

CERN-TIS-CFM/IR/92-09
Septembre 1992

**UTILISATION DE DOSIMETRES
SEMI-CONDUCTEURS AU SILICIUM AUTOUR DES
ACCELERATEURS DE PARTICULES A HAUTE
ENERGIE**

L. Malfante

**INSA Lyon 4ème année
Rapport de stage**

Résumé

Avec le projet de construction d'un collisionneur à haute énergie de plusieurs TeV au CERN, des composants électroniques auront à être utilisés au voisinage du faisceau, et l'on attend également des niveaux de dose élevés dans les détecteurs de particules, où des composants tels que les détecteurs au silicium seront utilisés. Le champ de radiation autour du faisceau et dans la partie centrale des détecteurs de particules sera complexe. Il est par conséquent nécessaire de pouvoir mesurer la dose absorbée dans les composants semi-conducteurs. Dans ce but, le système de dosimétrie le plus fiable est basé sur le silicium même. Plusieurs sortes de diodes PIN et de MOSFETs ont été irradiés dans une facilité d'irradiation au CERN. Ce rapport présente les résultats principaux obtenus, après une partie théorique et une introduction au CERN.

Abstract

With the project of building a high-energy multi-TeV collider at CERN, electronic components will have to be used in the vicinity of the beam, and high dose levels are also expected in particle detectors, where components as semi-conductor detectors will be used. The radiation field around the beam and in the central part of particle detectors will be complexe. It is therefore necessary to be able to measure the absorbed dose in semi-conductor devices. For this purpose, the most reliable dosimetric system is based on silicon itself. Several kinds of PIN diodes and MOSFETs were irradiated in an accelerator irradiation facility at CERN. This report gives the main results obtained, after a theoretical part and an introduction to CERN.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement MM. H. SCHÖNBACHER et M. TAVLET qui m'ont accueillie dans leur service pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans l'élaboration de ce rapport ainsi que pour le bon déroulement de ce stage. Je remercie également toute l'équipe de la section ainsi que celle de Mr LEMEILLEUR de la division ECP qui ont su m'accorder du temps et me faire partager leur savoir-faire.

Table des matières

Introduction	1
I L'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire	2
I-1 Le CERN	2
I-1-1 Un peu d'histoire...	2
I-1-2 Le conseil et les comités	3
I-1-3 Le Cern : ville laboratoire	5
I-2 Les accélérateurs de particules	7
I-2-1 Un accélérateur type	7
I-2-2 Le synchrotron à protons	9
I-2-3 Le super-synchrotron à protons	9
I-2-4 Les antiparticules au CERN	10
I-2-5 Le LEP	11
Un anneau sous-terrain	11
La machine	12
Les collisions	13
Les injecteurs du LEP	13
I-2-6 Le projet LHC	15
Pourquoi le LHC	15
La machine	17
I-2-7 Un collisionneur linéaire	19
I-3 Les expériences	20
II Quelques bases théoriques	21
II-1 Les différents modes de rayonnement	21
II-2 Mécanismes d'interaction rayonnement-matière	24
II-2-1 Les photons	24
II-2-2 Les particules chargées	25
II-2-3 Les neutrons	25
II-2-4 Les unités	26
II-3 La dosimétrie	28
II-4 Les effets des radiations sur les composants	
semi-conducteurs au silicium	31
II-4-1 Les neutrons	31
II-4-2 Les rayonnements électromagnétiques	34
II-4-3 Les particules chargées	43

III Le stage	44
III-1 Présentation des facilités d'irradiation	44
III-1-1 Le PSAIF	44
III-1-2 Irradiation en Gammas	47
III-2 Présentation des dosimètres testés	48
III-2-1 Les diodes	48
Décteur UA2	48
Diode PIN d'Ukraine	51
Diode PIN BPW34	52
III-2-2 Les MOS	54
Radfet	54
Transistor d'Ukraine	55
III-3 Résultats	58
III-3-1 Irradiation au PSAIF	58
Décteurs UA2	58
Diodes PIN d'Ukraine	62
Diodes PIN BPW34	63
Radfets	65
Transistors d'Ukraine	67
III-3-2 Irradiation en Gammas	68
III-3-3 Comportement post-irradiation	70
Décteurs UA2	70
Diodes PIN d'Ukraine	71
Diodes PIN BPW34	73
Radfets	74
Transistors d'Ukraine	75
III-3-4 Analyse des résultats	76
Conclusion	78
Bibliographie	
Annexes :	
Annexe A : Organigramme du CERN	
Annexe B : Ma situation dans la division TIS	

INTRODUCTION

A la fin de leur deuxième année au Département Génie Physique et Matériaux de l'INSAL (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon), les élèves doivent effectuer un stage d'une durée minimum de trois mois. C'est dans ce cadre que j'ai passé six mois au CERN dans la division TIS (Technical Inspection and Safety), groupe CFM (Chemistry, Fire and Materials) au sein de la section Matériaux et Dosimétrie des Hautes Doses.

Avec le projet de construction du LHC, des composants électroniques seront placés au voisinage du faisceau et l'on s'attend à des niveaux de doses élevés dans les détecteurs de particules où des composants semi-conducteurs seront utilisés. Afin de pouvoir surveiller leur dégradation, il faut trouver des dosimètres mieux adaptés aux semi-conducteurs que ceux utilisés actuellement au CERN.

Ces dosimètres existent ou sont en cours de développement. Ce sont essentiellement des diodes PIN et des transistors MOS.

Il s'agit donc, après avoir étudié les mécanismes d'action des radiations sur les semi-conducteurs et après avoir compris le fonctionnement des dosimètres, de faire leur calibration dans différentes sources d'irradiation et de comparer leur réponse avec celle de dosimètres actuellement utilisés et avec les fluences déterminées par des mesures par activation.

Enfin, il est intéressant d'étudier l'influence de la température lors de l'irradiation et des conditions de stockage post-irradiation.

Le but est de pouvoir sélectionner le dosimètre le mieux adapté qui devra être fiable, répondant aux niveaux de doses attendus, capable de séparer la dose en gammas de la dose en neutrons, facile d'emploi et d'un coût raisonnable.

I L'ORGANISATION EUROPEENNE POUR LA RECHERCHE NUCLEAIRE

I-1 LE CERN

L'Organisation Européenne pour la Recherche nucléaire, mieux connue sous le nom de CERN (abréviation du Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), a son siège en Suisse à Genève. Situé à cheval sur la frontière franco-suisse, juste à l'Ouest de Genève, il constitue un exemple remarquable de coopération internationale.

La fonction du CERN est de mettre à la disposition des physiciens européens et mondiaux des installations de recherche en physique des particules qui ne sauraient être obtenues au moyen des seules ressources nationales de chaque pays. Le CERN est ainsi le principal centre européen de recherche fondamentale sur la matière.

I-1-1 Un peu d'histoire...

En 1945, l'Europe ressortait affaiblie et appauvrie des années de guerre. Les savants européens étaient à la recherche de voies nouvelles pour se donner les moyens de reprendre leurs activités scientifiques d'avant guerre et les hommes d'Etat, de leur côté, sondaient les domaines d'intérêt commun où un effort coopératif pourrait aboutir à une manifestation tangible de l'unité Européenne.

Le coup d'envoi historique à l'idée d'un laboratoire européen de physique fut donné par Louis De Broglie dans un message adressé à la Conférence Européenne de la Culture, réunie à Lausanne en décembre 1949.

Dans les trois années qui suivirent, sous l'impulsion de diverses personnalités européennes, les travaux préparatoires avancèrent, d'abord au sein du Centre Européen de la Culture, dirigé par Denis de Rougemont qui joua un rôle de catalyseur, puis au sein de l'UNESCO où, lors de la Conférence générale de Florence en juin 1950 et grâce à l'appui du Professeur Rabi (Prix Nobel de Physique et Chef de la Délégation américaine) furent jetées les bases de ce qui devait devenir ensuite la Convention établissant l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, signée à Paris le 1er juillet 1953.

Aux termes de la Convention, la collaboration entre les Etats membres s'appliquera "à des recherches de caractère purement scientifique et fondamental". L'Organisation, est-il précisé, s'abstiendra de toute activité à des fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques seront rendus publics.

Les Etats membres étaient au nombre de douze, à savoir : Allemagne fédérale, Belgique, Danemark, France, Grèce, Italie, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Yougoslavie. Aujourd'hui, le CERN comprend dix-huit Etats membres : l'Autriche est devenue membre en 1959, la Yougoslavie s'est retirée en 1961 ; l'Espagne et le Portugal ont rejoint l'Organisation respectivement en 1983 et en 1986, tout comme la Finlande et la Pologne en 1991, ainsi que la Tchécoslovaquie et la Hongrie en 1992.

Entre-temps, la question de l'emplacement du futur laboratoire avait été étudiée et, grâce à l'enthousiasme notamment du conseiller d'Etat genevois Albert Picot, le site de Meyrin fut finalement choisi.

Au cours de ces trois dernières décennies, le CERN est effectivement devenu le centre de recherche idéal imaginé par ses fondateurs. Situé dans un lieu facilement accessible le CERN remplit parfaitement sa fonction de ralliement des physiciens, non seulement européens mais venus du monde entier, et leur offre les moyens de se livrer à des expériences qui autrement n'auraient pas pu être réalisées en Europe, ou seulement à échelle réduite ; le CERN s'est agrandi et peuplé pour former aujourd'hui une communauté de plus de six mille personnes : physiciens, ingénieurs, originaires des pays membres ou d'autres pays, chimistes, dessinateurs, électroniciens, géomètres, secrétaires, comptables, pompiers et spécialistes de toutes sortes de professions.

I-1-2 Le Conseil et les Comités

L'organe directeur du CERN est le CONSEIL. Il est composé de deux délégués de chacun des Etats membres, l'un étant le porte-parole du gouvernement, et l'autre représentant généralement les milieux scientifiques. Chaque Etat dispose d'une voix. Il appartient au Conseil (qui se réunit deux fois l'an mais tient dans l'intervalle des réunions régulières en comité restreint) de déterminer les grandes lignes de la politique de la recherche, de fixer et de contrôler les dispositifs administratifs, d'adopter les budgets, de contrôler les finances et de publier les comptes.

Le Président du Conseil est élu pour une année et son mandat ne peut dépasser trois années consécutives.

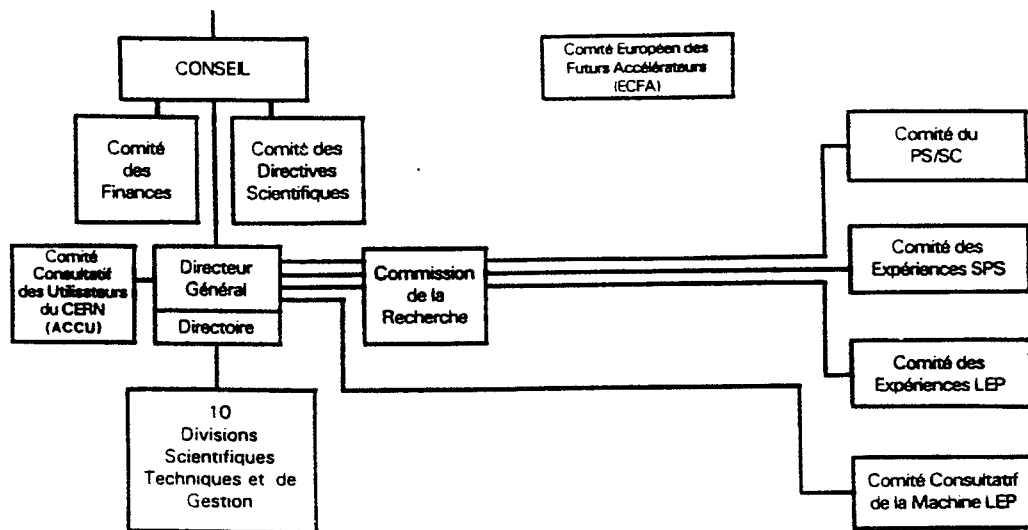
Assistant le Conseil dans ses délibérations,

- un Comité des Finances contrôle la gestion financière du CERN.

- un Comité des Directives Scientifiques fait des recommandations quant aux programmes de recherche et aux nouveaux projets. Il est composé d'hommes de science indépendants, souvent de grande renommée, et qui ne sont pas nécessairement ressortissants des Etats membres.

Enfin le Comité Européen pour les Futurs Accélérateurs (ECFA) regroupe à titre indépendant la communauté Européenne des physiciens des particules.

L'ECFA formule des plans à longue échéance, s'efforçant d'harmoniser en Europe et dans le monde, les investissements des divers laboratoires en fonction des programmes de recherche ayant recueilli l'approbation la plus large de la part des chercheurs.



ORGANISATION DU CERN

Le Directeur Général du CERN est nommé par le Conseil pour une durée déterminée. En fonction depuis le 1er janvier 1989, l'actuel Directeur Général est le Professeur Carlo Rubbia (Italie), qui a reçu le Prix Nobel de Physique en 1984 et a été nommé par le Conseil en décembre 1987.

Le Directeur Général est assisté d'un Directoire dont il désigne les membres qui sont ensuite approuvés par le Conseil. En outre, il prend l'avis des comités des expériences, qui formulent des recommandations quant aux expériences prévues pour chacun des accélérateurs.

I-1-3 Le CERN, ville-laboratoire

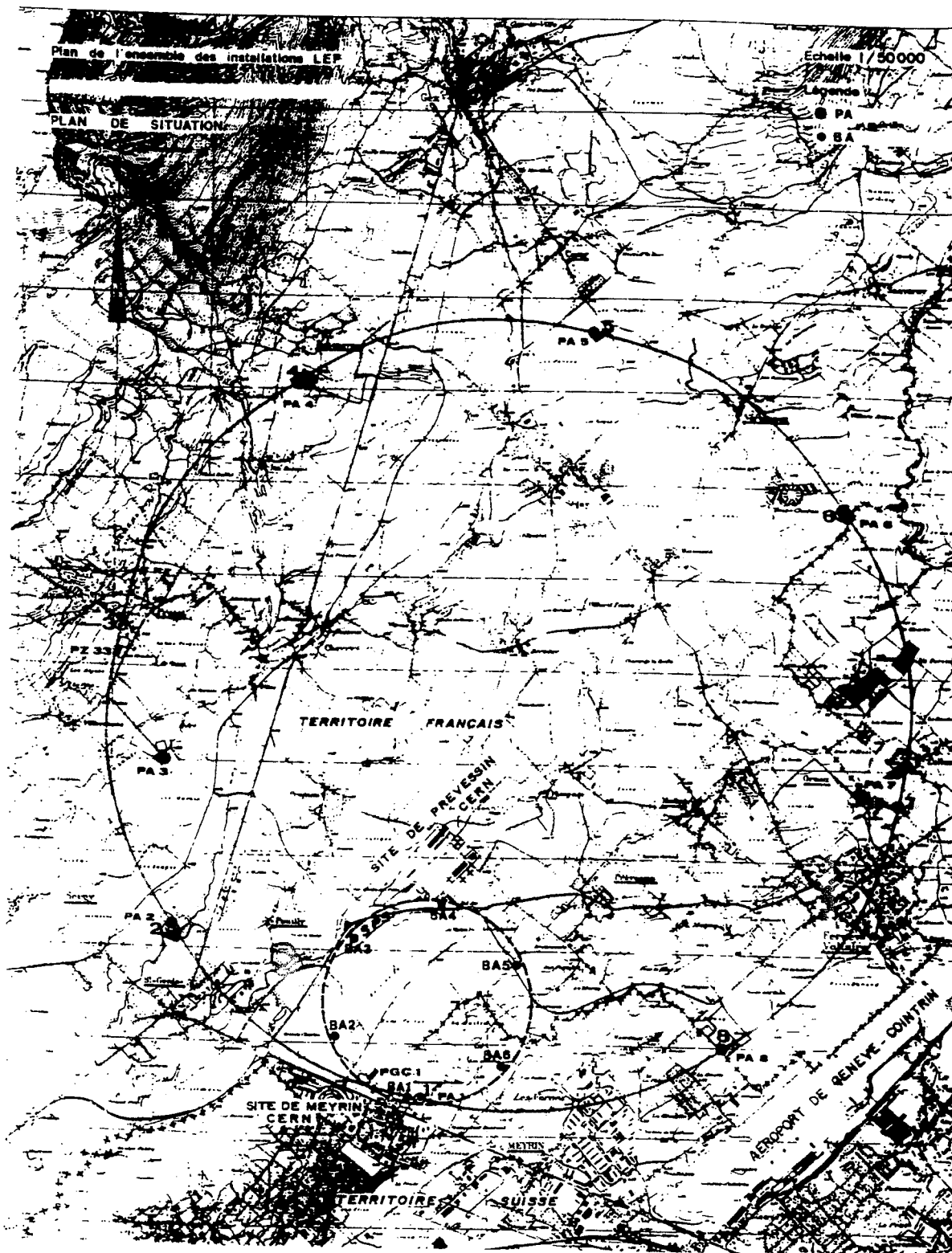
Le site de Meyrin s'étend sur environ 80 hectares, moitié en Suisse (où fut installé le premier accélérateur en 1957), moitié en France. Ce site se présente comme une petite ville : autour de ses accélérateurs, on trouve des ateliers, une imprimerie, des bureaux administratifs, un foyer hôtel, des restaurants, une banque,....

Un second site a été créé à quelques kilomètres de là, à Preessin (France), pour les besoins de l'accélérateur SPS mis en service en 1976. Ce site occupe un espace clôturé de 82 hectares.

D'autres superficies (plusieurs centaines d'hectares), que la France et la Suisse ont réservées autour des installations du CERN, ont été laissées à l'agriculture. Le projet LEP, lui, n'occupe en surface que 20 hectares clôturés.

Sur l'ensemble des deux sites travaillent plus de six mille personnes, dont près de 3000 sont des employés permanents. La plupart des autres personnes sont les utilisateurs du Laboratoire, c'est à dire des chercheurs, des ingénieurs et des étudiants venus des Etats membres ou de laboratoires et instituts du monde entier.

Ce rassemblement de gens d'origine, de culture, de langues et de professions si diverses donnent lieu au CERN, en dehors de la recherche proprement dite, à des activités culturelles très variées (concerts, expositions, sports, conférences,...).



SITUATION DU CERN DANS LA REGION

I-2 LES ACCELERATEURS DE PARTICULES

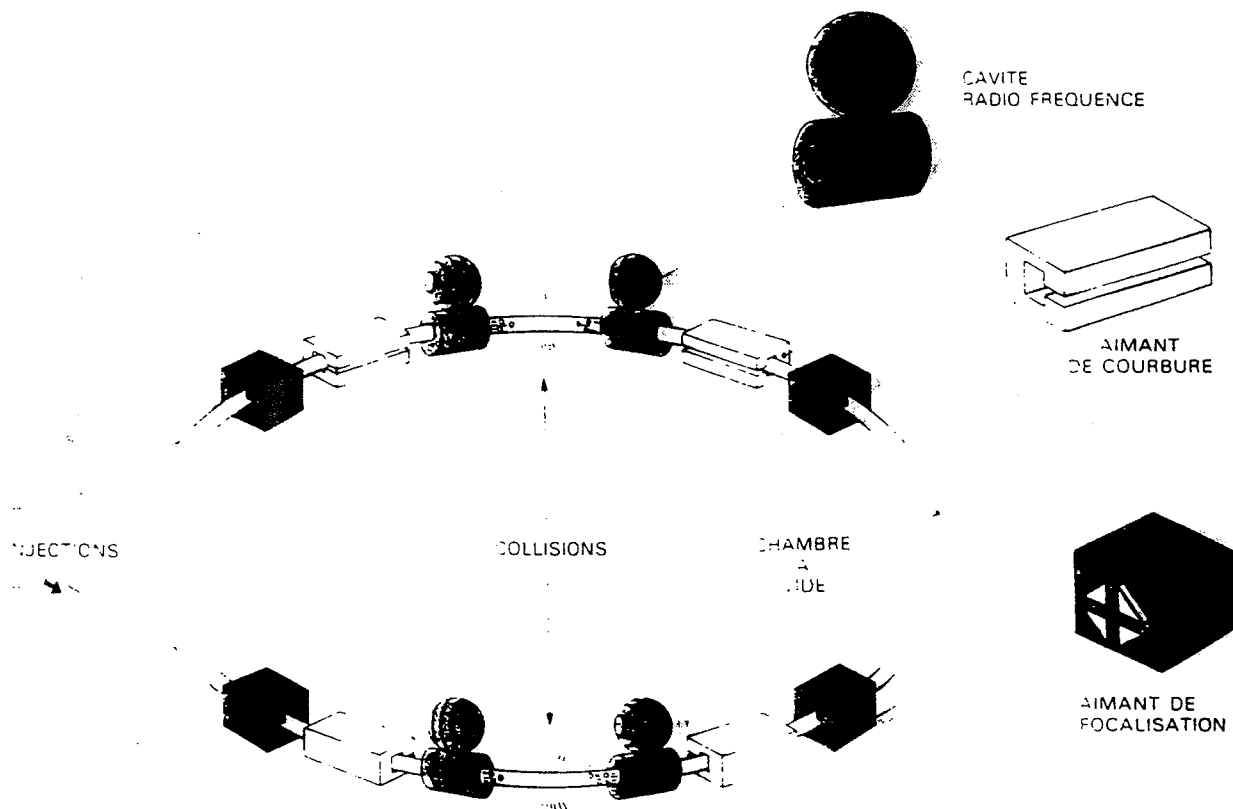
Pour produire et étudier des particules, il est nécessaire d'employer des accélérateurs. Ces machines fournissent des faisceaux de particules de haute énergie qui pénètrent profondément à l'intérieur de la matière et en révèlent les constituants. Le paramètre principal d'un accélérateur est l'énergie maximale à laquelle il peut porter les faisceaux de particules. Cette énergie s'exprime en électronvolts (eV), unité égale à l'énergie cinétique acquise par une particule de charge unitaire sous l'effet d'une différence de potentiel de un volt. Le second paramètre important est la luminosité qui dépend de l'intensité et de la concentration du faisceau ainsi que du nombre de fois où les faisceaux se rencontrent. Elle s'exprime en $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

I-2-1 Un accélérateur type

Dans chaque accélérateur, on retrouve, sous une forme ou une autre, les éléments suivants :

- La source des ions ou des électrons à accélérer
- La chambre à vide dans laquelle les particules circulent jusqu'à leur utilisation ;
- Le dispositif de guidage et de focalisation utilisant le plus souvent des champs magnétiques, pour garder les particules dans le voisinage de la trajectoire de référence ;
- Le système d'accélération à l'aide d'un champ électrique pour augmenter l'énergie des particules et compenser éventuellement les pertes d'énergie par rayonnement électromagnétique.
- Les dispositifs de mesure et de correction
- Les cibles internes, éventuellement, et les systèmes d'extraction pour la production de faisceaux secondaires pour les expériences.

Le principe du collisionneur est d'amener en collision frontale ou quasi-frontale deux faisceaux de particules, celles-ci n'étant pas nécessairement de même nature et de même énergie. Les collisionneurs actuels sont des accélérateurs en soi. On choisit souvent une particule et son antiparticule car cela permet d'utiliser un anneau unique. En effet, pour accélérer et faire entrer en collision des particules de charges opposées un seul anneau suffit puisque des particules de charges opposées circulent en sens inverse dans un champ magnétique donné.



PLAN D'UN ACCELERATEUR TYPE

Les accélérateurs du CERN sont le synchrotron à protons (PS) de 28 GeV (milliard d'eV), le super synchrotron à protons (SPS) de 450 GeV, le LEAR (Low Energy Antiproton Ring) et le LEP (Large Electron Positron Collider) de 50 GeV par faisceau.

Les antiprotons utilisés dans les collisionneurs protons-antiprotons et dans le LEAR sont collectés dans le collecteur d'antiprotons (ACOL) et accumulés dans l'accumulateur d'antiprotons (AA).

I-2-2 Le synchrotron à protons

Lorsque le synchrotron du CERN accéléra ses premiers faisceaux de protons en 1959, il était le plus puissant des accélérateurs en service dans le monde. Avant d'être injectés dans l'anneau du synchrotron, les protons traversent un accélérateur linéaire (LINAC) où ils acquièrent une énergie de 50 MeV, puis un petit synchrotron à quatre anneaux (booster) qui porte leur énergie à 1 GeV. Cette augmentation de l'énergie d'injection permet d'accélérer un plus grand nombre de protons jusqu'à la pleine énergie de la machine.

Construit à l'origine pour alimenter directement les expériences avec des protons, le PS fournit maintenant les protons et les anti-protons destinés au super synchrotron à protons, les électrons et positons pour le LEP ; il décélère aussi des antiprotons pour l'anneau antiprotons de faible énergie (LEAR) entré en service en 1983.

Le PS accélère également de temps à autres des faisceaux d'autres particules (ion oxygène, soufre, plomb, ...).

La constante adaptation du PS aux besoins évolutifs du CERN a exigé une grande compétence de la part des spécialistes des machines.

I-2-3 Le super-synchrotron à protons

Le super-synchrotron à protons de 450 GeV est entré en service en 1976. Avec son millier d'aimants répartis autour d'un anneau de 7 km de circonférence situé dans un tunnel sous-terrain, il était lors de sa construction le plus grand accélérateur au monde.

