR est un ordinateur de conception originale destiné à la mise au point, à l'acquisition et au traitement en ligne des expériences réalisées auprès de l'accélérateur Saturne. Il a été conçu et réalisé au DPh-N/ME de Saclay.

La mémoire du SAR est organisée en blocs de 32 K mots de 32 bits et est divisée en zone PROGRAMME et en zone DONNEES. La mémoire de données est organisée en mots de 8 bits (octets). Des instructions spécifiques permettent de lire ou d'écrire :

- des octets : 8 bits
- des demi-mots : 16 bits
- des mots : 32 bits.

Le champ de données inutilisé est mis à zéro lors des lectures. Un cycle SAR est égal à 280 ns.

Il déroule le programme de traitement qui consiste à obtenir, à partir des 8 ou 10 coordonnées, les 3 coordonnées spatiales X_R , Y_R , Z_R du vertex d'interaction nucléaire dans la cible. A partir de ces 3 coordonnées, on élabore une adresse pour une mémoire de masse et l'on envoie un ordre d'incrément automatique de +1 pour le contenu de cette adresse.

VII. La mémoire de masse

C'est une mémoire MOSTEK qui, compte tenu du volume des objets radiographiés et du découpage en volumes élémentaires envisagé, a une grande capacité : 2048 K mots de 12 bits.

Les 12 bits de contenu sont très largement suffisants si l'on considère la précision statistique que l'on peut obtenir ($\approx 1,6 \%$).

Les caractéristiques de cette mémoire sont :

- un temps de cycle de 450 ns
- un temps d'accès de 250 ns.

Cette mémoire de masse est gérée en matrice tri-dimensionnelle $M(X,Y,Z)$ pour laquelle chaque élément d'adresse correspond à un volume $\Delta V = \Delta X \times \Delta Y \times \Delta Z$, appelé "voxel". Quand un événement diffusé satisfait aux conditions $X < X_R < X + \Delta X$, $Y < Y_R < Y + \Delta Y$, $Z < Z_R < Z + \Delta Z$ un coup est ajouté à l'élément (X,Y,Z) de la matrice.

Lorsque la radiographie d'un objet est terminée (en acquisition de données), cette mémoire contient l'image densitométrique tridimensionnelle de cet objet. Une sauvegarde en est faite sur bande magnétique. C'est directement dans cette mémoire de masse, et à partir de programmes spécifiques chargés dans le SAR que se font les traitements nécessaires aux corrections de la matrice brute et la visualisation optionnelle sur écran TV à 16 niveaux de teinte d'une tomographie choisie à l'intérieur du volume radiographié.

La figure 18 donne un schéma général de l'ensemble de traitement et de visualisation à partir de l'élaboration des coordonnées X_i, Y_i .

Remarque : dans le cas d'une radiographie mixte, simple et hydrogène, la mémoire de masse peut être gérée en deux sous-matrices, chacune étant spécialisée.

Limitation du nombre d'événements acquis :

Actuellement, une des limitations provient du traitement en ligne. Le temps de déroulement du programme d'acquisition et de calcul du vertex est de l'ordre de 40 μ s. Comme nous sommes assujettis au cycle utile de Saturne, qui est en moyenne de 30 % à 40 %, la limitation actuelle est de l'ordre de 10 000 à 15 000 événements acquis par cycle (à 1 GeV, 1 cycle Saturne $\approx 1,2$ seconde).