Le SPS alimente en faisceaux deux zones d'expériences, situées respectivement au nord et à l'ouest du site du CERN. Ces deux zones servent à des expériences avec faisceau de particules "secondaires", produites lorsque le faisceau primaire de protons de haute énergie frappe une cible. Plus précisément, la zone Ouest abrite un vaste programme d'expériences utilisant des faisceaux de neutrinos, tandis que la zone Nord sert de cadre à des expériences de grande envergure employant des faisceaux de muons.

Outre le fait que le SPS accélère des faisceaux de protons et d'antiprotons, il peut également accélérer des faisceaux d'électrons et de positons jusqu'à 22 GeV pour injection dans le LEP.

I-2-4 Les antiparticules au CERN

La disponibilité de faisceaux d'antimatière (antiprotons et positons) a permis d'étendre la gamme des expériences au CERN. Elle a été rendue possible grâce à l'invention d'une nouvelle technique, appelée refroidissement stochastique, permettant de concentrer les antiprotons en faisceaux intenses.

Le AA, ou accumulateur d'antiprotons, en service depuis 1981, est au coeur de la source d'antiprotons du CERN. C'est une installation unique en son genre, qui a valu le Prix Nobel de Physique 1984 à son concepteur, l'ingénieur physicien néerlandais Simon Van Der Meer.

Il est constitué par un anneau en forme d'hexagone aplati, sur lequel sont répartis des aimants ainsi que sept systèmes de correction composés chacun d'un détecteur et d'un correcteur diamétralement opposés.

Les antiprotons sont produits par bombardement d'une cible avec des protons fournis par le PS. Ils sont créés en même temps qu'une multitude d'autres particules, et il faut près d'un million de protons sur la cible pour obtenir un seul antiproton.

La chambre à vide de l'accumulateur d'antiprotons est divisée en deux parties à peu près égales par un volet qui assure l'isolation électromagnétique entre le faisceau injecté dans la région extérieure de la chambre, et le faisceau stocké dans la région intérieure.

La réduction de la dispersion d'énergie du faisceau est effectuée par "refroidissement stochastique" ; ce processus consiste à stocker et à faire circuler des antiparticules dans un anneau où règne un vide très poussé, et à corriger par des impulsions répétées et sur mesure leurs trajectoires désordonnées, cela jusqu'à ce que les antiprotons aient tous les mêmes qualités, et forment un faisceau homogène et contrôlé.

On y parvient dans le AA en procédant ainsi : on injecte les antiprotons dans la chambre extérieure par paquets ; après réduction de la dispersion du faisceau d'un facteur 10 (en un peu plus de 2 secondes), le premier paquet est transporté sur l'orbite intérieure de la machine (région d'accumulation) ; la chambre est alors prête à recevoir un deuxième paquet, environ 2,4 secondes après le premier.

Après 40 heures, 60 000 paquets ont été emmagasinés. Parmi eux, plus de la moitié ont la densité requise pour les expériences de collision et sont injectés par paquets successifs dans le PS pour y être accélérés à 26 GeV en vue de leur injection dans le SPS, ou y être décélérés avant d'être dirigés dans le LEAR spécialisé dans la physique des antiprotons de basse énergie.

L'accumulateur a été complété en 1987 par un collecteur, ACOL. L'objectif de cette source remodifiée est d'accroître le taux de collisions proton-antiproton dans le SPS.

Vous trouverez des explications sur la production des positons à la page 13

I-2-5 Le LEP

Le LEP est la plus grande machine du CERN et pour un certain temps sans doute le plus grand collisionneur de leptons du monde.

Le LEP correspond au choix fait au cours des années soixante-dix par la communauté Européenne des physiciens regroupés au sein de l'ECFA (Comité Européen pour les Futurs Accélérateurs) : c'est l'instrument qui a été jugé le mieux adapté pour progresser de façon décisive dans la connaissance de la structure de la matière et des forces qui gouvernent l'univers.

Les grandes dimensions du LEP ont donc été dictées par la physique. Elles ont cependant été optimisées compte tenu de plusieurs considérations : d'une part un équilibre devait être trouvé entre le coût de construction (qui augmentait en proportion de la taille de l'anneau) et le coût de l'exploitation du collisionneur, c'est-à-dire de sa consommation en énergie électrique, qui varie, elle, en fonction inverse des dimensions de l'anneau ; comme, d'autre part, il apparaissait très vraisemblable que le LEP serait le dernier tunnel creusé avant longtemps pour la physique en Europe, il fallait qu'il soit assez grand pour se prêter à des développements futurs.

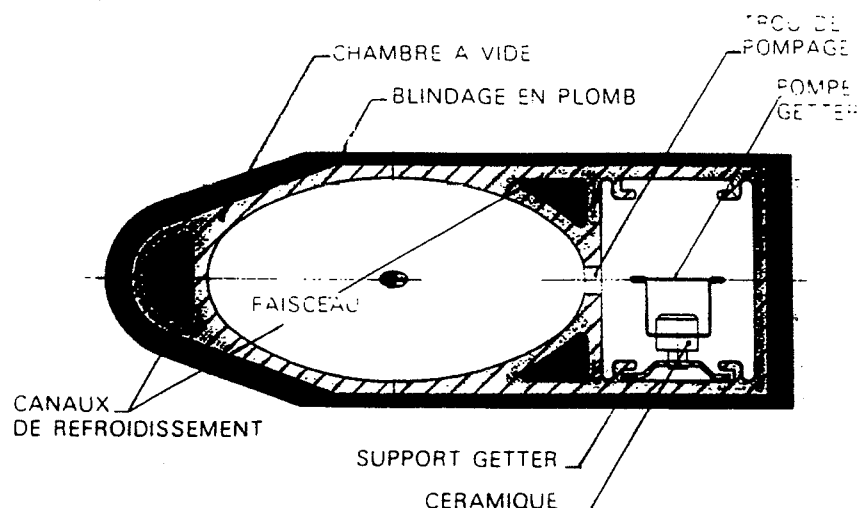
I-2-5-1 Un anneau sous terrain

Les installations techniques de l'accélérateur-collisionneur LEP sont logées dans un tunnel de 27 km de long et 3,8 mètres de section creusé à une profondeur variant de 50 à 170 m, de part et d'autre de la frontière franco-suisse, pour trois quarts dans le pays de Gex et pour un quart dans le canton de Genève.

Le tunnel communique avec la surface en huit points. Là sont implantés les bâtiments de surface qui coiffent les puits d'accès, dix-huit au total, dont la profondeur varie de 51 m à 143 m et le diamètre de 5 m à 23 m. Quatre grandes salles souterraines de 23 m de diamètre et de 70 m de long abritent les grands détecteurs de particules. Des ouvrages annexes, galeries de liaison, 800 m de tunnels auxiliaires pour le système d'accélération et salles techniques, complètent la panoplie d'ouvrages sous-terrains.

I-2-5-2 La machine

Tout au long de cet anneau sont alignés des électro-aimants. Dans l'entrefer de ces aimants est disposée une enceinte à vide, revêtue par un blindage de plomb et refroidie par de l'eau. A l'intérieur de cette enceinte, les électrons circulent dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et les positons en sens inverse.



COUPE DE LA CHAMBRE A VIDE DU LEP

Le circuit n'est pas un cercle parfait : il est constitué de huit parties courbes de 2 800 mètres de long chacune, reliées entre elles par huit sections droites. Dans les parties courbes les particules sont maintenues sur leur trajectoire par 3392 aimants de courbure et leurs faisceaux concentrés par d'autres aimants, à savoir 816 quadripôles et 504 sextupôles. En deux endroits diamétralement opposés dans les sections droites du circuit, juste avant et juste après les halls d'expériences souterrains, les particules traversent des cavités accélératrices haute fréquence où elles sont accélérées à chacun de leurs passages avant d'entrer en collision. Ces collisions sont observées par des détecteurs de grandes dimensions qui font l'objet de perfectionnement incessant de la part des chercheurs et des ingénieurs.

I-2-5-3 Les collisions

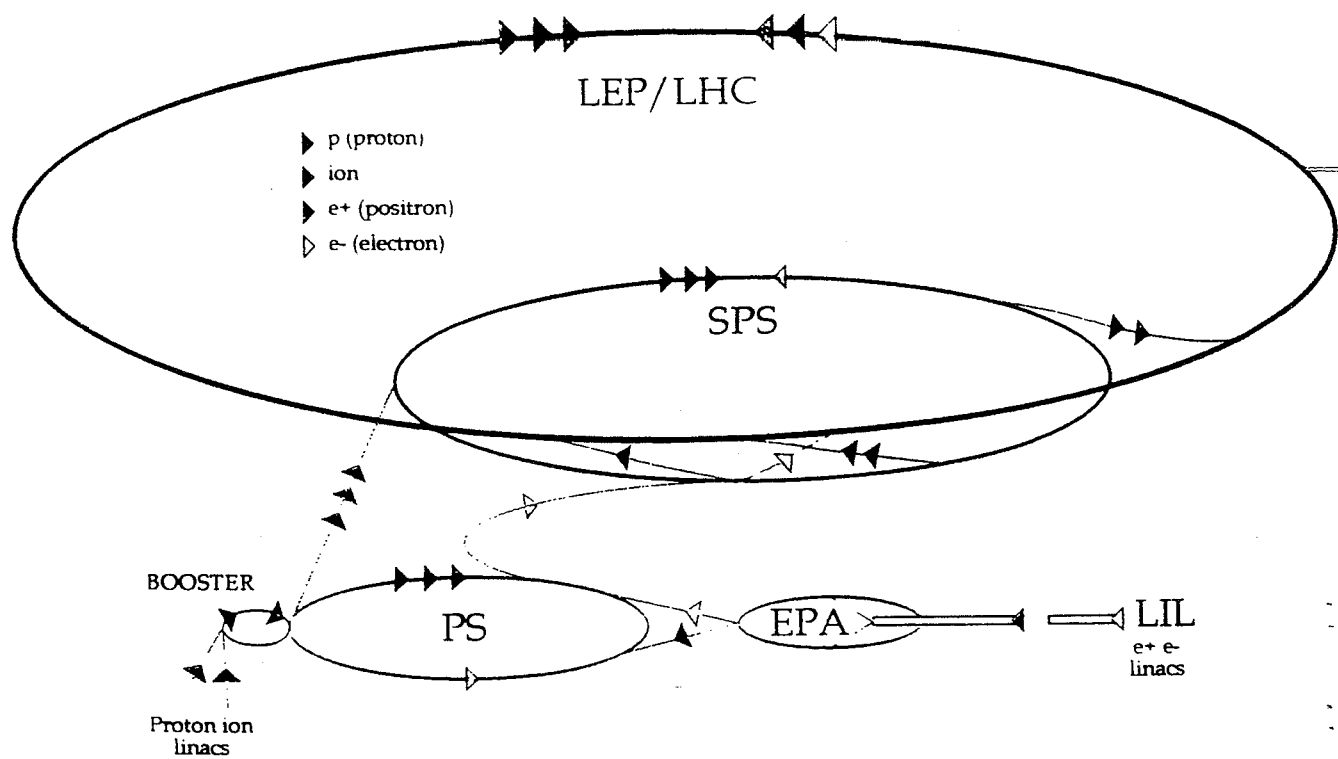
Les projectiles du LEP, électrons et positons, sont accélérés jusqu'à friser la vitesse de la lumière. En vertu de la relativité, leur masse est multipliée par 200 000. A cette vitesse, cependant, les électrons et les positons ont pour particularité d'émettre des ondes qui ont un effet de freinage d'autant plus important que la courbure de leur trajectoire est plus forte. Si, malgré cet inconvénient, on a choisi pour le LEP une trajectoire circulaire, c'est pour multiplier le nombre de rencontres des deux faisceaux circulant en sens inverse et augmenter, par conséquent, la fréquence des collisions : en effet, deux faisceaux opposés en ligne droite, comme c'est le cas du SLAC aux USA, ne permettent qu'une seule rencontre (sans qu'il y ait même nécessairement collision), tandis qu'un parcours circulaire permet un nombre très élevé de passages répétés dans les cavités accélératrices, un nombre très élevé de rencontre des deux faisceaux, et offre donc de bonnes chances de collisions.

I-2-5-4 Les injecteurs du LEP

L'installation d'injection pour le LEP devra envoyer, toutes les douze minutes environ, quelque $5 \cdot 10^{12}$ électrons et positons dans l'anneau principal du LEP.

Le processus est le suivant : dans le LIL (Linear Injection for LEP), un faisceau d'électrons est accéléré dans un accélérateur linéaire jusqu'à une énergie de 200 MeV et envoyé sur une cible. Les positons sont regroupés dans un anneau accumulateur (EPA: Electron Positon Accumulator) et y sont maintenus en orbite jusqu'à ce qu'ils soient assez nombreux pour passer dans le PS, puis dans le SPS, et enfin dans le LEP.

Le PS et le SPS effectuent cette accélération préliminaire pour les électrons et les positons, mais il a fallu modifier ces deux machines pour pouvoir opérer avec ces nouveaux types de particules. Néanmoins, l'utilisation, pour le système d'injection du LEP, des accélérateurs existant déjà au CERN a permis des économies considérables dans la réalisation du projet.



LES INJECTEURS DU LEP

I-2-6 Le projet LHC

Le LEP a été construit pour atteindre des énergies de l'ordre de deux fois 100 GeV, ce qui correspond à des dimensions de l'ordre de 1E^{-18} mètres. Néanmoins, les résultats obtenus grâce à cette machine soulèvent d'autres questions auxquelles le LEP seul ne permettra pas de répondre.

La construction du LHC (Large Hadron Collider) permettrait la réalisation de collisions proton-proton à des énergies pouvant atteindre 15,4 TeV, de sorte qu'il serait possible d'étudier des collisions entre les quarks des protons à une énergie voisine de 1 TeV, ce qui correspond à une échelle de grandeur de 1E^{-19} mètres. On pense trouver là les réponses à certaines des questions les plus fondamentales concernant la structure de la matière.

Grâce à l'infrastructure existante du CERN, on pourrait construire le LHC pour un coût comparable à celui des machines précédentes, et ce très rapidement (l'achèvement de la machine est prévu pour 1999).

La luminosité élevée du LHC permettra d'observer des phénomènes rares, car plus la luminosité est élevée, plus il est enregistré de collisions par unité de temps. Le LHC visera une luminosité encore jamais atteinte dans le monde, soit plus de 1E^{34} cm⁻².s⁻¹.

I-2-6-1 Pourquoi le LHC

Plusieurs raisons expliquent que l'on cherche à atteindre une énergie de l'ordre de 1 TeV. La plus importante concerne peut-être la brisure de la symétrie qui existe entre les forces faible et électromagnétique. Alors que cette symétrie est évidente à des énergies supérieures à quelques centaines de GeV, elle se brise aux énergies beaucoup plus faibles. Ce phénomène se retrouve également dans les masses des médiateurs des deux forces. En effet, alors que la force électromagnétique est véhiculée par le photon sans masse, la force faible l'est par les particules lourdes W et Z.

Le modèle standard (théorie concise sur les particules et leurs interactions résumant les connaissances actuelles sur la structure de la matière) offre une explication de la façon dont la brisure de la symétrie entre les deux forces s'est opérée. Elle est connue sous le nom de mécanisme de Higgs et postule que l'univers est noyé dans un "champ de Higgs" qui donne à chaque particule sa masse unique. Ce champ devrait se manifester par l'existence d'une

particule de Higgs dont la masse devrait se situer quelque part au dessous de 1 TeV.

Le mécanisme de Higgs est le moyen le plus simple d'expliquer la brisure de la symétrie, mais il n'est peut-être pas le bon. Il faudrait donc un autre mécanisme qui pourrait se manifester par de nouveaux effets spectaculaires dans les interactions des particules W et Z à des énergies voisines de 1 TeV. Ces effets pourront être observés dans les débris de collisions proton-proton où des W et des Z seront émis par les quarks très énergétiques. Le LHC permettra d'accéder aux mécanismes qui engendrent les masses des particules.

On a une autre raison, toujours en rapport avec la symétrie, de s'intéresser à une énergie de l'ordre de 1 TeV. Une partie du caractère arbitraire de l'actuel modèle standard s'expliquerait s'il faisait partie d'une symétrie beaucoup plus vaste combinant toutes les particules (quarks et leptons) et trois forces (faible, électromagnétique et forte) dans une "supersymétrie". Cela n'apparaîtrait complètement qu'à de très hautes énergies, mais on pourrait en avoir d'importantes manifestations au voisinage de 1 TeV.

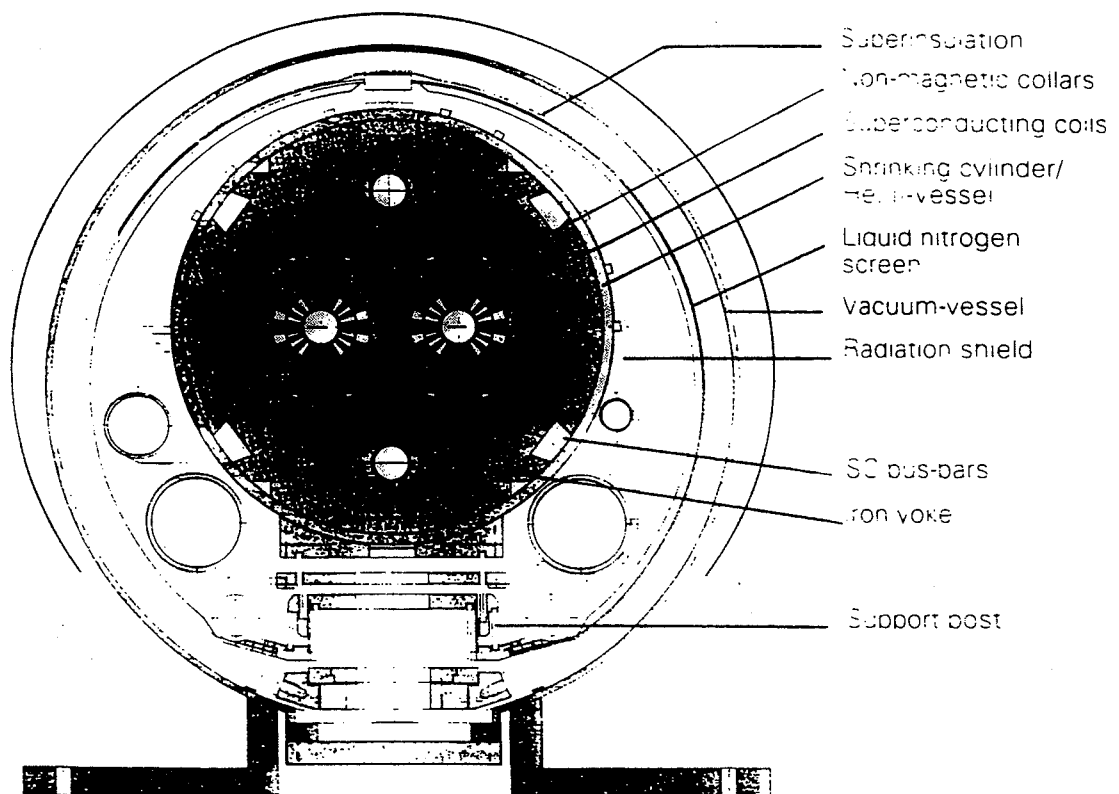
Depuis que le grand collisionneur de hadrons est devenu un élément potentiel des installations du CERN il y a neuf ans, la communauté des physiciens des particules s'est employée à confirmer que les objectifs de physique décrits ci-dessus pourront être atteints avec cette machine et que les techniques d'expérimentation nécessaires pour découvrir cette physique existeront.

Du fait que l'on cherchera à atteindre une luminosité aussi élevée que possible, l'environnement d'expérimentation sera très exigeant dans les régions de collision des faisceaux. Cet environnement sera caractérisé par des fréquences d'événement extrêmement élevées, de faibles rapports signal-bruit de fond, de grandes multiplicités de particules et des doses de radiation élevées. L'instrumentation devra être fortement améliorée. Les systèmes de détection devront être dotés de détecteurs rapides entourant hermétiquement le point de collision et fournissant des mesures précises de l'énergie pour une large gamme d'énergies. Les composants des détecteurs devront pouvoir résister à de fortes doses de radiation (c'est pourquoi, il est nécessaire de mettre au point un dosimètre capable de déterminer la dose absorbée chaque année). La lecture des signaux nécessitera un grand nombre de circuits électroniques, ce qui implique des progrès dans le domaine de la micro-électronique.

Un vaste programme de recherche et développement a été lancé dans tous ces domaines. Un grand nombre de physiciens et d'ingénieurs y travaillent sous la coordination du Comité pour la recherche et le développement sur les détecteurs, et les travaux avancent d'une façon satisfaisante.

I-2-6-2 La machine

Le projet LHC consiste pour l'essentiel dans l'installation à l'intérieur du tunnel existant du LEP d'un système d'aimants supraconducteurs comportant deux tubes pour faisceaux à l'intérieur d'une culasse et d'un cryostat communs. Pour atteindre une énergie combinée de 15,4 TeV dans six des huit régions de collision, un champ élevé de 10 Teslas est nécessaire à l'intérieur des tubes. On utilisera des bobines supraconductrices à la très basse température de 2°K ; elles seront refroidies avec de l'hélium superfluide.



VUE EN COUPE DU LHC

L'installation de la machine à protons dans le tunnel du LEP pourrait aussi permettre de faire entrer en collision un faisceau d'électrons venant du LEP avec un faisceau de protons venant du LHC à une énergie combinée pouvant atteindre 1,7 TeV. Cela permettrait de pousser beaucoup plus loin les recherches avec des collisions électron-proton en dépassant les énergies que le collisionneur HERA du Laboratoire DESY en Allemagne commence à atteindre.

Les plans détaillés du LHC ont été établis à partir de deux paramètres fondamentaux de la machine pour la recherche en physique : l'énergie maximale et la luminosité. Etant donné que la circonférence de la machine est déjà fixée puisque celle-ci doit être installée au dessus de l'anneau du LEP, l'énergie maximale sera fonction du champ maximum produit à l'intérieur des aimants de courbure et de la longueur maximale qui pourra être couverte par ces aimants sur la circonférence.

Les aimants supraconducteurs possèdent des composantes multipolaires dans leur configuration de champ magnétique, ce qui perturbe les faisceaux en circulation. Pour contrebalancer cela, on introduit des champs compensateurs à l'aide d'autres aimants (sextupôle, octupôle et décupôle) insérés dans l'anneau.

Compte tenu du diamètre du tunnel du LEP, il est difficile d'ajouter à l'anneau existant du LEP deux anneaux d'aimants séparés pour le LHC. Une solution consiste à guider les deux faisceaux de protons dans des tubes différents à l'intérieur d'un aimant unique renfermé dans un seul cryostat. La configuration des bobines supraconductrices des aimants permet d'obtenir dans les tubes des champs égaux dans des directions opposées, de sorte qu'il est possible de prendre en charge des faisceaux circulant dans des sens contraires. Le cryostat renferme une seule culasse et une seule structure de rétention des forces. Cette technique dite "deux dans un" permet d'obtenir le champ le plus élevé possible dans l'espace limité disponible au dessus de l'anneau du LEP, pour un coût inférieur d'environ 30% à celui d'une machine à deux anneaux.

En dehors des aimants et de la cryogénie, la plupart des éléments requis pour le LHC sont classiques. Beaucoup existent déjà : c'est le cas du système de distribution électrique, des stations de refroidissement (construites pour le système d'accélération radiofréquence supraconducteur du LEP), du réseau informatique, des installations de télécommunication, de la ventilation, etc...Il s'agit là d'atouts considérables qui permettront de réduire le coût du LHC, tant en matériel qu'en personnel.

Un autre ensemble existant très important est le système d'injection composé de l'accélérateur linéaire, du synchrotron injecteur (Booster), du synchrotron à protons et du super synchrotron à protons. Cet ensemble pourra fournir des faisceaux de protons suffisants en quantité et en qualité pour permettre d'atteindre la luminosité du LHC dans les collisions proton-proton. Pour les collisions protons-électrons, on pourra aisément dévier un faisceau du

LEP et le faire passer dans une région de collision du LHC au dessus de l'anneau du LEP. Quant aux collisions ion-ion, la seule grosse installation supplémentaire qu'elles exigeront est un injecteur d'ions plomb.

Le programme de construction du LHC devrait être approuvé par le conseil en 1992.

I-2-7 Un collisionneur linéaire

L'énergie de rayonnement synchrotron émis par les faisceaux d'électrons et de positons suivant des trajectoires incurvées augmente de façon spectaculaire quand l'énergie des faisceaux de particules croît. Pour cette raison, le LEP est presque inévitablement voué à être le dernier collisionneur circulaire électron-positon. Dans l'avenir les recherches à de plus hautes énergies avec des collisions de faisceaux devront suivre une autre voie ; une technique s'impose, celle qui consiste à faire entrer en collision frontale des faisceaux provenant de deux accélérateurs linéaires.

Bien que le concept de base paraîsse simple, les difficultés liées à la construction de machines linéaires de très haute énergie, d'une taille et d'un coût acceptables sont considérables. Pour l'avenir à long terme, le CERN étudie, en collaboration avec d'autres laboratoires, un collisionneur linéaire électron-positon de 2 TeV appelé CLIC (Collisionneur Linéaire du CERN).

Ce projet se caractérise par la présence d'un faisceau d'entraînement de forte intensité produisant la puissance micro-onde maximale requise (dans la gamme du térawatt) pour accélérer les faisceaux d'électrons et de positons. Le projet a considérablement progressé en 1990 avec le début de la construction d'une installation expérimentale destinée à démontrer la faisabilité du concept de base du CLIC. Une première section de cette installation a été mise en service en Novembre 1990.

De nombreuses années s'écouleront avant que l'on puisse construire des collisionneurs linéaires de haute énergie, mais on s'attaque déjà, dans le cadre du programme de recherche et développement, aux problèmes technologiques liés à une telle entreprise. Une meilleure maîtrise de ces technologies aura très probablement des répercussions dans d'autres domaines.

I-3 LES EXPERIENCES

Les systèmes de détection servent à déterminer les caractéristiques des particules intervenant dans les collisions. Ils fournissent des informations sur les sens de déplacement des particules, sur l'instant de leur passage et dans certains cas, ils permettent de les identifier.

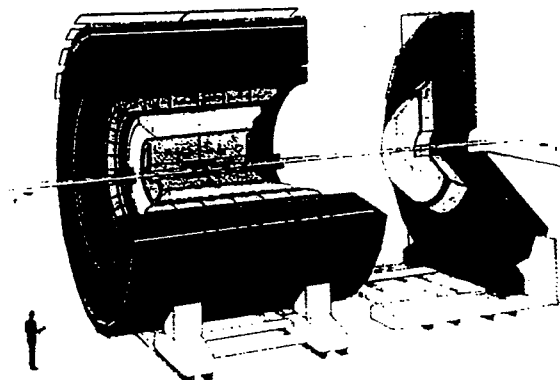
Il existe de nombreux types de détecteurs, mais presque tous se fondent sur les phénomènes d'ionisation. On distingue :

- Les détecteurs électroniques qui mettent à profit la perturbation électrique causée par l'ionisation pour recueillir des signaux électroniques qui renseignent sur l'instant ou le lieu de passage d'une particule.
- Les calorimètres qui déterminent l'énergie de la particule.
- Les chambres à bulles qui utilisent la faible quantité de chaleur due à l'ionisation pour produire dans un liquide des alignements de bulles le long des trajectoires des particules. Elles ne sont maintenant presque plus utilisées.

Situé au point le plus bas de l'anneau incliné du LEP, DELPHI peut mesurer toutes les caractéristiques physiques des leptons et des photons produits dans les collisions LEP ; il peut également identifier les particules plus lourdes, les hadrons, et étudier en profondeur les détails de la production et de la désintégration de la particule Z^0 .

Parmi les éléments principaux de DELPHI, on peut citer un élément à solénoïde supraconducteur équipé d'un cryostat de 5,2 mètres de diamètre interne. Au cœur du détecteur, il y a une chambre à projection tridimensionnelle pour la localisation des traces et la détermination précise des quantités de mouvement de toutes les particules chargées produites ; les compteurs RICH (compteurs Cherenkov à focalisation annulaire) installés autour de cette chambre identifient les divers types de particules produites. Une chambre à projection à haute densité sera utilisée pour la calorimétrie électromagnétique. Tous ces détecteurs sont montés à l'intérieur de la bobine supraconductrice. A l'extérieur de celle-ci, se trouve le calorimètre de hadrons et le détecteur de muons.

DELPHI



II QUELQUES BASES THEORIQUES

II-1 LES DIFFERENTS MODES DE RAYONNEMENT

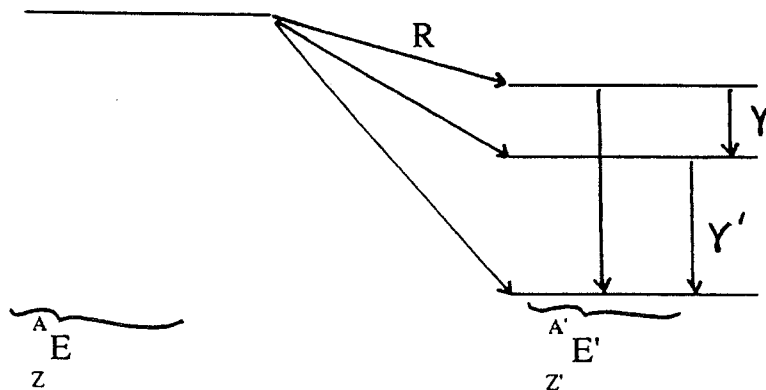
Il existe différents types de rayonnements ionisants :

- le rayonnement électromagnétique (photons), tel que les rayons X et gamma
- Le rayonnement corpusculaire, comme les rayons alpha et bêta (électrons, positons), les protons, les neutrons, et d'autres particules qui peuvent provoquer une ionisation.

La formation d'ions se fait directement ou indirectement suivant le type du rayonnement primaire.

Outre les particules intervenant dans la structure stable de la matière (protons, neutrons, électrons), des entités telles que le photon, le positon, le neutrino, ...etc participent, sous forme de radiations, aux processus nucléaires, et en particulier à la désintégration radioactive, qui est liée à la stabilité du noyau, fonction du rapport entre le nombre de protons et celui de neutrons.

Au cours d'une désintégration radioactive, l'énergie totale du système est conservée. Le niveau d'énergie du noyau sortant sera inférieur à celui du noyau de départ. On représente en général le mécanisme à l'aide du schéma suivant :



avec ${}^A_Z E$: noyau instable

E : symbole de l'élément
 A : nombre de masse
 Z : numéro atomique

${}_{Z'}^{A'}\text{E}'$: noyau résultant de la désintégration

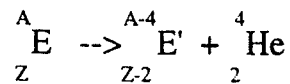
R : radiation émise au cours du processus

γ : rayonnement gamma

On notera que E et Z sont liés et par conséquent, Z est souvent omis.

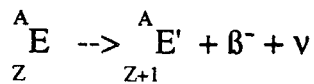
Les divers niveaux du noyau sortant correspondent à des états excités qui, en général, se désexcitent par rayonnement gamma.

Au cours de la désintégration α , le noyau instable émet un noyau de ${}^4\text{He}$ (particule α) :



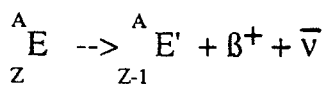
La désintégration α concerne principalement les noyaux lourds.

Au cours de la désintégration β^- , le noyau instable émet un électron et un neutrino de masse et de charge nulles. Le noyau-fils possède le même nombre de nucléons ; un neutron s'est transformé en proton à l'intérieur du noyau :



La désintégration β^- concerne les noyaux dont le nombre de protons est relativement élevé.

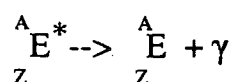
Au cours de la désintégration β^+ , le noyau instable émet un positon et un antineutrino. Le noyau-fils possède le même nombre de nucléons ; un proton s'est transformé en neutron à l'intérieur du noyau :



La désintégration β^+ concerne les noyaux dont le nombre de protons est relativement élevé.

Le rayonnement électromagnétique n'est autre qu'une onde électromagnétique constituée de particules de masse nulle et de vitesse égale à la lumière. Une telle onde est caractérisée par l'énergie qu'elle transporte.

Le rayonnement gamma est un rayonnement électromagnétique dont l'émission est liée à la désexcitation du noyau fils.



En général, cette émission est instantanée. L'énergie du rayonnement correspond à la différence d'énergie entre les niveaux du noyau-fils.

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques produites lors du rééquilibrage du cortège électronique : celui-ci a lieu après qu'un électron des couches profondes ait été éloigné, ou lors du freinage de particules chargées rapides dans la matière. A énergie égale, ils ne se distinguent du rayonnement γ que par leur origine, celle des γ étant la désexcitation du noyau.

Le rayonnement synchrotron est un rayonnement électromagnétique produit lors de l'accélération (normale ou tangentielle) de particules chargées légères. Dans le cas d'un accélérateur d'électrons comme le LEP, ce rayonnement, comparable au rayonnement de freinage, est émis lors de la déviation des particules.

II-2 LES MECANISMES D'INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

II-2-1 les photons

Les photons ne sont pas directement ionisants ; ce sont les électrons résultant de l'interaction primaire qui ionisent la matière. Un photon incident donne lieu à plusieurs électrons.

- *effet photoélectrique* :

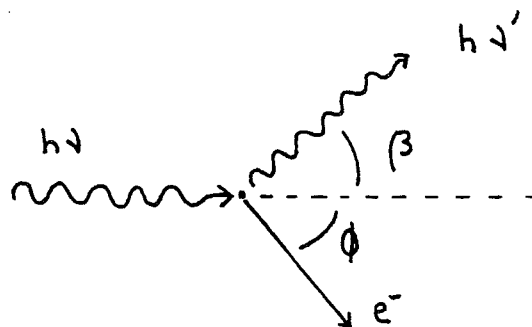
Le photon disparaît en libérant un photoélectron d'énergie

$$E_e = h\nu - E_l$$

où E_l désigne l'énergie de la couche considérée.

- *effet Compton* :

Ici, le photon interagit avec des électrons périphériques considérés comme libres et leur cède une partie de son énergie. L'énergie du photon diffusé, celle de l'électron Compton, et les angles d'émission et de diffusion par rapport au photon incident sont reliés par les lois de conservation de l'énergie totale et de la quantité de mouvement :



$$\tan\phi = \sin\beta / (1+\alpha)(1-\cos\beta) \text{ avec } \alpha = h\nu / m_0c^2$$

- *création de paires électron-positon (ou matérialisation):*

Il s'agit de la transformation d'un photon en une paire électron-positon, émis en sens opposés. L'énergie de chacun est égale à la moitié de la différence entre l'énergie du photon et l'énergie de matérialisation (1.022 MeV).

II-2-2 Les particules chargées

Contrairement aux photons qui subissent peu d'interactions pour céder leur énergie, les particules chargées ont une interaction continue avec les champs coulombiens des électrons et des noyaux.

- *les électrons :*

Les électrons subissent la répulsion coulombienne des électrons des diverses couches atomiques.

Lors de son passage au voisinage du noyau, l'électron subit l'attraction du champ coulombien et est dévié.

Les électrons peuvent également émettre des photons X dont l'origine provient de la déviation ou du ralentissement dans le champ du noyau, encore appelé *Bremstrahlung*.

Le dernier mécanisme à considérer est la collision élastique avec le noyau aboutissant à un déplacement de l'atome heurté.

- *les protons :*

Les protons subissent qualitativement les mêmes processus d'interaction que les électrons, mais leur masse, 1836 fois plus élevée, en modifie l'aspect quantitatif : ils sont moins déviés que les électrons et peuvent créer beaucoup plus de déplacement.

II-2-3 Les neutrons

Ils ont une appellation qui dépend de leur énergie. On distingue en particulier :

- les neutrons thermiques ($E < 1 \text{ eV}$)
- les neutrons lents ($E < 1 \text{ keV}$)
- les neutrons intermédiaires ($1 \text{ keV} < E < 1 \text{ MeV}$)
- les neutrons rapides ($0.5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$)
- les neutrons très rapides ($E > 10 \text{ MeV}$)

Les neutrons ne sont pas non plus directement ionisants : ils n'interagissent qu'avec le noyau et ont donc une grande distance de pénétration. Ils produisent l'ionisation des matériaux légers par l'intermédiaire du noyau de recul résultant du choc direct avec les noyaux légers (en particulier l'Hydrogène dans l'eau, les plastiques et les tissus vivants). Dans les matériaux à haut Z, deux mécanismes principaux sont à considérer :

- la capture :

Lors de l'absorption d'un neutron par un noyau, un noyau composé dans un état excité est formé. Le retour à l'état stable se fait par émission de particules ou fission.

- la diffusion par le noyau :

Le neutron cède une partie de son énergie au noyau.

Pour une diffusion élastique, la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique permet de relier angles et énergie du noyau et du neutron.

Pour la diffusion inélastique, il n'y a plus conservation de l'énergie cinétique, on peut considérer que les événements suivants se produisent séquentiellement : neutron absorbé --> noyau composé --> émission de n' --> noyau dans un état excité --> émission d'un photon.

II-2-4 Les unités

La grandeur qui caractérise l'action de la radiation sur la matière est la dose absorbée D. Elle est, par définition, le quotient de l'énergie déposée E dans un petit volume de matière par la masse m contenue dans ce volume :

$$D = \delta E / \delta m$$

L'ancienne unité de la dose absorbée est le rad (1 rad est équivalent à 100 ergs/g dans la substance irradiée, 1 erg valant 10^{-7} Joules). La nouvelle unité est le gray (1 Gy est équivalent à 1 J/kg soit 100 rads).

Mais la dose absorbée n'est pas à même de rendre compte des effets biologiques de l'irradiation. C'est pour cette raison qu'on a défini l'équivalent de dose H, comme le produit de la dose absorbée par le facteur de qualité Q de la radiation :

$$H = D * Q$$

L'unité de l'équivalent de dose est le Sievert (Sv), obtenu en exprimant la dose absorbée en Gray. L'ancienne unité est le rem, obtenu en exprimant la dose absorbée en rad (1 rem équivaut à 0.01 Sv).

La conséquence de ces interactions des rayonnements avec la matière est la dégradation des matériaux, celle-ci permettant d'autre part d'être utilisée en dosimétrie.

II-3 LA DOSIMETRIE

Comme nous l'avons vu plus haut, il est important de connaître les doses absorbées par un matériau afin de pouvoir évaluer sa dégradation et savoir pendant quelle durée il peut être utilisé avant d'être remplacé. Tel est le but de la dosimétrie.

D'après l'IAEA (Agence Internationale pour l'Energie Atomique), la dosimétrie est " la mesure des quantités de radiation, notamment la dose absorbée et le débit de dose absorbée ". Il s'agit en effet de mesurer la variation d'une caractéristique du dosimètre, celle-ci évoluant en fonction de la dose. L'idéal est que cette variation soit proportionnelle à la dose absorbée, stable dans le temps et indépendante d'autres paramètres.

La dosimétrie est basée sur différentes méthodes :

- des méthodes purement physiques
 - * calorimétrie
 - * chambres d'ionisation
 - * semi-conducteurs ou chambres d'ionisation solides
- des méthodes physico-chimiques
 - * chimie aqueuse et chimie organique pour les liquides
 - * absorption optique, luminescence, ESR (électron spin résonance) pour les solides
 - * radiolyse des gaz

Bien sûr, certains problèmes se posent et notamment ceux de l'influence de facteurs extérieurs tels que :

- la température
- l'humidité
- la teneur en oxygène
- la lumière
- le débit de dose
- les facteurs géométriques

Au CERN, le service de dosimétrie suit l'évolution des doses dans les composants des machines, donne son avis sur les dommages causés par les radiations et conseille sur les moyens de prévention.

Nous utilisons les dosimètres suivants :

- *RPLD (radiophotoluminescent dosimeter)*

Cette technique est basée sur la création par les radiations de centres de couleur stables. Excités par une fréquence appropriée, ils agissent comme des centres luminescents.

L'intensité de la fluorescence est fonction de la dose absorbée.

Le matériau le plus souvent utilisé comme élément sensible est le verre d'aluminophosphate d'argent ; le fluorure de lithium possède également des propriétés radiophotoluminescentes.

Les avantages de ces dosimètres sont leur large plage de lecture (10^{-1} à 10^6 Gy), leur petite taille (6 mm de long et 1 mm de diamètre) et peuvent être réutilisés.

- Dosimètre à pression d'Hydrogène

Ce dosimètre consiste en une capsule de verre d'environ 65 mm de long et 12 mm de diamètre dans laquelle est scellé 0.25 g d'un film de polyéthylène sous vide.

Sous l'effet des radiations, celui-ci dégage de l'hydrogène et la pression de gaz dans la capsule est fonction de la dose totale absorbée.

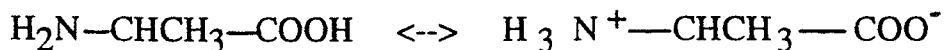
Ces dosimètres sont avantageux parce qu'ils sont peu coûteux et possèdent une haute plage d'utilisation (10^4 à 10^7 Gy)

- Alanine

L'alanine est un acide α -aminé de formule chimique

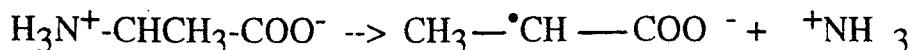


Un amino-acide se trouve de façon habituelle et prépondérante sous la forme d'un ion dipolaire résultant d'un transfert de H entre les deux fonctions :



Par suite de cette configuration dipolaire de la molécule, les acides aminés se trouvent sous forme cristalline ; ils ont un point de fusion élevé et sont solubles dans l'eau.

Par rupture des molécules d'alanine, les radiations créent des radicaux chimiques stables, correspondant à la molécule ayant perdu sa fonction amine (en fait, son groupement $^+\text{NH}_3$) :



Les radicaux sont porteurs d'un électron célibataire. Le nombre de ces électrons ainsi créés est linéairement proportionnel à la dose absorbée sur une large plage.

La dose peut alors être déterminée par la technique de résonance paramagnétique électronique (spectrométrie RPE), ou électron spin résonance (ESR).

Un appareillage de lecture sophistiqué permet une grande précision de la mesure. La plage de mesure se situe entre 1 Gy et 0.5 MGy

Le dosimètre se présente sous forme d'un cylindre de 30 mm de long et de 5 mm de diamètre. Il peut également être utilisé sous forme de câble sur différentes longueurs ou être introduit dans un aimant pour connaître par exemple la distribution de la dose.

Ainsi, "Elcugray" (c'est la marque déposée du câble) a été développé conjointement par notre service et l'industrie.

II-4 LES EFFETS DES RADIATIONS SUR LES COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS AU SILICIUM

Les dommages causés par les radiations sur les matériaux semi-conducteurs sont basés sur deux phénomènes principaux :

- le déplacement d'atomes (effet non ionisant)
- l'ionisation

Les phénomènes d'interaction ne sont pas les mêmes pour les différents types de radiations : nous distinguerons les neutrons, les rayonnements électromagnétiques, et les particules lourdes chargées.

II-4-1 Les neutrons

Lors d'une collision nucléaire, un neutron libère un ou plusieurs atomes de recul très énergétiques qui vont ioniser ou exciter le cortège électronique du Silicium et induire des collisions élastiques et inélastiques avec les autres atomes de Silicium.

Les résultats expérimentaux montrent que des zones de défauts (pouvant mettre en cause de l'ordre de 100 à 1000 atomes du réseau de Silicium) sont créées, celles-ci se comportant comme des centres accepteurs.

Pour un matériau initial de type N, ces zones piègent les porteurs majoritaires (il y aura donc réduction de la concentration en porteurs majoritaires) et créent des centres de recombinaison pour les porteurs minoritaires (d'où la diminution de leur durée de vie).

Puisque la densité de porteurs majoritaires diminue, on remarque que l'irradiation aux neutrons a pour conséquence de faire évoluer le matériau semi-conducteur vers un comportement intrinsèque.

Pour une irradiation suffisamment importante, le matériau se comportera comme s'il avait changé de type ; en effet, les minoritaires deviennent majoritaires et les majoritaires minoritaires.

On peut donc représenter ces effets par les relations suivantes :

- durée de vie

$$1/\tau = 1/\tau_0 + \phi/K1$$

τ durée de vie après irradiation

τ_0 durée de vie initiale

ϕ fluence en $n\text{ cm}^{-2}$

- densité de porteurs

$$N = N_0 \cdot \exp(-c\phi) - \beta\phi$$

N densité de porteurs après irradiation

N_0 densité de porteurs initiaux

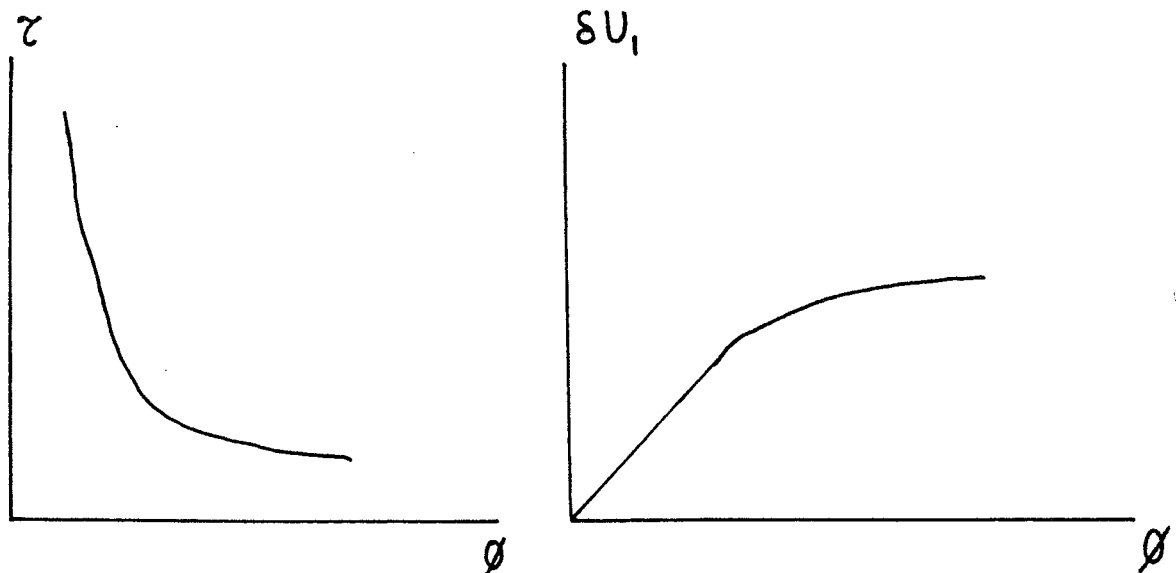
On remarque également les effets des neutrons sur la résistivité du silicium :

$$R = R_0 \exp(\phi/K_2)$$

Voyons ce qui se passe dans le cas d'une diode PIN de basse résistivité pour de hautes injections :

Dans ce cas, la variation de la résistivité ne joue pas.

Ainsi, si on applique un courant direct (>20 mA pour forte injection) la tension U aux bornes de la diode étant une fonction de $\tau = f(\phi)$, on aura $\delta U = g(\phi)$, où δU est la variation de la tension entre le moment où la diode a été irradiée et celui où elle ne l'était pas ; τ est la durée de vie des porteurs minoritaires.

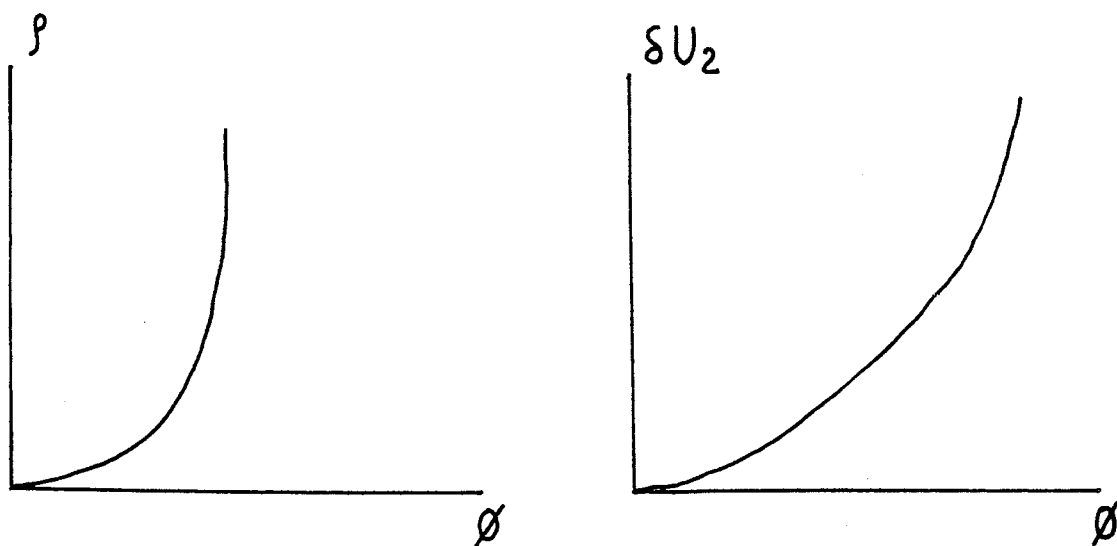


On observe donc une partie linéaire très intéressante pour la dosimétrie.

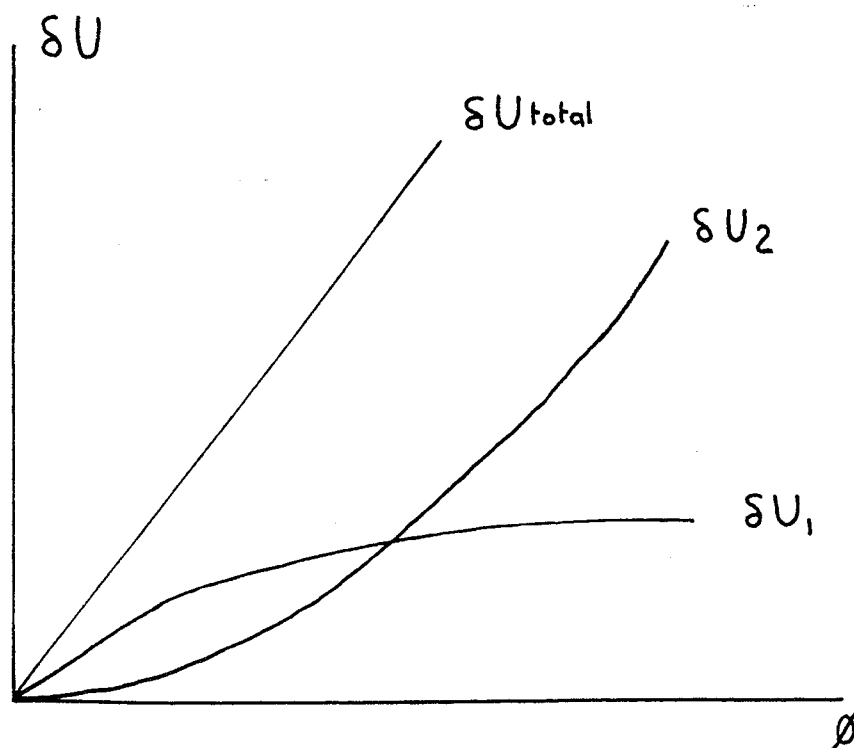
D'autre part, $\delta U = h(W/L_d) \cdot W^2$ pour les hautes injections donc en changeant W , on pourra jouer sur la sensibilité de la diode. W est la longueur de la diode et L_d est la longueur de diffusion des porteurs.