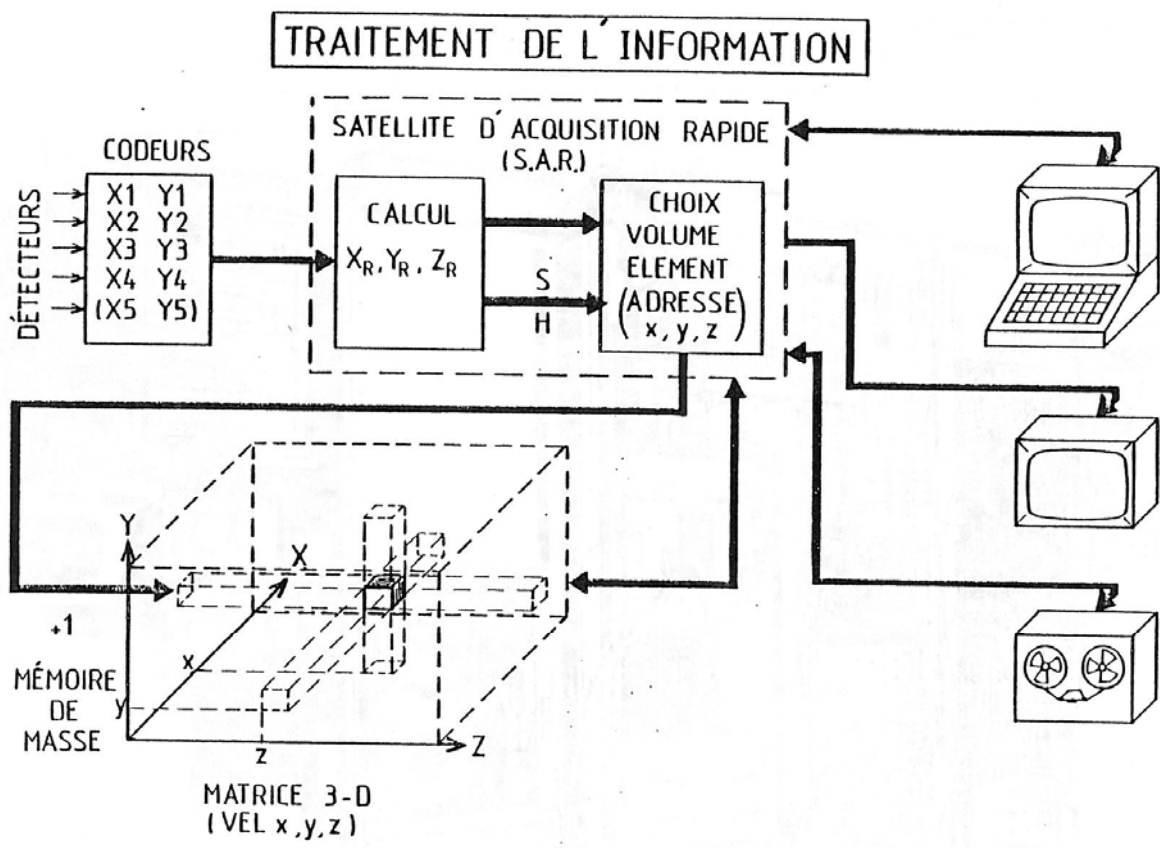
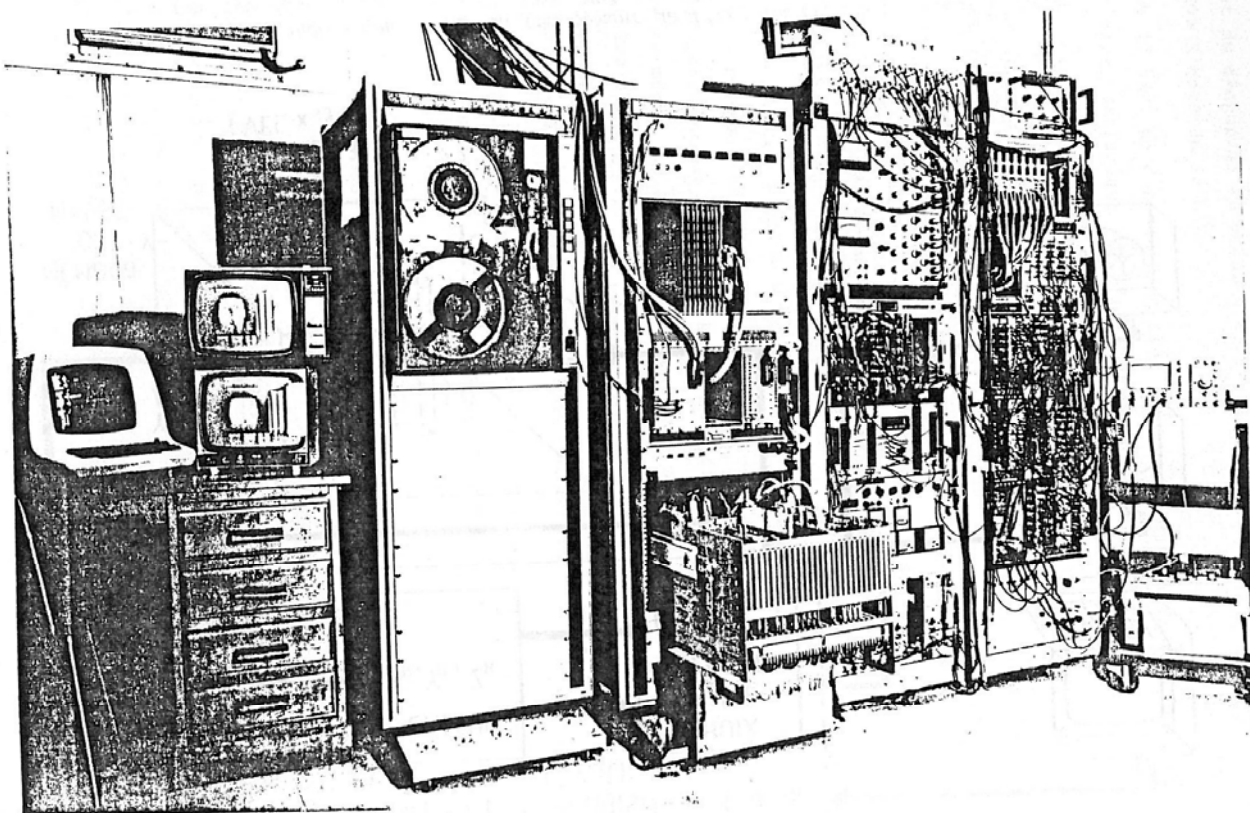


Figure 18 - Schéma synoptique du traitement de l'information depuis celle fournie par les détecteurs CH1, CH2, CH3, CH4 jusqu'au rangement dans la mémoire de masse dans une RDN



ELECTRONIQUE D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT

De gauche à droite : console conversationnelle ; visu image et unité de bande magnétique. 2ième baie : mémoire de masse (en haut) et SAR (en bas). 3ième baie : détection. 4ième baie : codeurs, échelles, électronique de coïncidence temporelle.