Mais comment faire pour avoir une courbe linéaire sur une plus large plage?

Si l'on est dans le cas d'injections intermédiaires et d'une haute résistivité du silicium, la loi de la variation de la résistivité est à prendre en compte. Or, la tension est fonction de la résistivité et si l'on ne prend en compte que cette dernière, on a :



Comme la durée de vie intervient toujours, on obtient donc tout compte fait :



On observe donc une linéarité bien plus intéressante pour le sujet qui nous préoccupe ici.

II-4-2 Les rayonnements électromagnétiques (photons et électrons)

Il est important de noter que l'on peut traiter le cas des photons et des électrons de la même façon dans la mesure où ils font intervenir des phénomènes étroitement liés. On les nommera donc par la suite "rayonnements électromagnétiques" bien que le terme ne soit pas tout à fait exact.

Les rayons X et γ interagissent avec la structure électronique des atomes de silicium par l'effet photoélectrique, l'effet Compton, et la production de paires électron-positon. Tous trois sont des processus d'ionisation.

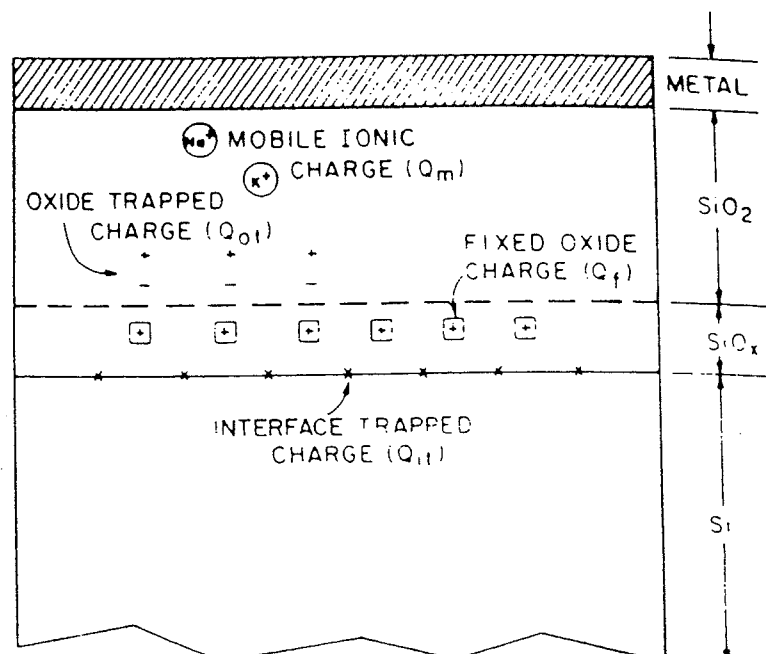
Par ailleurs, les électrons agissent sur le matériau de Silicium par ionisation et rayonnement de freinage.

En fait, dans les semi-conducteurs, la majorité des effets des rayonnements électromagnétiques est relative à la création de paires électron-trou dans l'oxyde de silicium. Dans le silicium, 3.6 eV sont nécessaires pour créer une paire électron-trou, dans l'oxyde de silicium 18 eV. Un phénomène également très important est le comportement des états d'interface.

Etudions tout d'abord le cas d'une capacité MOS (Metal Oxyde Silicium).

Il est essentiel de connaître les différents types de charges existants dans celle-ci afin de comprendre par la suite les effets des rayonnements électromagnétiques sur une capacité MOS.

Le schéma ci-dessous en donne la liste :



- Les charges ioniques mobiles (Q_m)

Ces charges se trouvent dans l'oxyde lors de la croissance de celui-ci.

- Les charges fixes (Q_f)

Ces charges sont fixées dans l'oxyde et ne sont pas influencées si on applique un champ magnétique. Elles sont localisées à une distance d'environ 30 Å par rapport à l'interface Si-SiO₂. Leur densité ne dépend ni de l'épaisseur d'oxyde, ni du type de silicium, ni de la concentration en impuretés de celui-ci. Elles sont en général positives et dépendent de l'orientation du silicium et des conditions de croissances de l'oxyde.

Elles seraient dues à la présence de silicium trivalent ou à la perte d'un électron par l'oxygène.

- Les charges piégées par l'oxyde (Q_{ot})

Ces charges sont associées aux défauts dans l'oxyde de silicium. Elles sont généralement électriquement neutres et se chargent lorsqu'il y a création de paires électron-trou dans l'oxyde.

- Les états d'interface (Q_{it})

Ils sont dus à l'interruption du réseau cristallin du silicium (liaisons contraintes ou brisées). On peut représenter ces "états" comme des "sites" que des électrons ou bien des trous peuvent remplir, de manière réversible selon l'état thermodynamique du silicium. Ces sites sont donneurs s'ils peuvent devenir positifs en donnant un électron, ou accepteurs s'ils peuvent devenir négatifs en acceptant un électron.

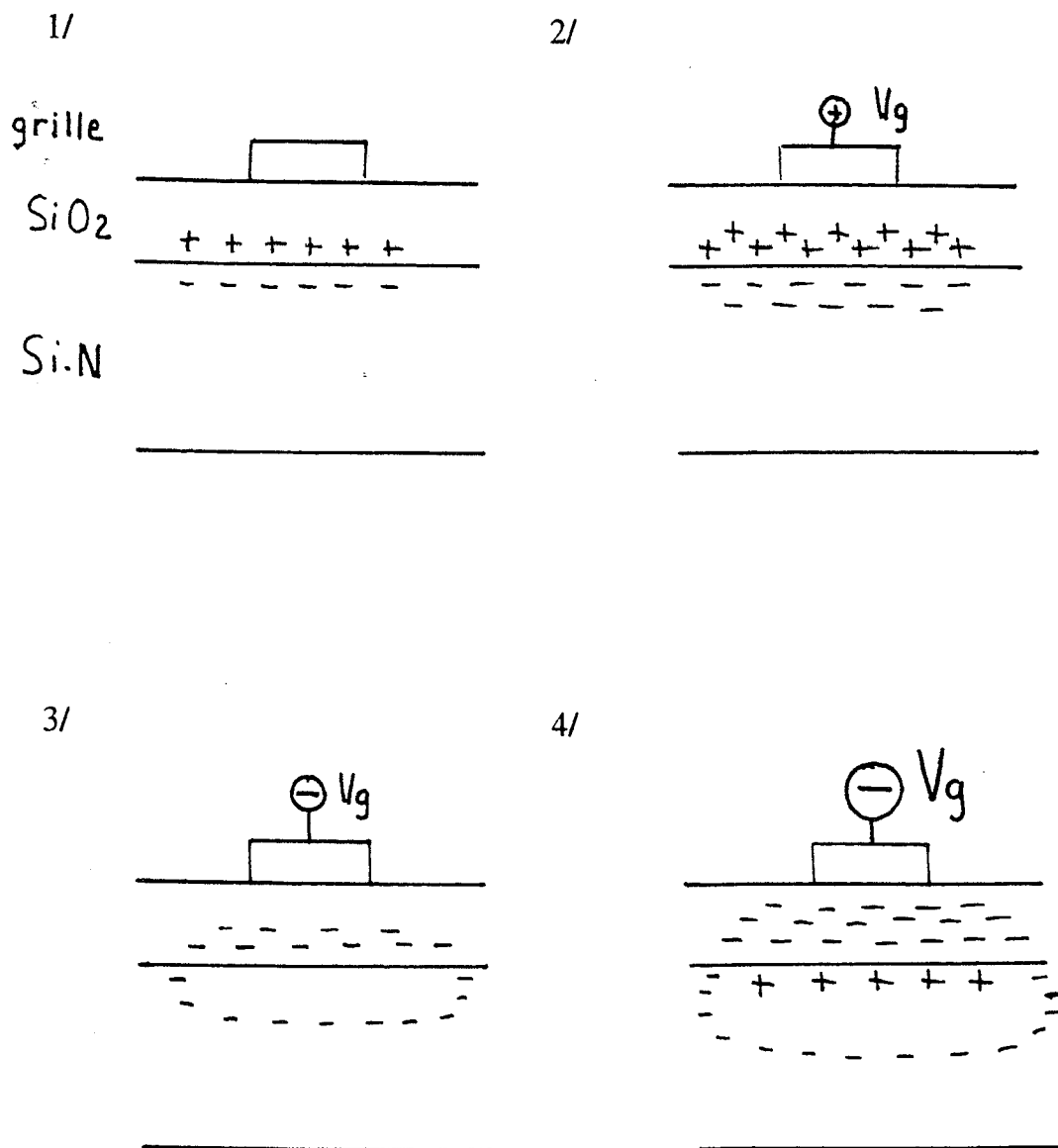
A-1 Voyons ce qui se passe alors dans une capacité MOS dont le silicium est de type N en ne prenant en compte que la création de paires électron-trou due à l'irradiation en γ ou en électrons et en négligeant les états d'interface :

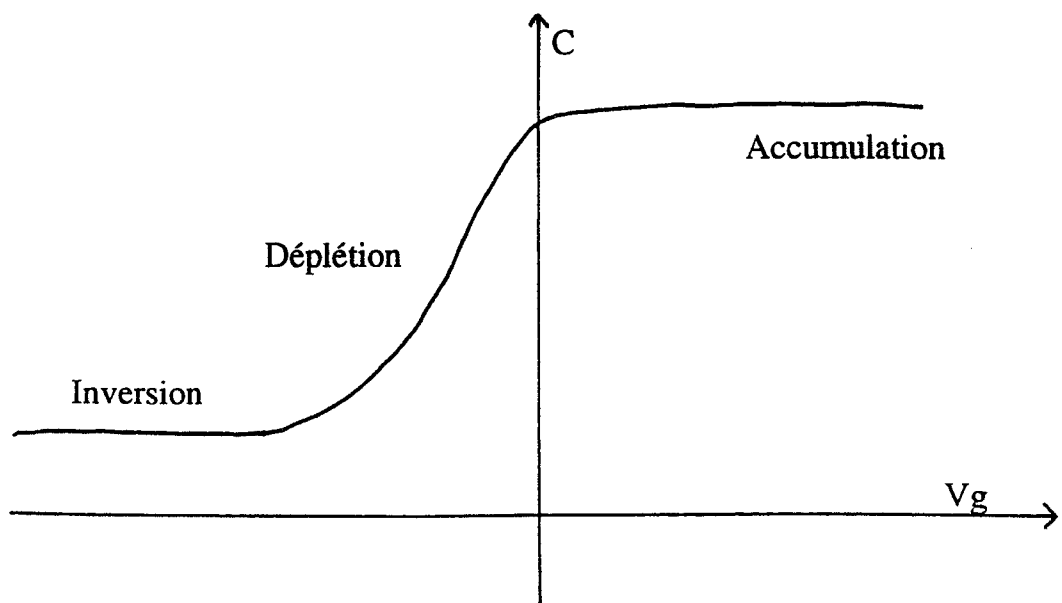
1/ Dans l'oxyde de silicium, les électrons, plus mobiles que les trous, sont évacués par agitation thermique vers les armatures tandis que les trous sont piégés à l'interface Si-SiO₂ (Q_{ot}) et les électrons libres du silicium sont attirés vers l'interface pour l'équilibre électrostatique.

2/ Lorsque la tension de grille est positive, on observe un équilibre entre les charges et la capacité est donc très élevée. C'est l'état d'accumulation.

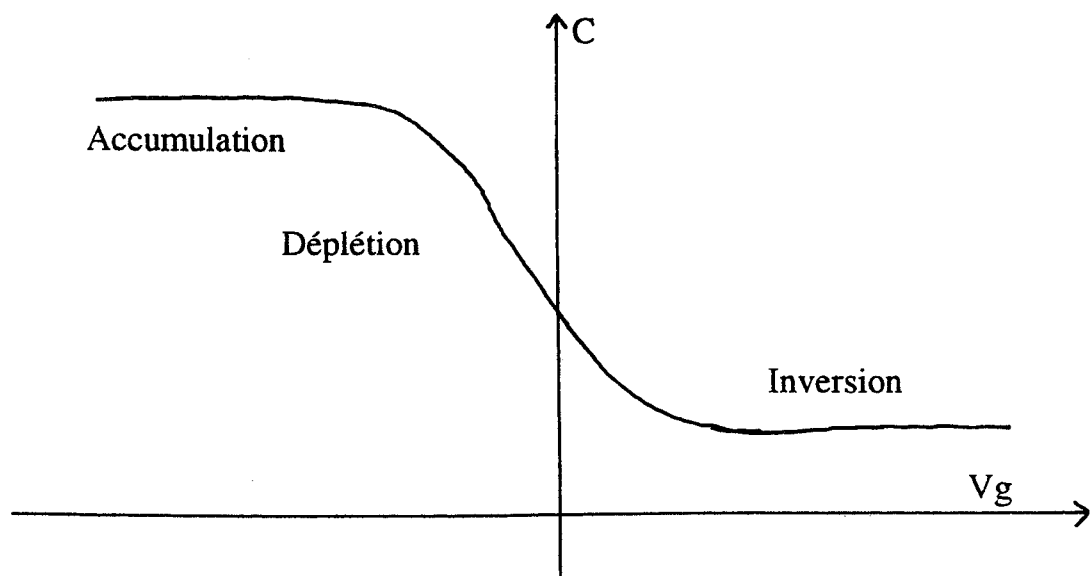
3/ Quand la tension décroît et commence à être négative, des charges négatives font apparaître des charges positives à l'interface Si-SiO₂ qui repoussent les charges négatives du silicium, ce qui crée une zone de déplétion et fait diminuer la capacité. C'est l'état de déplétion

4/ Pour des tensions de plus en plus négatives, la zone de déplétion s'élargit jusqu'au moment où la tension est suffisamment négative pour attirer des porteurs minoritaires du silicium vers l'interface. C'est l'état d'inversion.

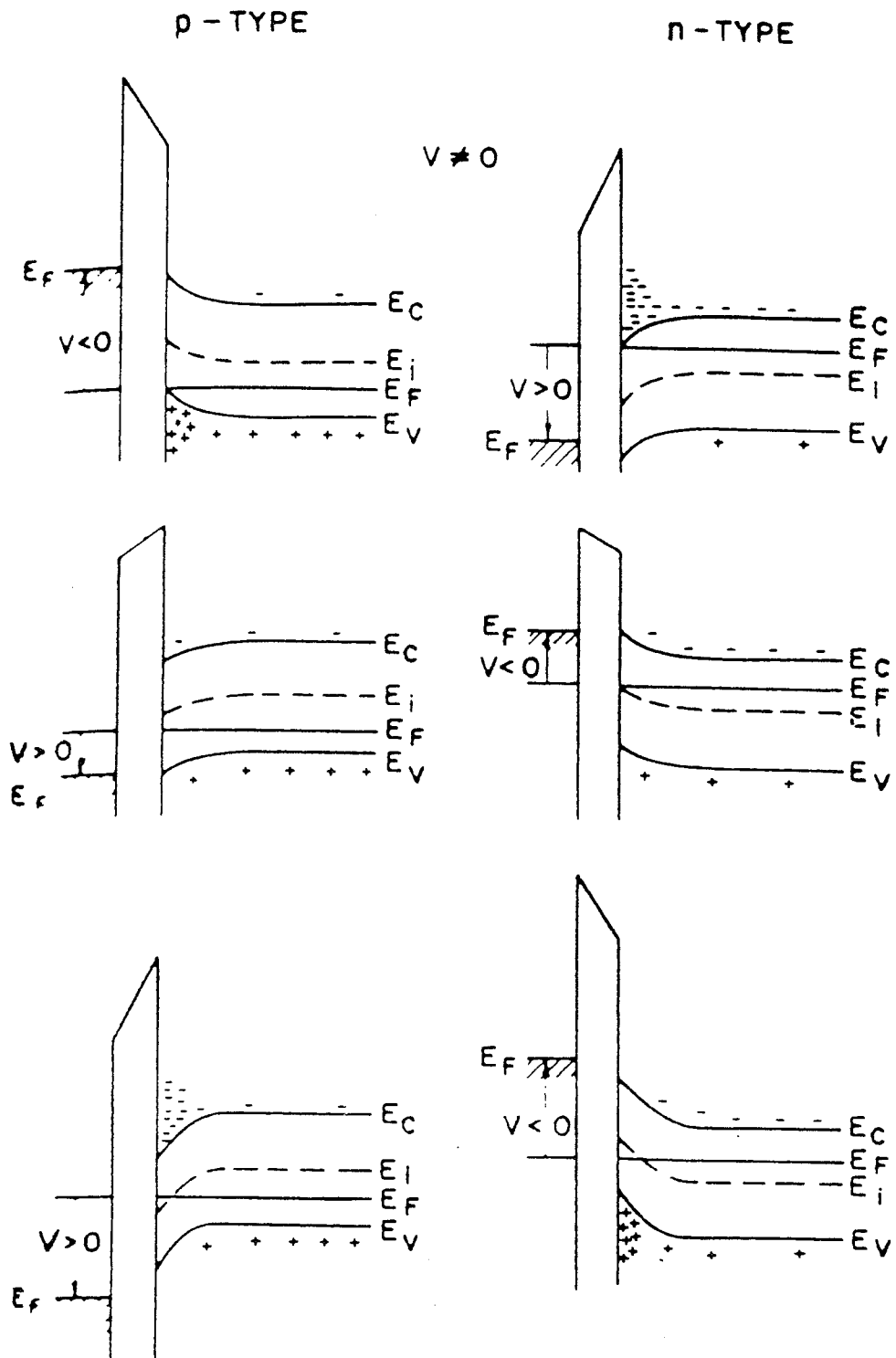




On comprend aisément ce qui se passe si le silicium est de type P et l'on obtient la courbe suivante :



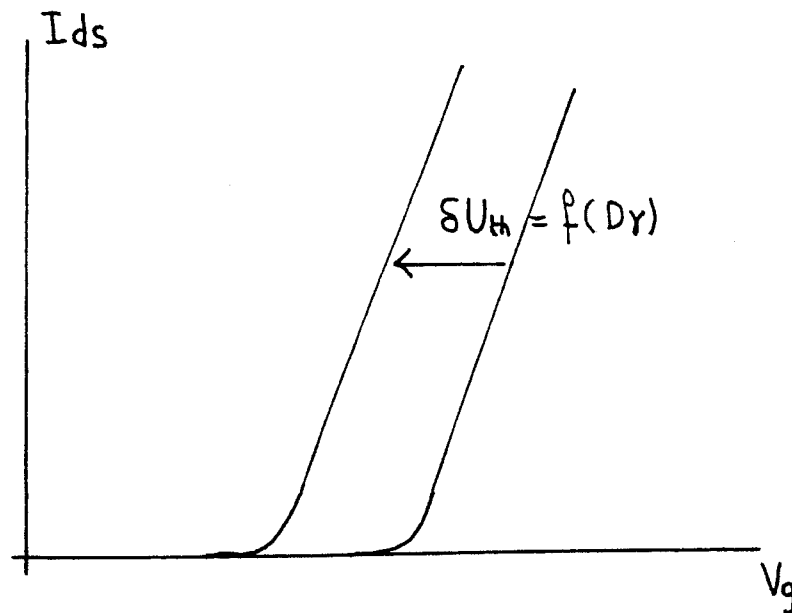
Voici donc les schémas de bandes dans les deux cas :



On remarque donc que plus le rayonnement électromagnétique est important, plus il y aura de paires électron-trou, et donc plus l'oxyde de silicium sera chargé positivement. Il faudra donc appliquer une tension plus négative pour pouvoir obtenir la même capacité. On observera donc un décalage des courbes C-V ci-dessus vers la gauche.

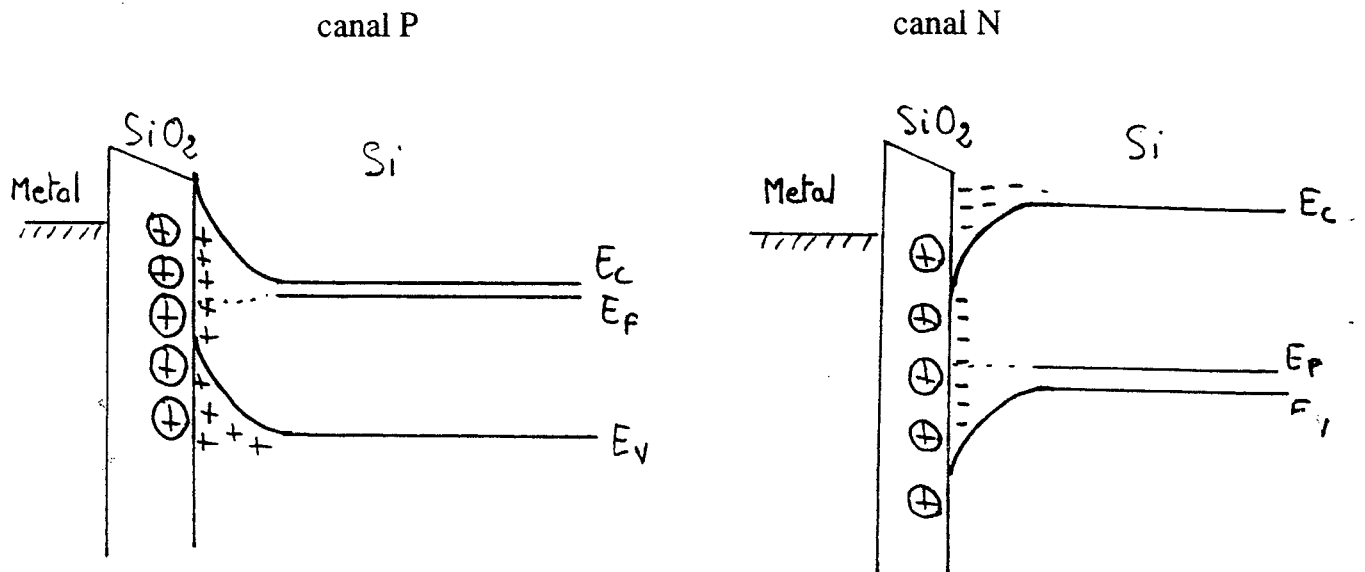
A-2 Pour un transistor MOS, le phénomène physique est exactement le même et se déroule à l'interface Si-SiO₂ dans le canal.

Comme le courant I_{ds} est fonction des porteurs de charge dans le canal, on aura une courbe $I_{ds} = f(V_g)$ qui se déplacera vers la gauche.



B Si maintenant, on tient compte des états d'interface, que se passe-t-il?

Observons les diagrammes d'énergie d'un transistor MOS à canal N et d'un transistor MOS à canal P rendant compte de l'état thermodynamique du silicium :



On voit donc que dans le cas d'un MOSFET à canal N, on aura des états d'interface négatifs, contrairement à un MOSFET à canal P dont les états d'interface seront positifs.

On a donc au total :

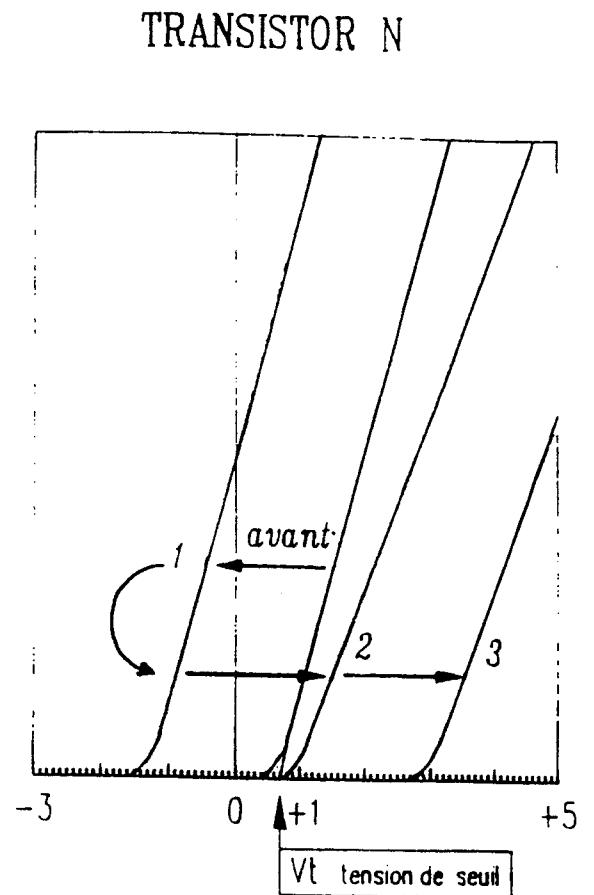
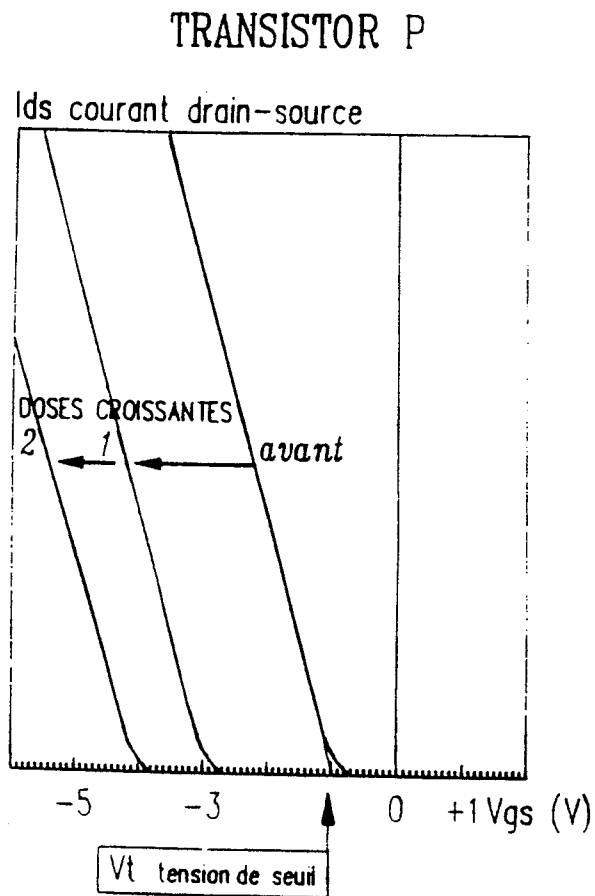
$$\Delta U_{th} = \Delta U_{th1} + \Delta U_{th2}$$

où ΔU_{th1} est due aux charges positives piégées dans l'oxyde

ΔU_{th2} est due aux états d'interfaces positifs ou négatifs selon le type de MOSFET.

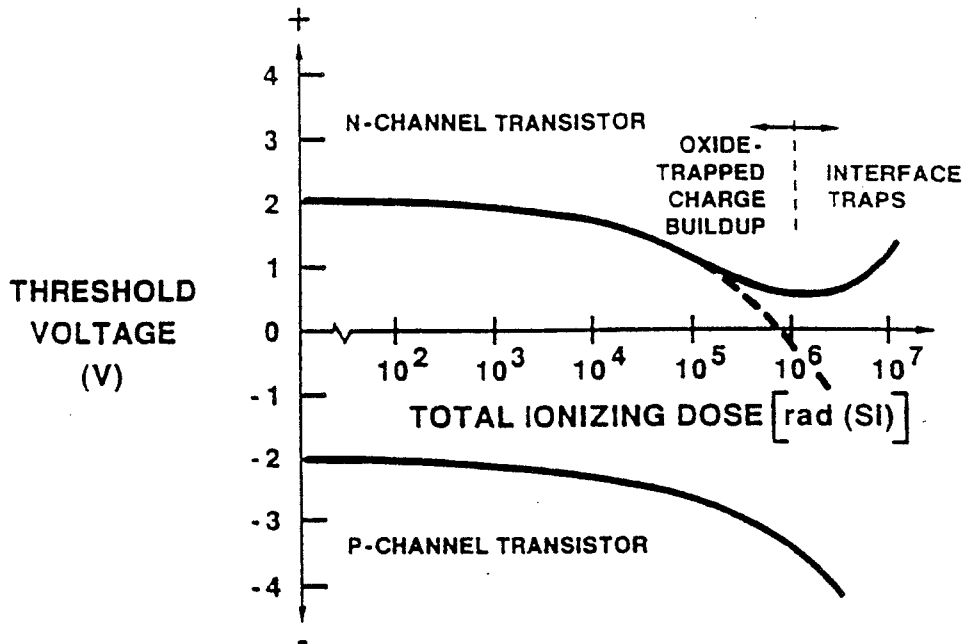
On comprend donc que pour un MOSFET à canal P, les deux phénomènes joueront dans le même sens contrairement au cas où le MOSFET est à canal N: dans ce deuxième cas, il faut savoir lequel des deux phénomènes est prédominant sur l'autre. En fait, pour des doses inférieures à 10^4 Gy(tissu), c'est la contribution des charges créées dans l'oxyde qui prédomine. Pour des doses supérieures à 10^4 , ce sont les effets dus aux états d'interface qui deviennent les plus importants.

Voici le bilan ci-dessous :



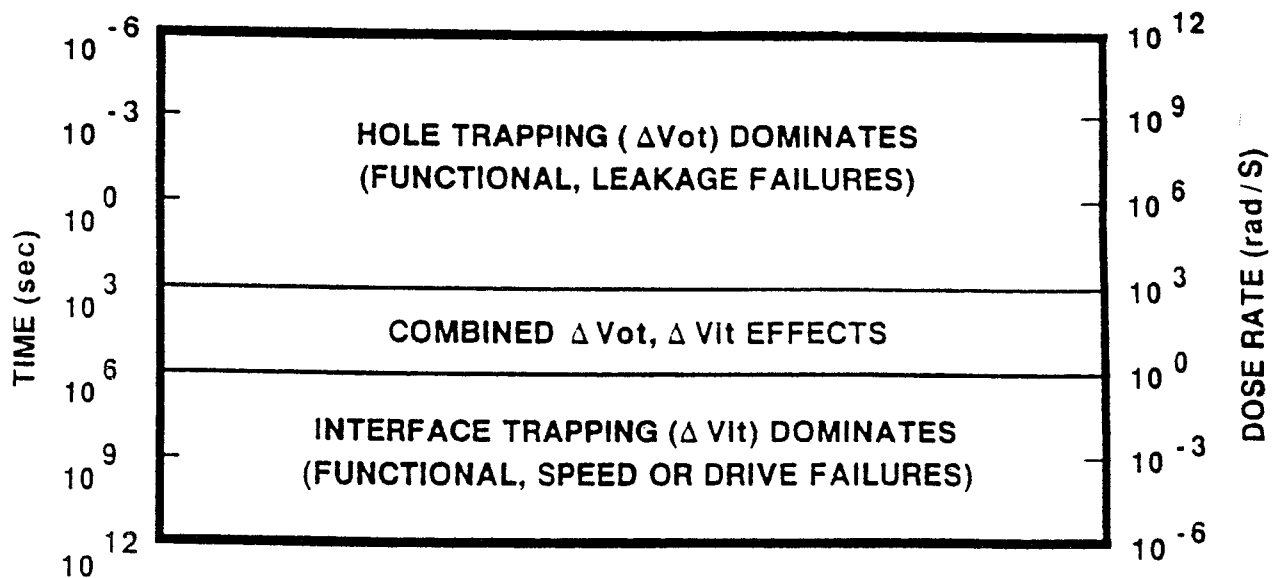
Ceci explique donc la courbe présentée par Monsieur P. Winokur (Sandia National Laboratory, Nouveau Mexique) lors d'une conférence donnée au CERN le 2 juin 1992.

THRESHOLD VOLTAGE VERSUS TOTAL DOSE FOR N- AND P-CHANNEL MOSFETs



1987 IEEE SHORT COURSE NOTES, P.41.

Monsieur Winokur a également indiqué que la prédominance de l'un des deux phénomènes ne dépendait pas seulement de la dose, mais aussi du débit de dose:



II-4-3 Les particules lourdes chargées

Quand ces particules traversent le matériau semi-conducteur, elle sont suffisamment lourdes pour se comporter comme les neutrons et donc créer des zones de défaut. De plus comme elles sont chargées, elle peuvent créer des paires électron-trou et donc induire les mêmes effets que ceux remarqués dans le cas des rayonnements électromagnétiques.

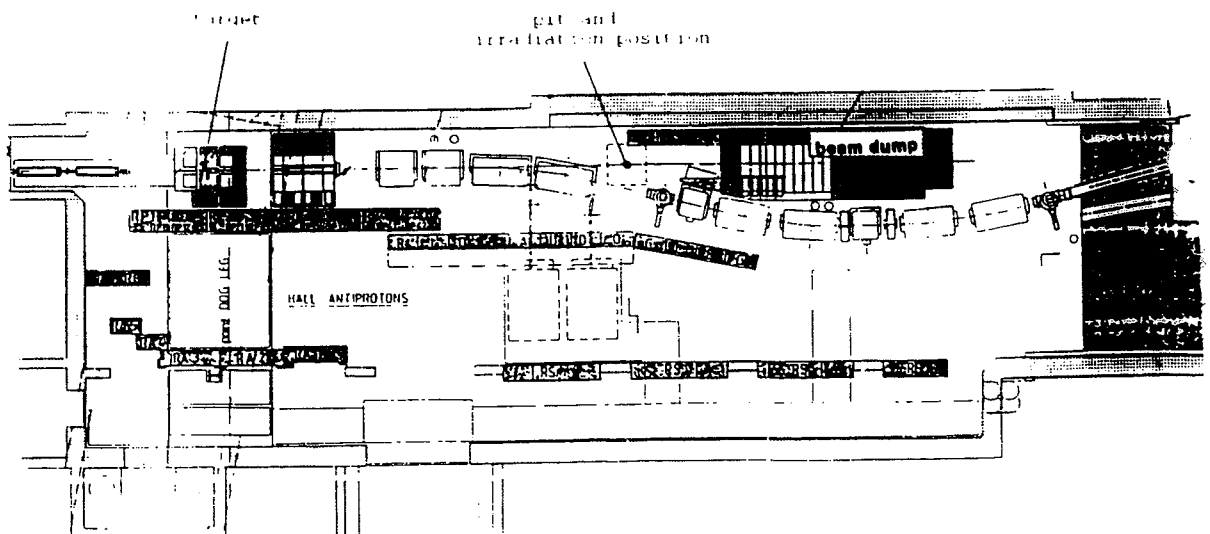
III LE STAGE

III-1 PRESENTATION DES FACILITES D'IRRADIATION

III-1-1 Le PSAIF

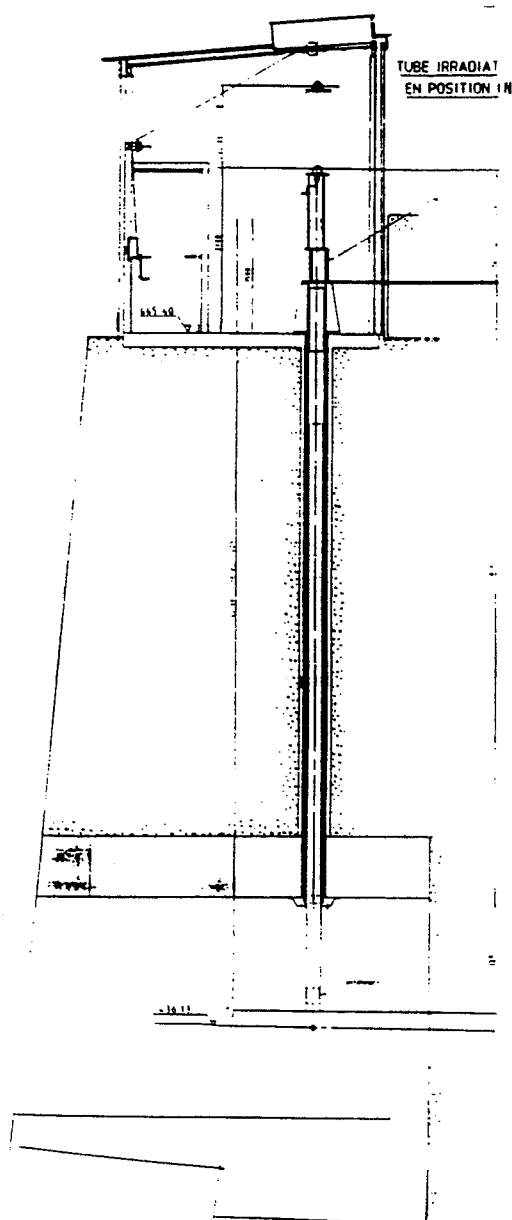
Depuis 1990, le CERN dispose d'une facilité d'irradiation : le PSAIF (PS-ACOL Irradiation Facility). Situé juste après la cible de production des anti-protons, on y trouve un environnement identique à celui d'un accélérateur.

Des protons provenant du PS sont envoyés sur la cible d'iridium ; il peut y avoir 1,2,3 ou 6 pulses par supercycle du PS (14.4 s). Les antiprotons sont stockés par ACOL (Antiproton Collector).



Zone de production des antiprotons

La facilité d'irradiation n'est autre qu'un trou se trouvant juste au dessus du faisceau secondaire. Dans ce trou ont été mis un tube extérieur et un container (diamètre : 18 cm ; hauteur : 20 cm) dans lequel on pose les échantillons à irradier et que l'on descend jusqu'à 20 cm au dessus du faisceau secondaire à l'aide d'une poulie, le container étant guidé par le tube extérieur.



Des dosimètres radiophotoluminescents, thermoluminescents ainsi que l'alanine ont été utilisés pour connaître les doses. La fluence en neutrons a été déterminée à l'aide de mesures par activation. Insistons ici, encore une fois, sur l'importance d'avoir un dosimètre au silicium capable de séparer la dose gamma et la fluence, ce qui serait une méthode beaucoup moins longue et fastidieuse que celle nécessitée pour les mesures par activation.

Au PSAIF, un proton envoyé sur la cible correspond à une fluence de 2.10^{-4} n.cm⁻² et la dose absorbée par l'alanine est de $1.1 \cdot 10^{-14}$ Gy.
La dose correspondant à la fluence est :

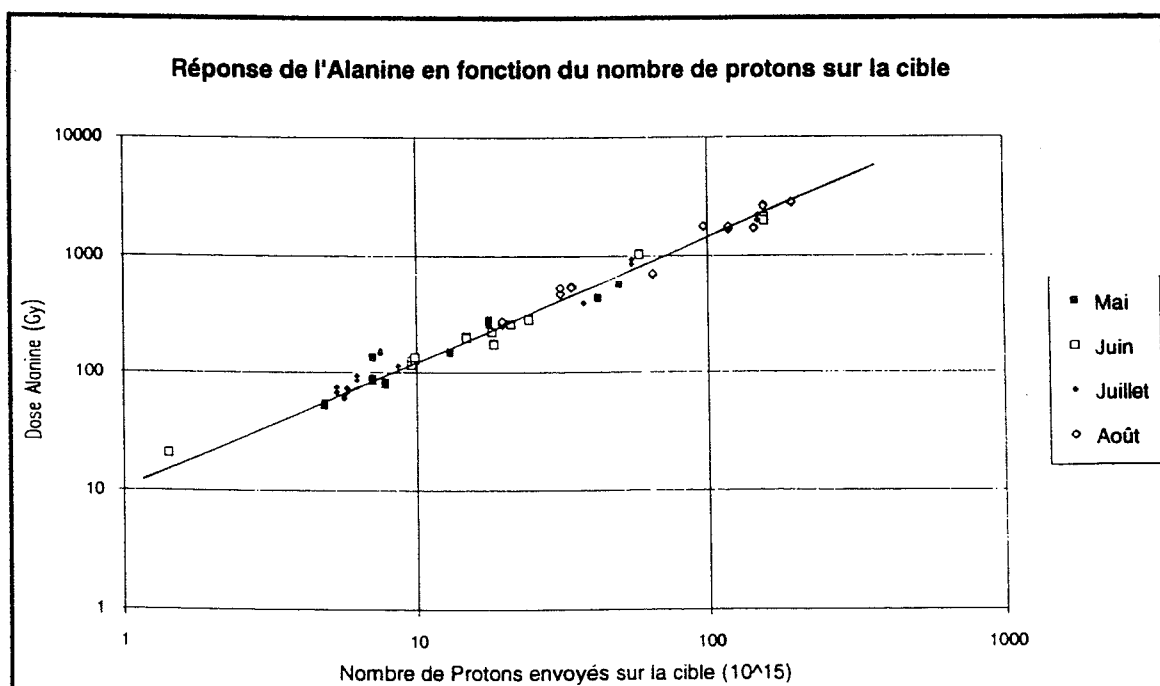
$$2.10^{-11} \text{ Gy(tissu) / n.cm}^{-2}$$

soit 4.10^{-15} Gy(tissu) pour un proton envoyé sur la cible.

Or, l'alanine ne mesure que la moitié de cette dose. On mesurera donc avec l'alanine :

$$\left. \begin{array}{l} 2.10^{-15} \text{ Gy dû aux neutrons,} \\ 9.10^{-15} \text{ Gy dû aux gamma,} \end{array} \right\} \text{ pour chaque proton} \\ \text{envoyé sur la cible}$$

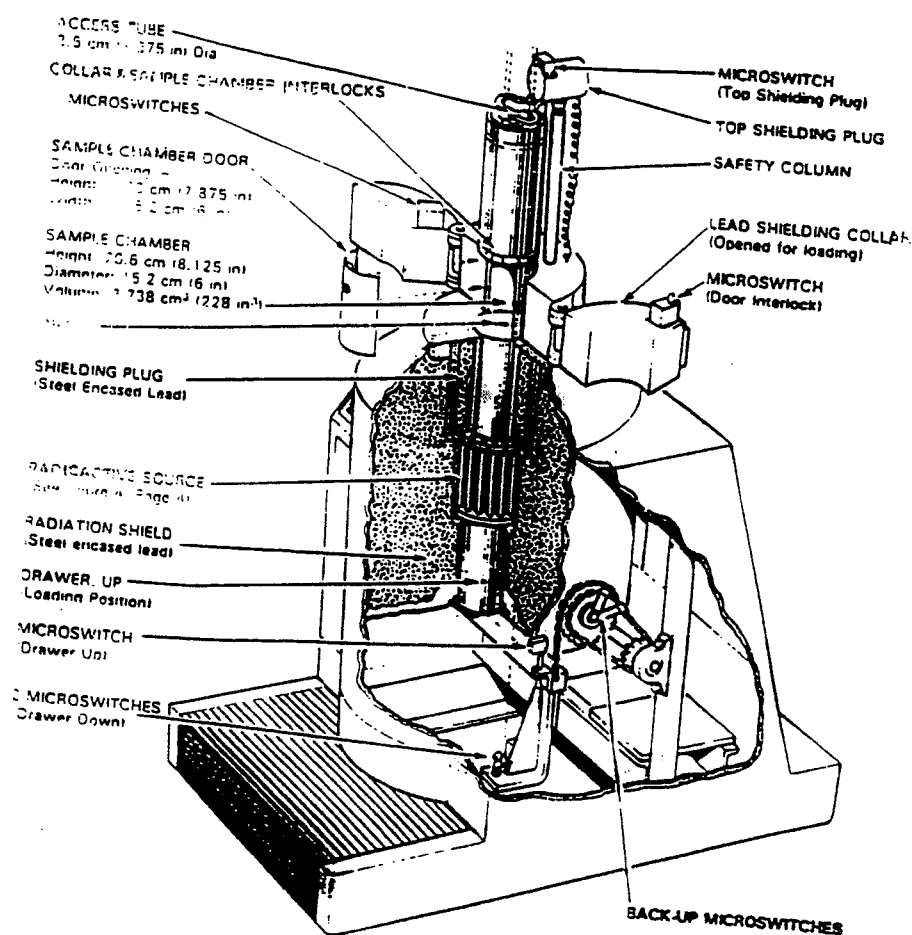
Au cours des irradiations que j'ai effectuées au PSAIF, j'ai utilisé l'alanine comme dosimètre. J'ai donc pu comparer le nombre de protons et la dose alanine :



Je trouve une valeur de $1.4 \text{ Gy}/10^{14}$ protons pour un coefficient de corrélation de 0.984.
On remarque quand même que le PSAIF n'est pas toujours très stable, mais reste néanmoins une facilité d'irradiation dont les caractéristiques sont de mieux en mieux connues et que des chercheurs de toute nationalité souhaitent utiliser de plus en plus souvent.

III-1-2 Irradiation en Gammas

Des dosimètres au silicium ont été envoyés au PSI (Villigen, Suisse) et au Conservatoire (Dagneux, France).
Au PSI, les échantillons ont été irradiés dans une facilité d'irradiation au Cobalt 60 de 1 kCi et de débit de dose de 24 Gy/h . Pour les doses supérieures à 1 kGy , on a utilisé une Gammacell d'un débit de dose de 7.5 kGy/h .
Voici le schéma de la Gammacell :



Au Conservatoire, les dosimètres ont été irradiés au Cobalt 60 avec un débit de dose de 4900 Gy/h

III-2 PRESENTATION DES DOSIMETRES TESTES

III-2-1 Les diodes

III-2-1-1 Détecteur UA2

Les premières expériences que j'ai effectuées au CERN portaient sur des détecteurs au Silicium. Autrefois utilisés dans une expérience du SPS pour la détection une à une des particules émises lors d'une interaction à haute énergie, ils font maintenant l'objet de différentes études et publications dont certaines se sont avérées très importantes en ce qui concerne la possibilité d'utiliser ces détecteurs en tant que dosimètres. En effet, il a été remarqué que le courant inverse et la concentration de dopants évoluaient proportionnellement à la fluence (en $n.cm^{-2}$).

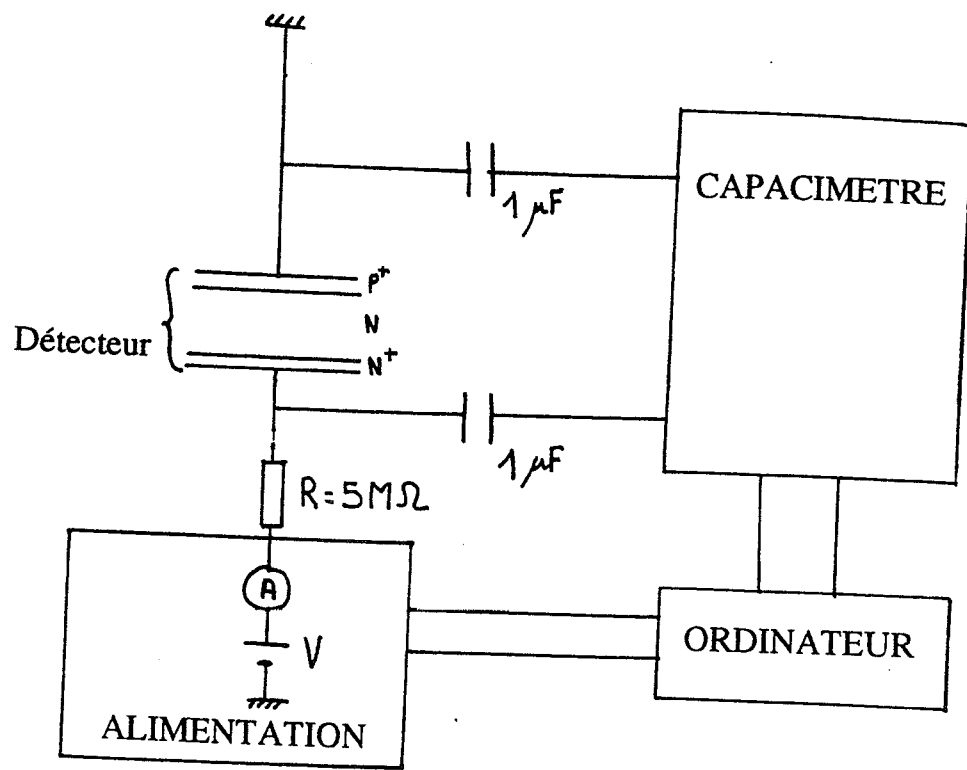
Il fallait donc vérifier cela et voir si les erreurs étaient suffisamment faibles pour utiliser ces détecteurs comme dosimètres.

Ces détecteurs, de référence UA2 (c'est le nom de l'expérience dans laquelle ils ont été utilisés), sont fabriqués par Intertechnique. Sur le même substrat, l'on dispose d'une diode sans anneau de garde, d'une diode avec anneau de garde et d'une capacité MOS.

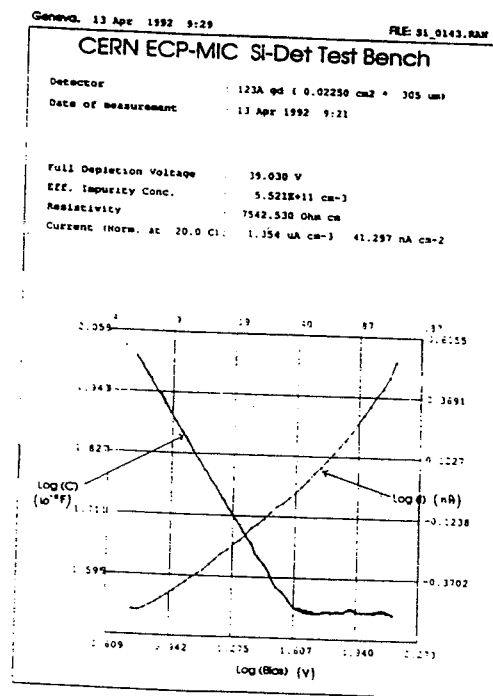
Les diodes sont de type N implanté P. L'épaisseur est d'environ 300 microns et la résistivité de 8000 Ohm.cm.

A l'aide d'un banc test piloté par ordinateur, on trace les courbes capacité-tension.

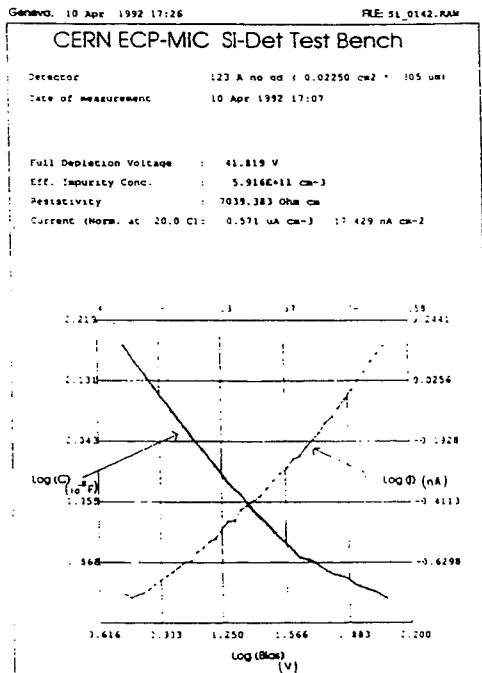
Ce banc test se présente selon le schéma suivant :



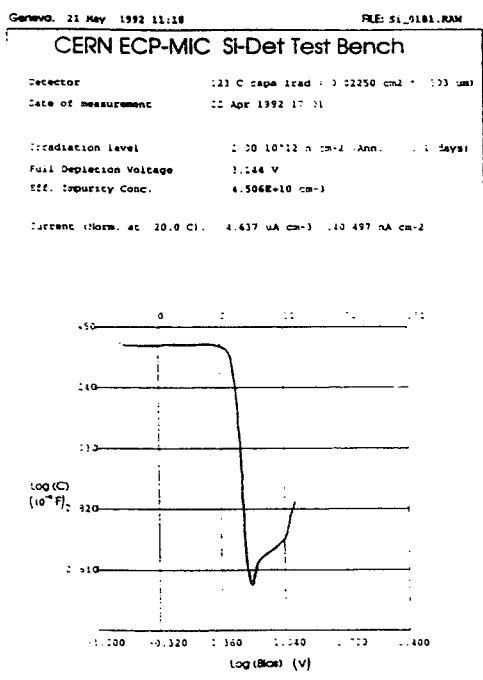
Un modèle de chaque courbe est présenté ci-après.



Diode avec anneau de garde



Diode sans anneau de garde



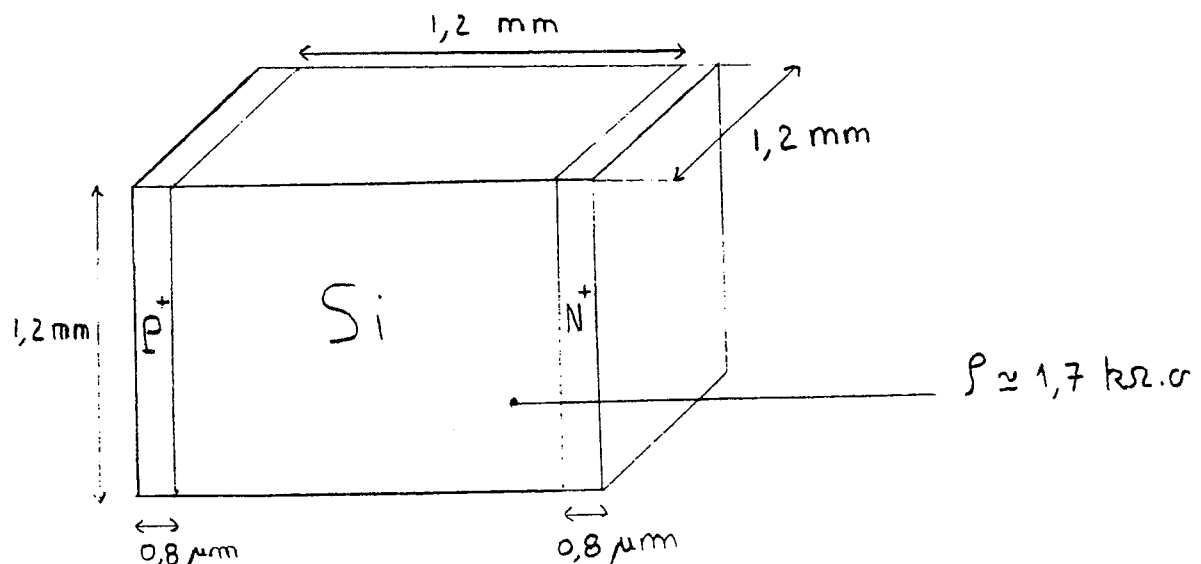
Capacité MOS

A l'aide de ces courbes, on peut déterminer la tension de déplétion par la méthode des tangentes. En effet, lorsque la diode est complètement déplétée, la capacité reste constante.

L'ordinateur calcule alors le courant inverse et la concentration en impuretés, à cette tension de déplétion. On remarque que la diode sans anneau de garde ne présente pas une capacité constante après avoir atteint la tension de déplétion ; ceci est dû au fait que lorsque la tension appliquée augmente, les lignes de champ ont tendance à se courber sur les bords de la diode. On peut d'ores et déjà dire qu'une diode avec un anneau de garde donnera des résultats plus précis qu'une diode n'en possédant pas. C'est pour cette raison que l'on se limitera par la suite aux résultats obtenus avec des diodes munies de cet anneau.

III-2-1-2 Diode PIN d'Ukraine

Elles se présentent selon ce schéma :



Elles sont fabriquées par l'Institut pour la Recherche Nucléaire de l'Académie des Sciences d'Ukraine.

Pour déterminer U , on utilise un courant direct de 1 mA (Injection intermédiaire) et on mesure la tension aux bornes de la diode.

III-2-1-3 Diode PIN BPW34

Elles sont fabriquées par Siemens. Elles ont une épaisseur de 210 μm et ont une résistivité de l'ordre de 2500 Ωcm . Ces photodiodes ont fait l'objet d'une étude afin de les utiliser pour déterminer les débits de dose Gamma et X. Ceci laisse donc à penser qu'elles pourraient également servir comme dosimètre.

Etant du même type que les précédentes, ces diodes sont mesurées de la même façon.

Une photographie des diodes se trouve page suivante.



BPW34

UA2

PIN (Ukraine)

LES DIODES



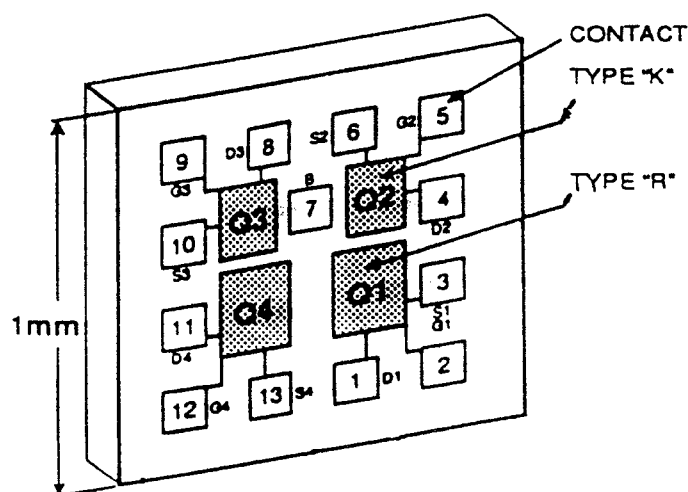
III-2-2 Les MOS

III-2-2-1 Radfet (Radiation-sensitive Field Effect Transistor)

Il s'agit de transistors MOS à effet de champ à canal P. L'épaisseur de l'oxyde de grille est supérieure à celle que l'on trouve dans les MOSFET pour circuits intégrés.

D'autre part, il a été remarqué que plus l'oxyde est épais, plus le transistor est sensible aux radiations ionisantes.

Fabriqués par REM (Radiation Experiments and Monitors-Angleterre), ces dosimètres se trouvent regroupés par quatre dans un boîtier comme le montre la figure ci-dessous. On y trouve deux dosimètres pour les hautes doses (Type K) et deux dosimètres pour les basses doses (Type R).



Ceux que nous étudions ont des épaisseurs de grille de 0.96 et 0.12 micron.

La variation de la tension de grille est déterminée à l'aide d'un appareil commercialisé par Siltech (Grande Bretagne) pour un courant $I_{ds} = 40 \mu A$.

III-2-2-2 Transistor d'Ukraine.

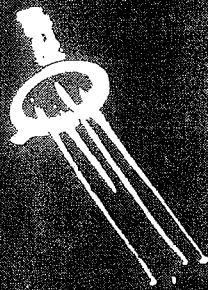
Ce sont des transistors MOS à effet de champ canal N dont l'épaisseur d'oxyde est de $1\text{ }\mu\text{m}$, celle du substrat de $300\text{ }\mu\text{m}$.

Ici, on mesure V_g pour un courant $I_{ds} = 43\text{ }\mu\text{A}$ (c'est pour ce courant que l'influence de la température est la plus faible).

Il est important de noter que pour ces deux derniers types de dosimètres, si on applique une tension entre la grille et le substrat, le champ électrique créé dans l'oxyde permet de séparer les trous des électrons plus rapidement et donc de diminuer le taux de recombinaison, d'où une sensibilité accrue.

Les transistors sont photographiés à la page suivante.

Vous trouverez également à la suite un tableau récapitulatif des différentes caractéristiques des dosimètres.



MOS (Ukraine)

Radfets

avec couvercle

sans couvercle

LES MOSFET

← 3em. →

TYPE	FOURNISSEUR	CARACTERISTIQUES
Diode UA2 avec anneau de garde	Intertechnique	N implanté P e = 300 μm $\rho = 8 \text{ k}\Omega\text{cm}$
Diode PIN d'Ukraine	INR	V = (1.2 mm) ³ $\rho = 1.7 \text{ k}\Omega\text{cm}$
Diode BPW34 (photodiode)	Siemens	e = 210 μm $\rho = 2.5 \text{ k}\Omega\text{cm}$
Radfet	REM	canal P e(SiO ₂) = 0.12/0.96 μm
MOS d'Ukraine	INR	canal N e(SiO ₂) = 1 μm

III-3 RESULTATS

III-3-1 Irradiations au PSAIF

III-3-1-1 Détecteurs UA2

Dans un premier temps, quatre détecteurs (54A,54B,123A,123C) ont été irradiés jusqu'à une fluence de $1.6 \cdot 10^{13} \text{ n.cm}^{-2}$. Ce n'est que quelques mois plus tard que la série 123 a été irradiée à plus forte dose, suite aux résultats encourageants obtenus préalablement.

a- *Courant inverse : $I=f(\phi)$*

Le courant inverse dépend exponentiellement de la température de mesure. Tous les résultats ont donc été normalisés à 20°C selon l'équation

$$I(20)/I(T) = (293.2/T) * \text{EXP}[(1.21/2k)*((1/T)-(1/293.2))]$$

k : constante de Boltzmann

T : température en °K

Ce courant est généré dans le volume actif du détecteur, qui est déterminé par la largeur de déplétion et l'extension latérale de la zone de déplétion.

Pour être indépendant de l'épaisseur de déplétion, le courant inverse est mesuré à la tension de déplétion.

D'autre part, le volume effectif V_{eff} est déterminé à partir de la capacité mesurée selon la relation

$$V_{\text{eff}} = C_m / C_g * A_g * X_d$$

où C_g est la capacité géométrique du détecteur :

$$C_g = \epsilon_0 * \epsilon_{Si} * A_g / X_d$$

A_g : Aire de la jonction

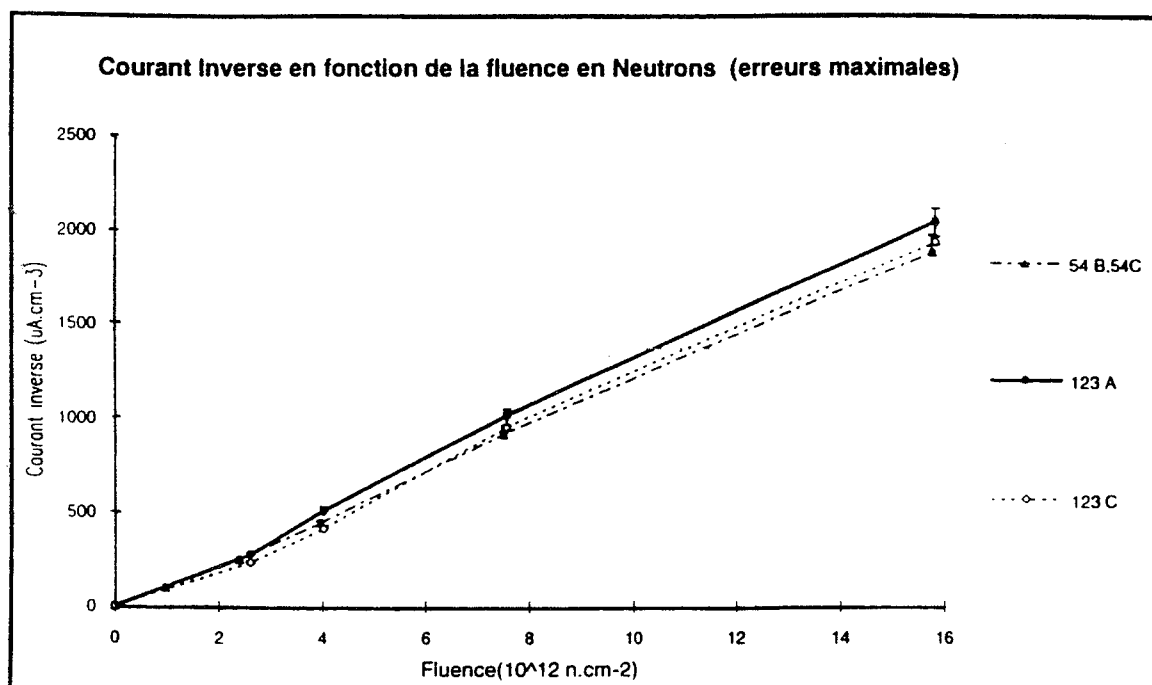
X_d : Epaisseur du détecteur

et C_m est la capacité mesurée.

D'autre part, une dernière normalisation reste à faire : celle tenant compte de la récupération ou annealing.

Pour cela, le CERN dispose d'un programme qui calcule les nouvelles valeurs du courant, selon les coefficients de Lindström (Université de Hambourg).

Pour les irradiations au PSAIF, on obtient le résultat suivant :



Ceci s'exprime donc de la façon suivante :

$$I / V_{eff} = \alpha * \phi$$

où ϕ : fluence en n.cm-2,
 α : pente de la droite

Le résultat important est que les quatre détecteurs présentent presque tous la même droite. D'autre part, il était également intéressant de trouver les erreurs maximales qui pouvaient être faites, notamment lors de la détermination de la tension de seuil, ce qui est également représenté sur la figure ci-dessus. On voit que les erreurs obtenues sont assez faibles, ce qui fait que ces détecteurs permettent de déterminer la fluence en neutrons à ± 8 % près.

b- Concentration des dopants

Les rayonnements émis sur les composants au Silicium changent les concentrations des donneurs et des accepteurs. Néanmoins, tout se passe comme si des centres accepteurs sont créés. C'est pourquoi la concentration en dopants évolue en fonction de la fluence, et un composant de type N au départ finit par devenir de type P sous l'effet des radiations.

D'après l'équation de Poisson :

$$N_{eff} = (2\epsilon/q) \cdot (U_d + U_0) / X_d$$

avec

N_{eff} : concentration en impuretés

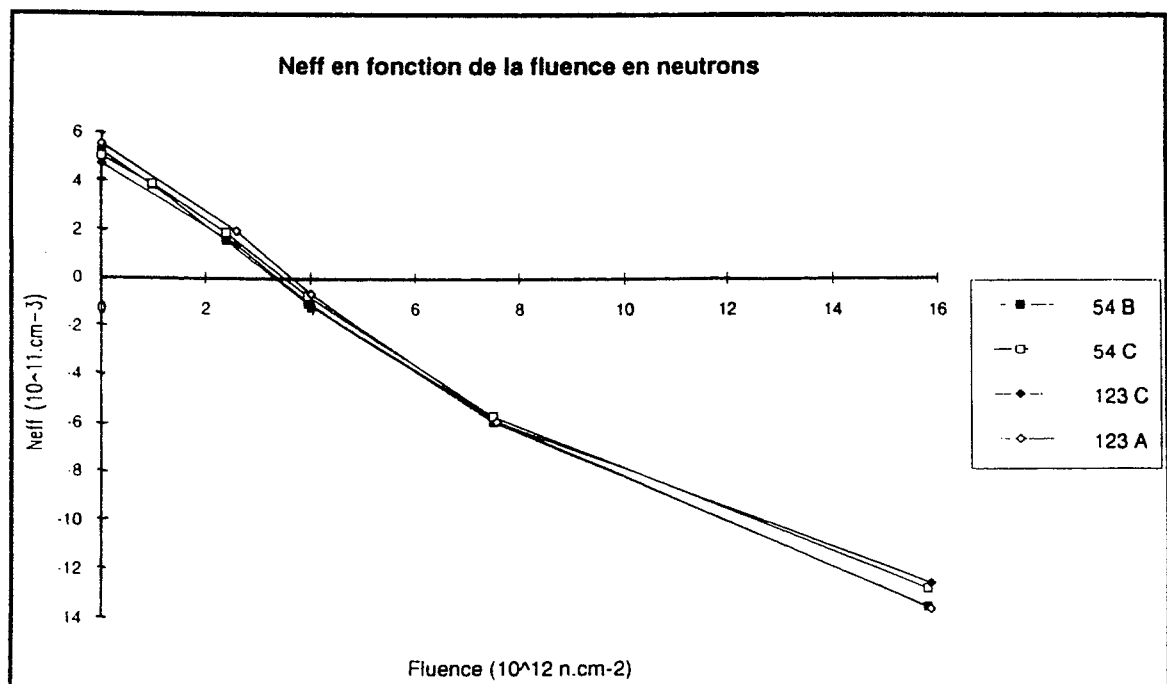
X_d : largeur de déplétion

U_d : tension de déplétion

U_0 : tension de diffusion (ou hauteur de barrière)

Ainsi, connaissant l'épaisseur de la diode, il est possible à partir de la courbe C-V (p. 49) de mesurer U_d et de représenter la concentration en impuretés en fonction de la fluence en $n.cm^{-2}$. Ceci suppose que l'on considère l'évolution de la concentration en dopants comme uniforme.

On obtient alors le graphe ci-dessous.

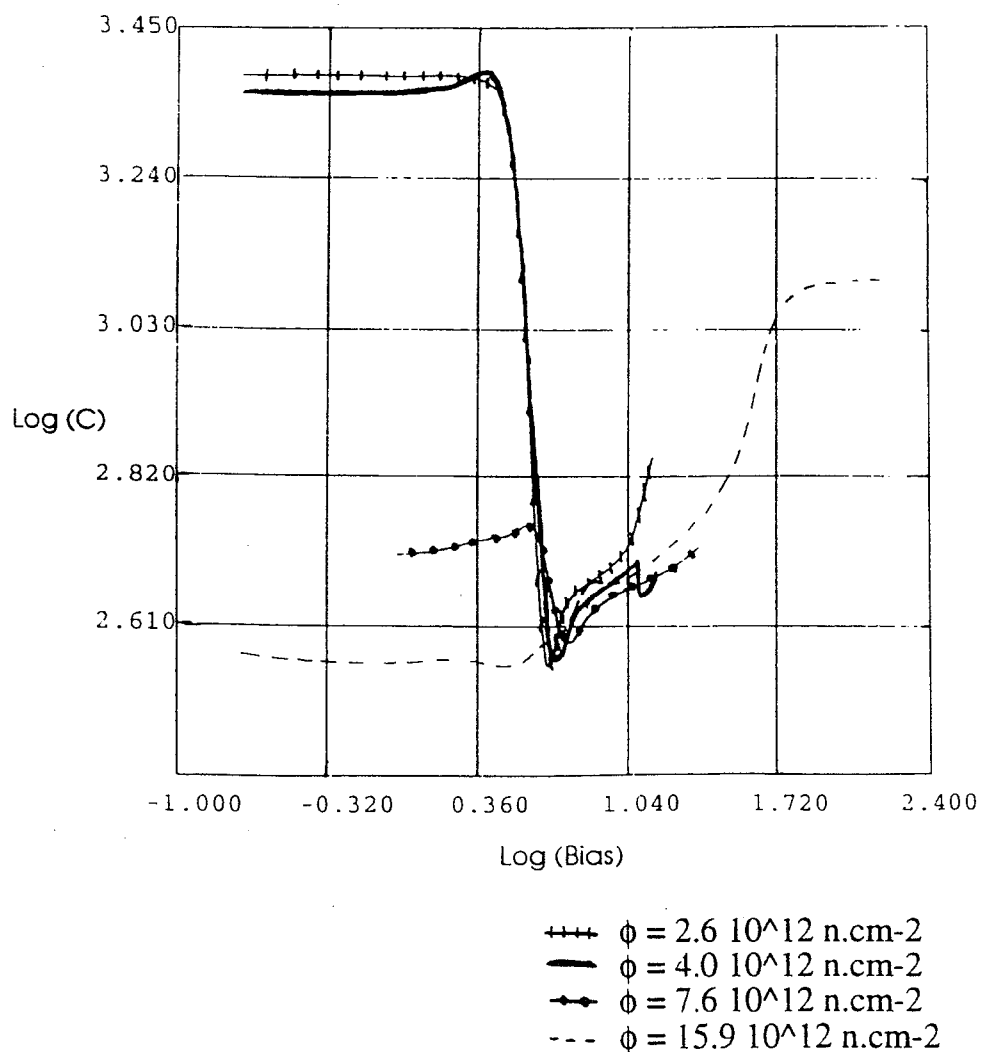


On remarque donc bien l'inversion qui a lieu pour une fluence de l'ordre de $3.5 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}$.

Malgré la correction par les coefficients de Lindström, contrairement au cas du courant, ici, la courbe n'est pas tout à fait linéaire. Si, en plus, on tient compte des erreurs dues à la détermination de la tension de déplétion, on ne pourra pas déterminer la fluence avec une erreur inférieure à $\pm 15 \%$

c- Courbe C-V pour une capacité MOS

Au cours des irradiations au PSAIF, les courbes C-V des capacités MOS (p.50) ont été mesurées pour différentes fluences. En les superposant, on remarque bien l'évolution d'un matériau de type N vers un type P : pour $\phi = 2.6 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}$, on a encore un type N, alors que pour $\phi = 15.9 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}$, on est en présence d'un type P.



III-3-1-2 Les diodes PIN d'Ukraine

D'après les calibrations effectuées en réacteur à l'INR (Institut de Recherche Nucléaire) de Kiev, la sensibilité des diodes est de l'ordre de $0.4 \text{ V}/10^{11} \text{ n.cm}^{-2}$. La courbe de calibration montre que la réponse des diodes sature pour une fluence de l'ordre de $5 \cdot 10^{13} \text{ n.cm}^{-2}$.

Ces diodes ont également été calibrées dans une source au Cobalt : la sensibilité est alors de seulement 0.1 mV/Gy .

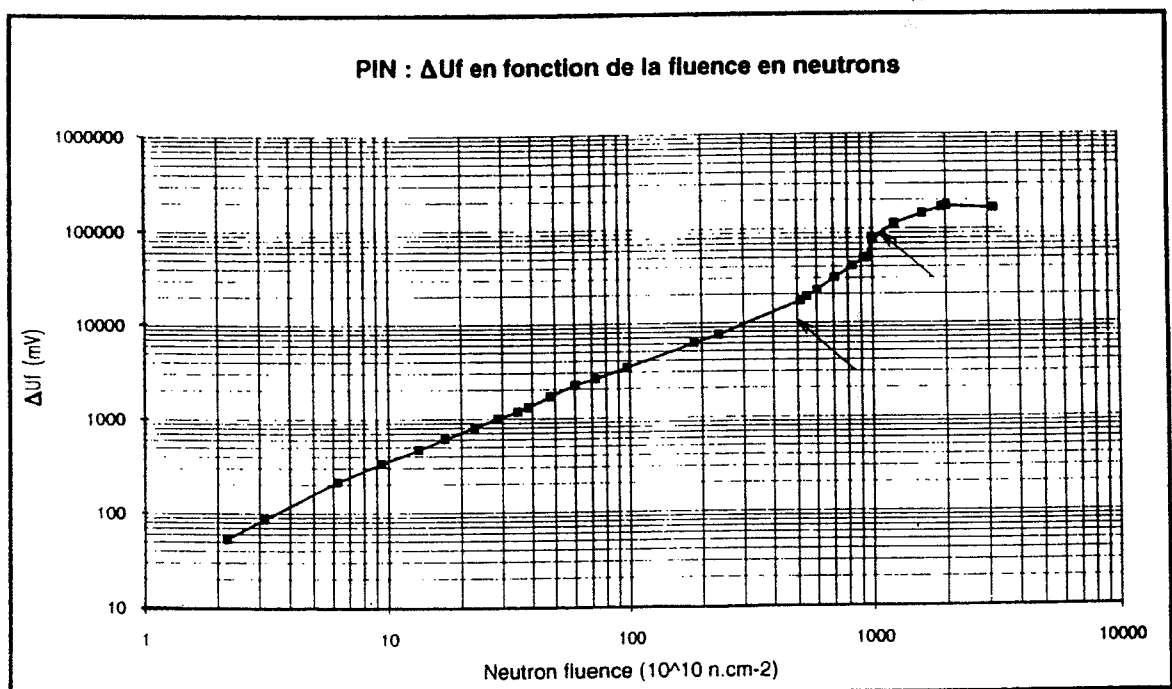
Elles ont été irradiées au PSAIF du CERN. Au départ, il s'agissait de les irradier avec des séries de trois pulses, puis six, puis douze pour aller jusqu'à les laisser une nuit entière soit environ six mille pulses.

A deux reprises, il a fallu, pour des raisons techniques, changer d'appareil de mesure, ce qui est marqué par des flèches sur le schéma ci-dessous.

Les appareils ont successivement été :

- appareil de mesure fourni par l'INR, voltmètre digital Fluke 8120A Traco Electronic
- source de courant EMI VARIREF, voltmètre digital Fluke 8120A
- Keithley 237

Voici donc les résultats obtenus:



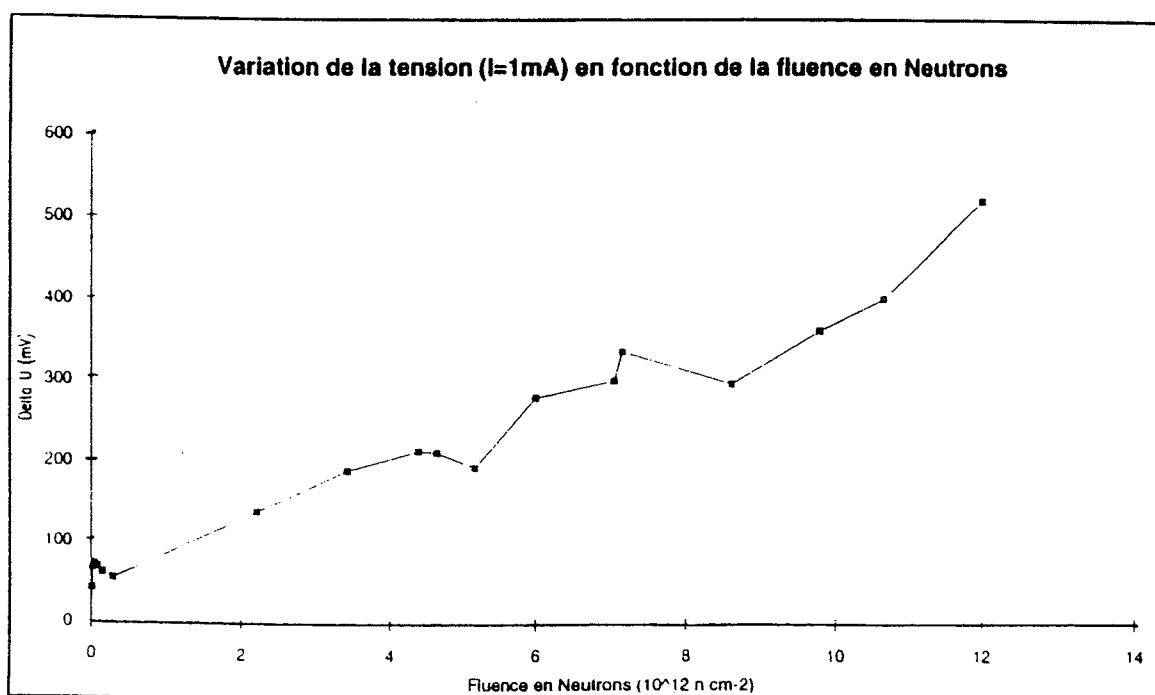
On trouve une pente de $8.57 \text{ mV}/10^{13}$ protons envoyés sur la cible. Si l'on prend en compte les mesures par activation, ce résultat correspond à une sensibilité de $0.43 \text{ V}/10^{11} \text{ n.cm}^{-2}$. Les diodes semblent commencer à saturer autour de $3 \cdot 10^{13} \text{ n.cm}^{-2}$.

On peut dès lors dire que ces résultats sont très comparables à ceux obtenus à l'INR.

III-3-1-3 Les diodes BPW34

Au départ au nombre de cinq, ces diodes ont été irradiées de la même façon que ci-dessus; les réponses après les premières irradiations paraissant ne pas être cohérentes, il a été décidé de continuer à en irradier deux (première série), d'en garder deux autres (deuxième série) pour des irradiations futures en fonction des résultats obtenus pour la première série, et enfin d'en irradier une à des doses plus élevées (troisième série).

L'irradiation de la première série a donc abouti au résultat suivant :

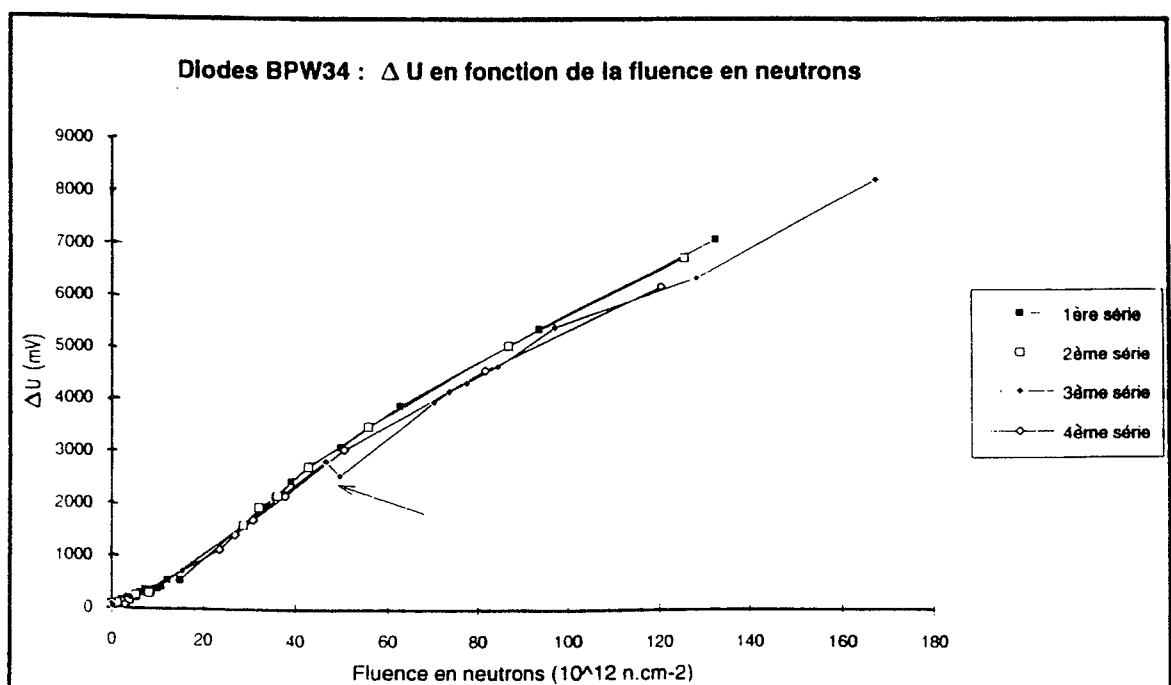


Cette courbe est à première vue décevante dans la mesure où l'on est loin d'obtenir une droite bien régulière comme on le souhaiterait pour une bonne dosimétrie. Mais il faut prendre en compte plusieurs facteurs : tout d'abord, le nombre de diodes n'est que de deux, ce qui peut expliquer l'allure de cette courbe. Ensuite, lorsque l'on irradie des échantillons et que l'on effectue les mesures on ne tient pas compte de l'anéaling, les temps d'irradiation étant variables. Les quatre derniers points de cette courbe ont été obtenus en irradiant les diodes pendant deux heures et en les mesurant un quart d'heure après leur sortie du puit, et le résultat permet d'être optimiste. Enfin, l'appareillage pour mesurer la tension et appliquer le courant est du plus simple et manque peut être de précision.

Ce qu'il faut quand même remarquer, c'est le fait que ces diodes sont beaucoup moins sensibles que les précédentes et donc malgré ces premiers résultats décevants, elles devaient continuer de faire l'objet d'irradiations, mais dans quelles conditions?

Pour palier au fait qu'il pouvait y avoir des erreurs dues à l'appareillage de mesure, cinq diodes supplémentaires (quatrième série) ont été rajoutées aux cinq premières. Cette nouvelle série a été mesurée à la fois avec les anciens appareils et un Keithley 237. Comme les diodes sont peu sensibles, elles ont été irradiées à des fluences plus fortes. Enfin, au PSAIF, il est très difficile de prévoir combien de temps la machine marchera, s'il n'y aura pas des problèmes pendant l'accumulation donc presque impossible de faire des mesures successives dans les mêmes conditions expérimentales ; c'est donc pour cette raison qu'il n'a pas été tenu compte de l'hypothèse comme quoi l'anéaling était la cause des résultats médiocres.

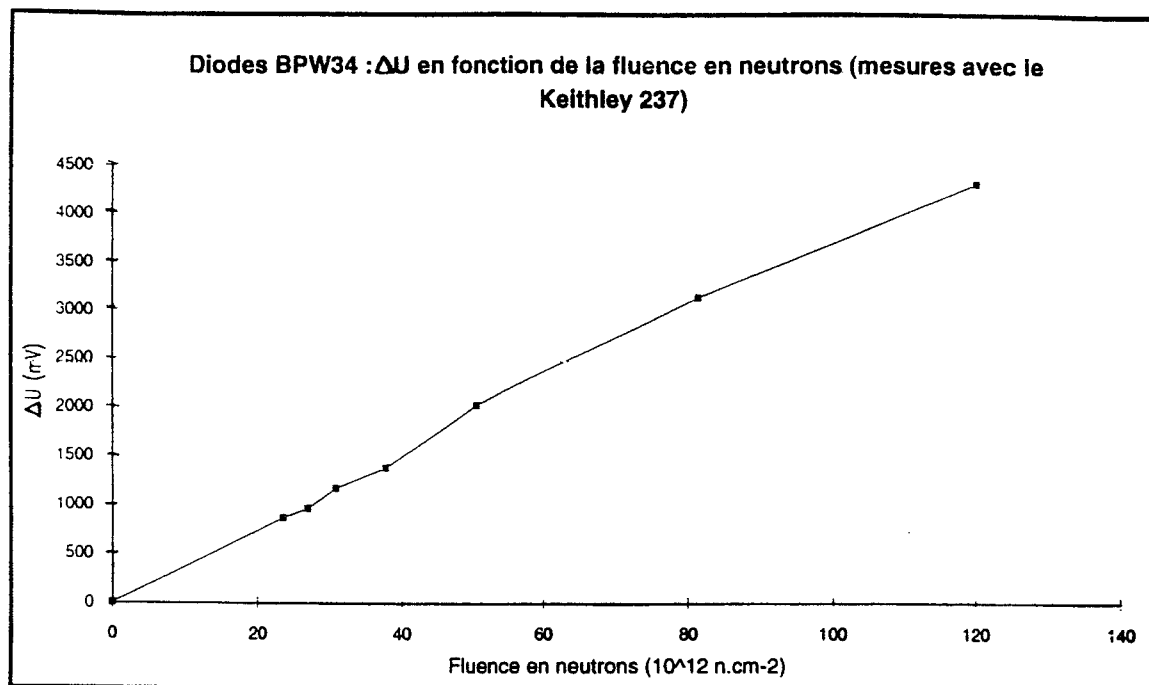
La courbe obtenue en effectuant les mesures avec l'ancien appareillage se trouve ci-dessous :



On obtient donc bien une droite de pente $53.5 \text{ mV} / 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}$ et de coefficient de corrélation 0.990

La flèche indique un écart de la troisième série par rapport aux autres dû à l'annealing.

Avec le Keithley, les mesures donnent le résultat suivant :

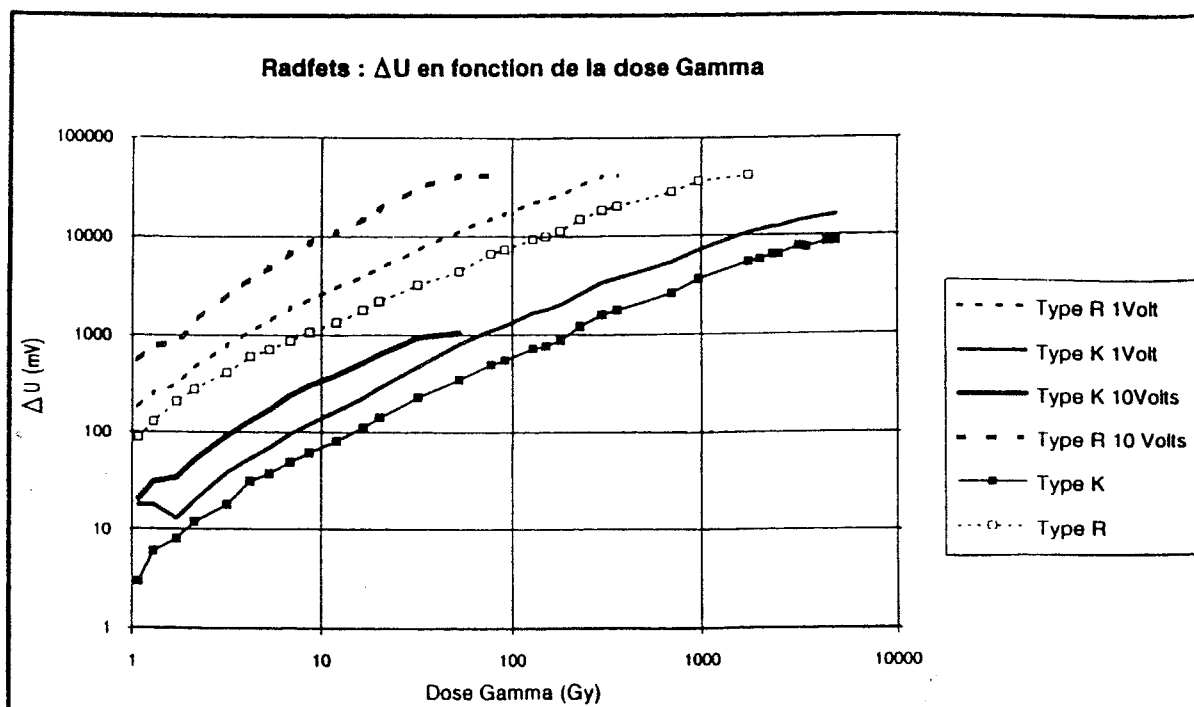


Il s'agit également d'une droite de pente $36.5 \text{ mV} / 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}$ et de coefficient de corrélation 0.996.

III-3-1-4 Les Radfets

Les Radfets ont fait l'objet d'une calibration et REM annonce une sensibilité de 60 mV/krad pour les types K et 1.6 V/krad pour les types R. L'échelle de mesure s'étale de 10^3 à 10^6 rads pour les types K et de 10 à 10^5 rads pour les types R. D'autre part la sensibilité se trouve accrue lorsqu'on applique une tension de grille.

Deux radfets ont été irradiés au PSAIF : l'un de façon passive, l'autre sous tension : pendant l'irradiation, un transistor de type K et un de type R étaient sous une tension de grille de 1 V , de même que l'autre type K et l'autre type R qui se trouvaient sous une tension de grille de 10 V . La courbe obtenue se trouve page suivante :



Comme prévu, les types R (lignes discontinues) sont bien plus sensibles que les types K (lignes continues). On remarquera d'ailleurs que l'on a dû cesser de faire les mesures concernant les types R assez rapidement car la tension de seuil a très vite atteint 50 V, limite de mesure de l'appareil. De plus, cette courbe confirme le fait que plus la tension de grille est forte (ligne de plus en plus épaisse), plus la sensibilité se trouve accrue. L'échelle de mesure s'étend de moins de 1 à 1000 Gy pour les types R et de quelques Gy à plus de 8000 pour les types K.

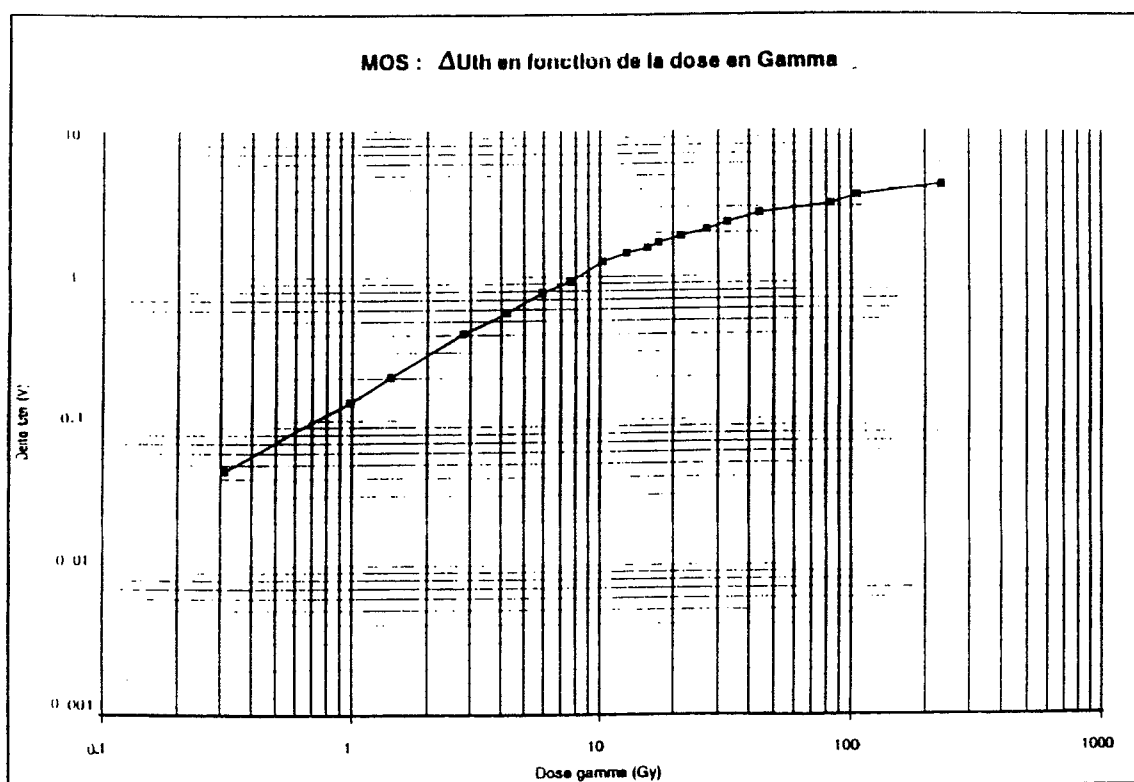
Ainsi, pour les types R, la sensibilité passe de 1.4 V/krad ($V_g=0V$) à 10 V/krad ($V_g=10V$) et pour les types K de 60 mV/krad ($V_g=0V$) à 350 mV/krad ($V_g=10V$). Ces valeurs coïncident donc bien avec les données annoncées par le fabricant.

Il faut signaler que ces dosimètres sont très fragiles et sensibles à l'électricité statique. C'est ainsi que l'on peut observer que le type K polarisé sous 10 V a cessé de fonctionner au cours des irradiations successives.

III-3-1-5 Les MOS d'Ukraine

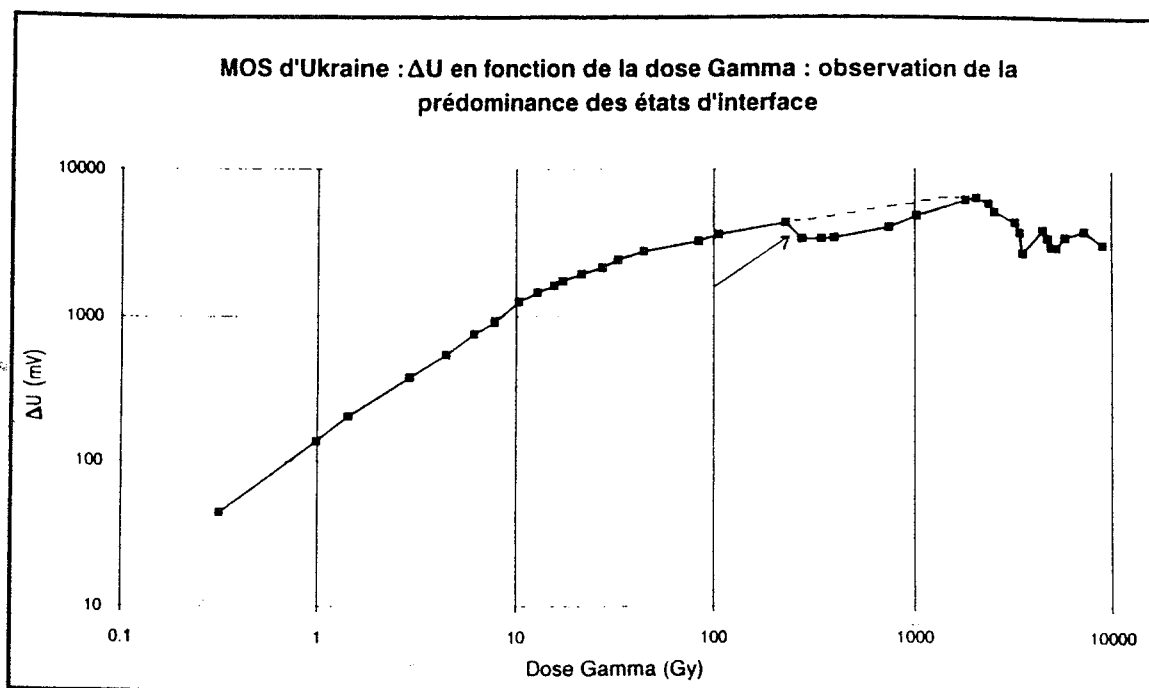
Ces transistors MOS à effet de champ ont été irradiés par l'INR au Cobalt 60 et leur courbe de calibration donne une sensibilité de l'ordre de 0.12 V/Gy(tissu) et indique que ce dosimètre sature pour une dose de l'ordre de 100 Gy(tissu).

Dix MOS ont été irradiés au PSAIF du CERN selon la même méthode que celle employée pour les diodes PIN d'Ukraine. Voici la courbe obtenue:



On trouve une pente de 9.9 mV/10¹³ protons sur la cible. Ceci correspond à une sensibilité de 0.11 V/Gy(tissu). Ces résultats sont similaires à ceux attendus, bien que dans le cas du PSAIF, la saturation a lieu plus tôt (autour de 20 Gy).

Il fallait encore essayer de mettre en évidence l'inversion de la pente de la courbe et voir si ce phénomène pouvait être exploitable. Les irradiations ont donc été poursuivies un mois après les premières, ce qui explique que l'on observe un certain annealing indiqué par la flèche sur la figure suivante.

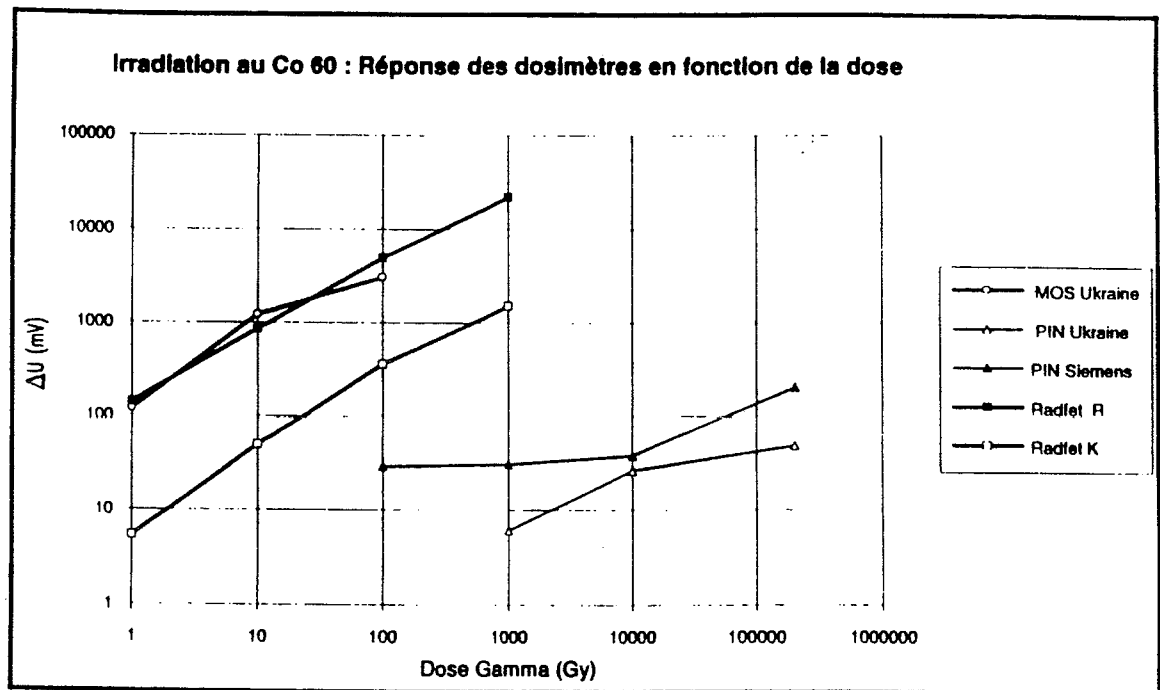


On observe bien que la courbe redescend mais la réponse donnée par les MOS est très instable et l'un d'entre eux donne une réponse erronée : il a certainement été endommagé par les radiations. Cette partie de courbe semble donc inexploitable.

III-3-2 Irradiations en Gammas

Afin de prouver que les diodes sont très peu sensibles aux Gammas, il était essentiel d'irradier les dosimètres en gammas purs. C'est pour cette raison que l'on a envoyé des échantillons au PSI et au Conservatoire. Le procédé n'a pas été le même que pour les irradiations au PSAIF dans la mesure où chaque dosimètre n'a été irradié qu'une fois à une dose bien déterminée. Chaque courbe concernant un type de dosimètre a donc été obtenue avec plusieurs dosimètres.

Voici donc le résultat obtenu après ces irradiations :



On remarque donc aisément que les transistors MOS sont beaucoup plus sensibles aux Gammas que les diodes (d'un facteur 10 à 100), mais surtout que la réponse des diodes est très faible comparée à celle qu'elles donnent en Neutrons : Pour 10^5 Gy (Gammas) on obtient une réponse d'une centaine de millivolts, ce qui correspond à des fluences de :

Quelques 10^{10} n.cm⁻² pour les diodes d'Ukraine
et 10^{12} n.cm⁻² pour les diodes BPW34.

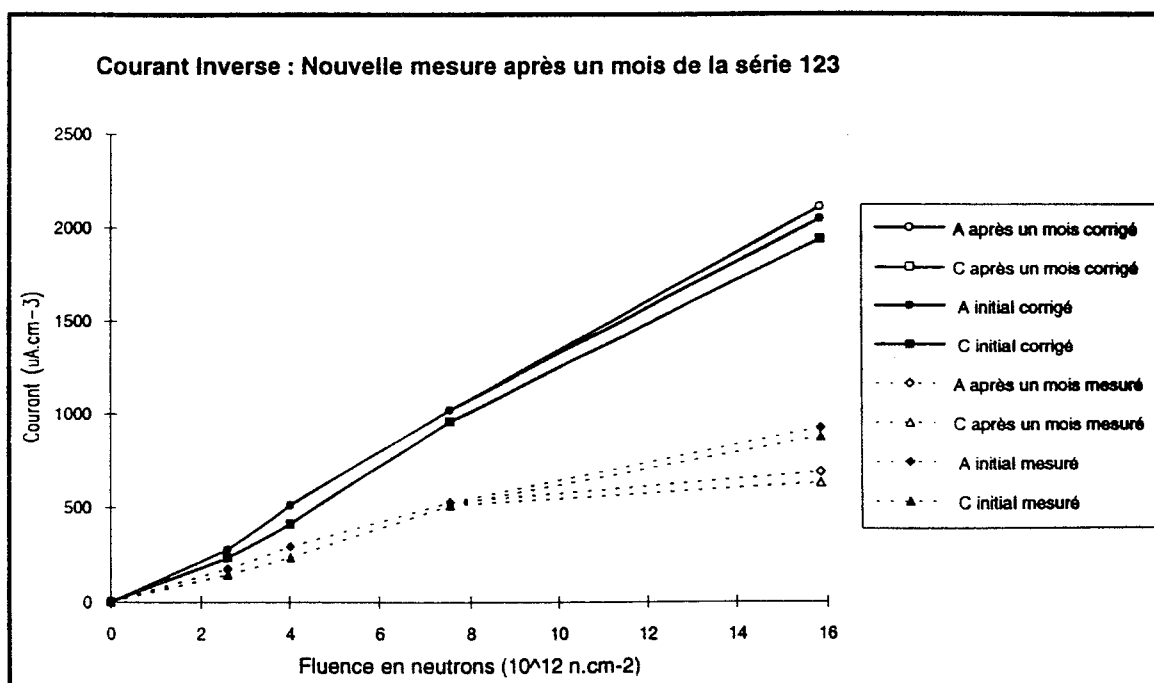
III-3-3 Comportement post-irradiation

III-3-3-1 *Les détecteurs UA2*

L'annealing (ou récupération) des détecteurs étant déjà pris en compte grâce aux coefficients de Lindström, aucune mesure supplémentaire n'a été faite dans ce sens. Par contre, il était essentiel de voir dans quelle mesure ces coefficients intervenaient :

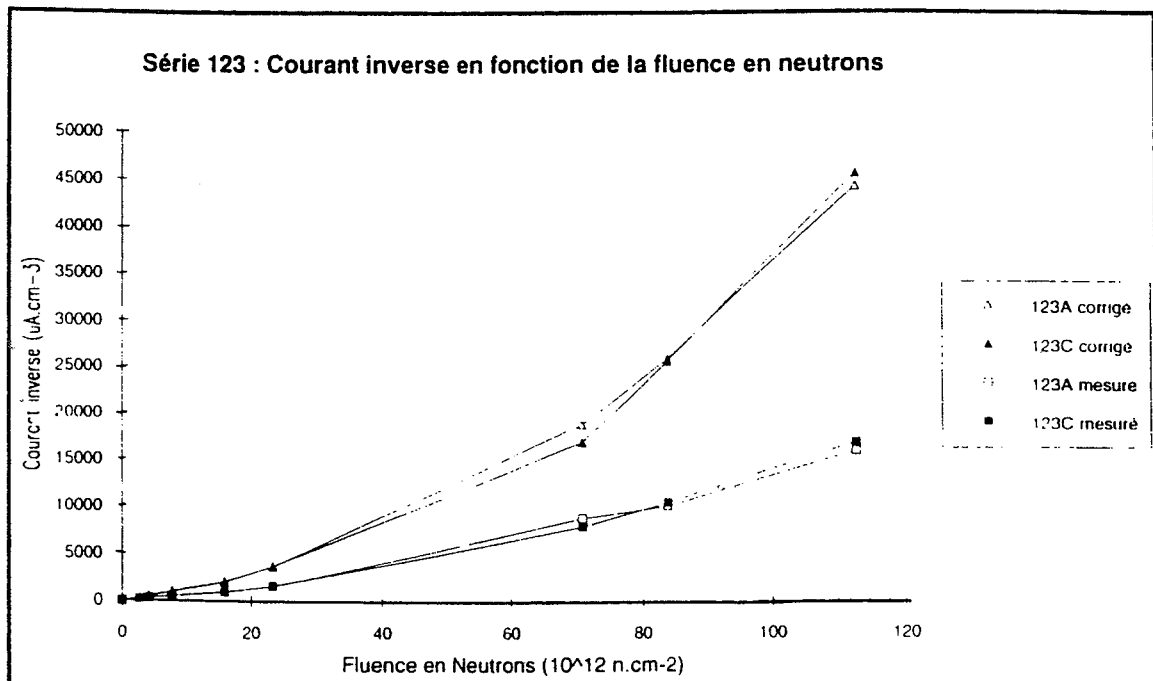
A/ Vérification des coefficients de Lindström après un mois

Afin de vérifier que la correction par les coefficients de Lindström est fiable, les détecteurs 123A et 123C ont été mesurés une seconde fois un mois après la première mesure effectuée pour une irradiation de $15.9 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}$. Les deux courbes obtenues sont les suivantes :



On observe un léger changement après un mois mais celui-ci n'est que de quelques %. Il semble donc que les coefficients de Lindström sont suffisamment fiables et n'introduisent une erreur supplémentaire que très minime quant à la détermination de la fluence.

Comme indiqué plus haut, les irradiations ont été poursuivies pour les détecteurs 123A et 123C. On peut donc représenter sur un même graphique le résultat de ces irradiations avec et sans correction par les coefficients de Lindström :

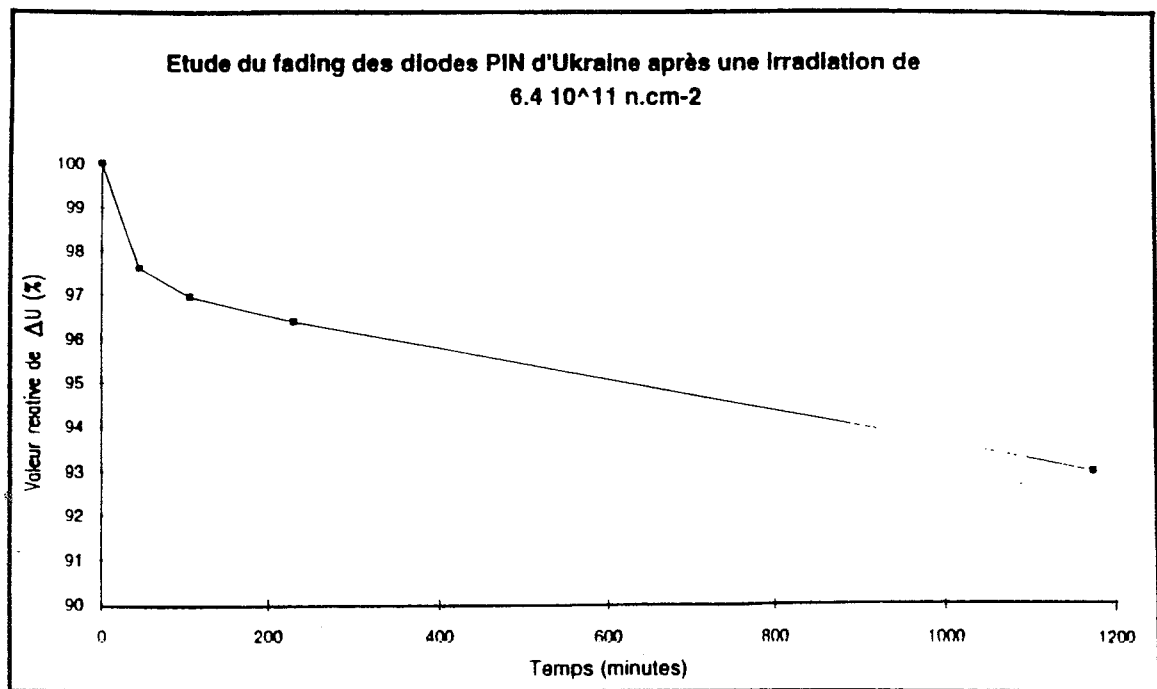


Il faut signaler que les mesures à l'aide du banc test ont été faites au bout d'un temps variable après l'irradiation : celui-ci pouvait aller de quelques heures à plusieurs jours. On observe donc que sans les coefficients de Lindström, l'on obtient une droite de pente $11.1 \mu\text{A.cm}^{-3}/10^{11} \text{ n.cm}^{-2}$ permettant une détermination de la dose à $\pm 13 \%$.

Par contre, en tenant compte de la correction, $I = f(\phi)$ est en fait une parabole, ce qui peut paraître un inconvénient car la réponse n'est pas proportionnelle à la fluence ; il ne faut cependant pas oublier que les coefficients de Lindström permettent une certaine normalisation et donc des résultats plus rigoureux.

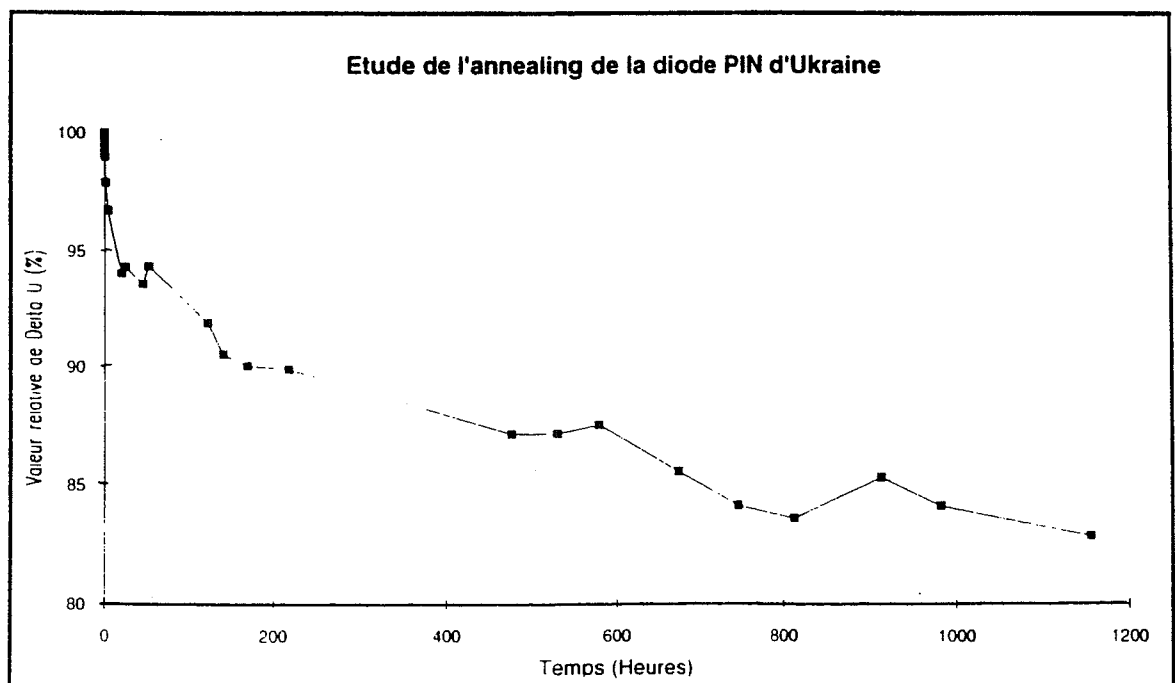
III-3-3-2 Les diodes PIN d'Ukraine

Au cours des irradiations, il est apparu intéressant d'évaluer l'annealing pendant un jour :



Les résultats sont semblables à ceux prévus, puisque l'on obtient un annealing de l'ordre de 7% au bout d'un jour, ce que l'INR avait annoncé.

Sachant que les dosimètres seront placés pendant une année dans le LHC, les comportements de ces diodes sur une longue durée se devaient d'être étudiés. Cette diode a été irradiée à une fluence de $1.5 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}$:

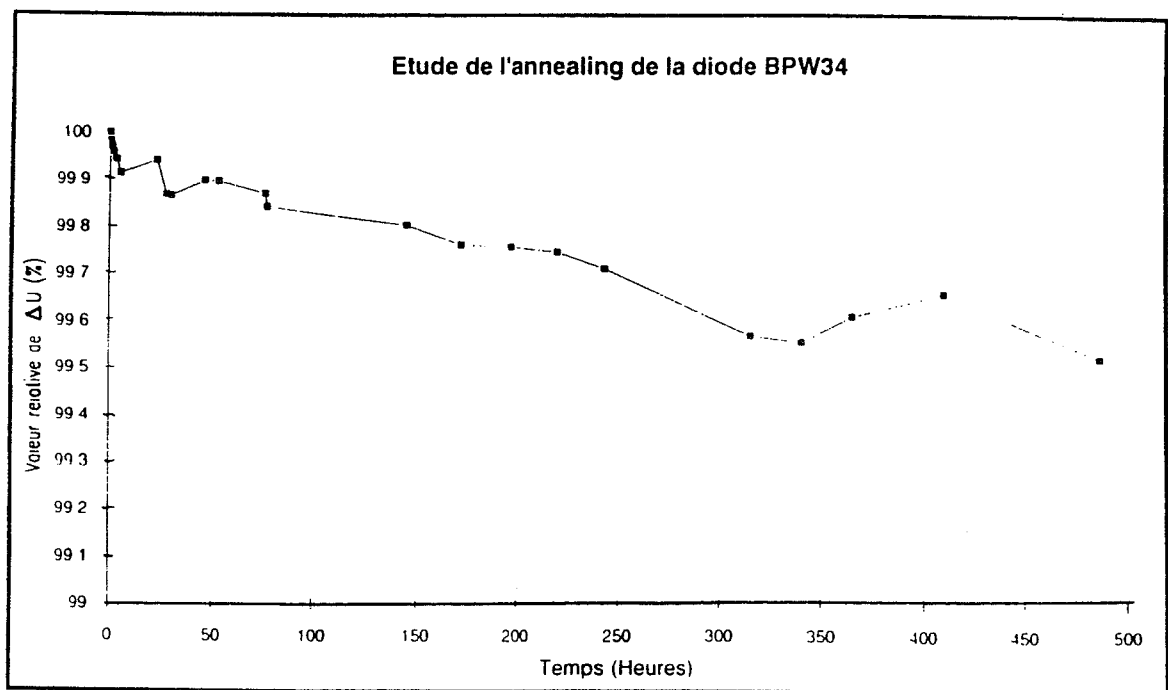


La courbe n'est pas toujours très régulière. Ceci est dû au fait qu'une seule diode a été testée (pour la seule raison que l'on n'en possédait qu'un nombre restreint).

Ces diodes sont très sensibles à la température : une variation de celle-ci de quelques degrés entraîne un changement de la réponse de plusieurs centaines de millivolts (environ $100\text{mV}/^{\circ}\text{C}$).

III-3-3-3 Les diodes BPW34

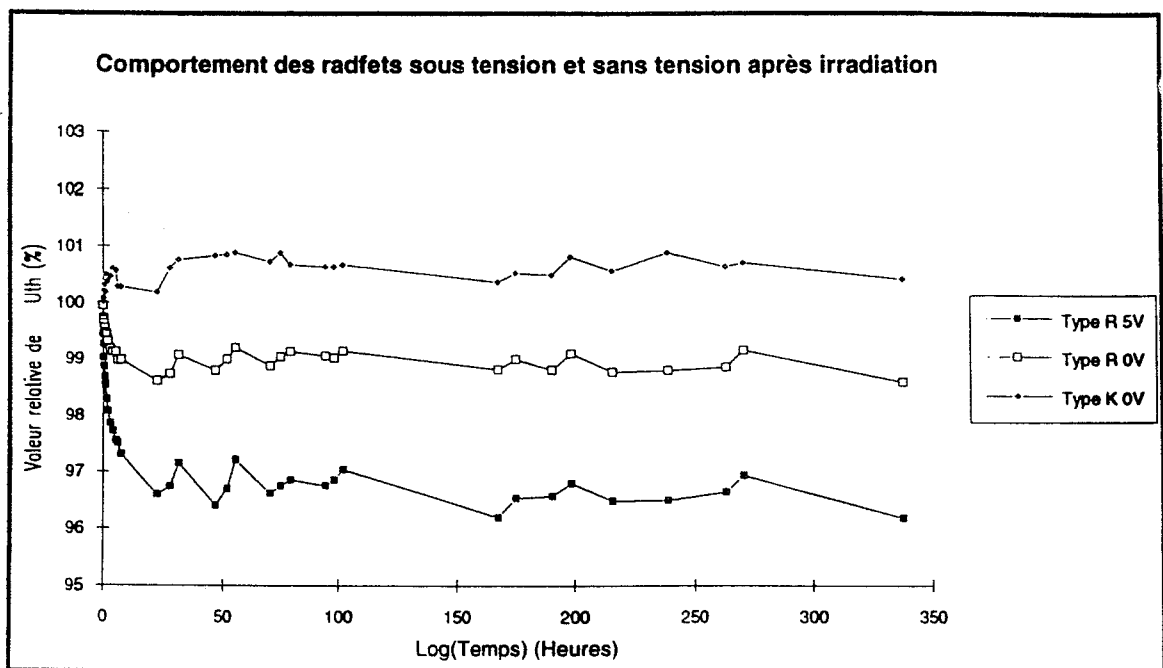
Cinq diodes ont été irradiées jusqu'à $2.53 \cdot 10^{13} \text{ n.cm}^{-2}$. Il était difficile de les irradier plus longtemps sans que le PSAIF s'arrête pour plusieurs heures, ce qui n'aurait pas convenu pour l'expérience. Leur réponse a été mesurée avec le Keithley 237. Voici le résultat :



On remarque que au bout de 21 jours, ces diodes n'ont perdues que 0.5% de leur réponse, ce qui est très peu comparé à la diode d'Ukraine. Les irrégularités de la courbe sont certainement dues à la température.

III-3-3-4 Les Radfets

Ayant vu que le fait d'appliquer une tension pendant l'irradiation modifiait la sensibilité, il semblait intéressant de savoir si le fait de laisser le Radfet sous tension après irradiation influence son comportement. Deux Radfets ont donc été irradiés au PSAIF, l'un sous une tension de grille de 5V et l'autre laissé de façon passive, à une dose de 19.4 Gy(γ). Cette valeur a été choisie de façon à ce que la réponse se situe encore dans la partie linéaire de la courbe $\delta U = f(\phi)$.



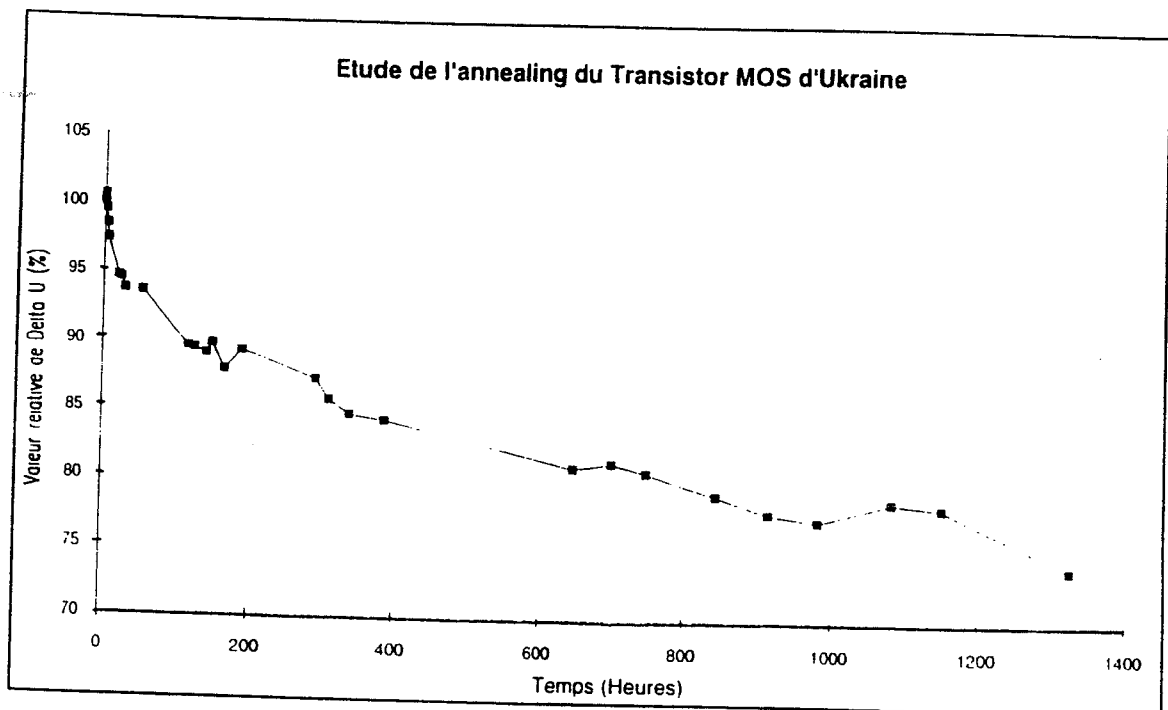
On peut d'ores et déjà dire que plus la sensibilité est élevée, plus l'annealing se fait ressentir. Cependant, on peut dire que celui-ci reste raisonnable, puisqu'au bout de deux semaines, le plus sensible n'a perdu que 4% de sa réponse initiale.

La courbe concernant le type K 5V n'a pas été représentée : celui-ci donne des variations allant de 95 à 120 % sans aucune régularité. Il ne semble pas que cela puisse provenir du fait qu'il restait sous tension puisque le type R sous tension ne montre pas d'incohérence. A-t-il été endommagé lors de l'irradiation? à cause de l'électricité statique? à cause d'une tension appliquée trop forte (rappelez vous que le type K sous 10 V lors des irradiations au PSAIF avait également été endommagé)?

Une dernière observation reste à faire : les trois courbes ont des irrégularités. Vous remarquerez qu'elles ont toutes lieu au même moment et dans le même sens. Il s'agit ici de l'effet de la température, ces radfets étant gardés dans une pièce à température ambiante qui varie de plusieurs degrés entre le matin après une nuit fraîche et l'après-midi quand le bâtiment se trouve exposé en plein soleil.

III-3-3-5 Les MOS d'Ukraine

Parmi les dix MOS d'Ukraine qui ont été irradiés au PSAIF, deux ont fait l'objet d'une étude de leur comportement après irradiation, bien qu'ils avaient déjà atteint leur saturation. La courbe ci-dessous a été obtenue après une irradiation de 280 Gy(γ).



On remarque que ces transistors ont un annealing assez prononcé. Il faut quand même dire qu'ils avaient déjà atteint la saturation avant d'étudier leur comportement post-irradiation. Il est fort probable que si les radfets avaient été étudiés après avoir été saturés, ils auraient présenté un annealing également très prononcé.

III-3-4 Analyse des résultats

Les diodes PIN et les MOS d'Ukraine ainsi que les radfets présentent des courbes très linéaires suivies d'une saturation. Déjà calibrés au Co 60 ou en neutrons, ils permettent de confirmer les résultats obtenus au PSAIF grâce à l'Alanine et aux mesures par activation. Cependant, ils restent trop sensibles pour être utilisés dans le futur LHC. L'INR prévoit à court terme de fabriquer des diodes à bases plus fines et des MOS avec une couche d'oxyde moins épaisse (0.05 μm).

Une solution aux problèmes de sensibilité, les diodes BPW34 : cent fois moins sensibles que les diodes d'Ukraine, elles ont une réponse linéaire en fonction de la fluence. Attention toutefois aux moyens de mesures. A noter : ces diodes sont, avec les détecteurs UA2, de loin les moins chers des dosimètres étudiés au cours de ce stage. De plus, la courbe $I = f(\phi)$ des détecteurs UA2 permet de déterminer la fluence en neutrons avec une assez bonne précision, bien qu'ils ne sont pas faits pour cela.

Les irradiations en γ ont montré que les diodes sont très peu sensibles aux rayonnements ionisants, ce qui est essentiel quand il s'agit de mettre au point un dosimètre séparant la dose γ de la fluence.

En ce qui concerne les comportements post-irradiation, tous les dosimètres étudiés ont un annealing acceptable, excepté les MOS et les PIN d'Ukraine. Pour les détecteurs UA2, il existe déjà des facteurs de correction qui semblent convenir jusqu'à une fluence de $2 \cdot 10^{13} \text{ n.cm}^{-2}$. Les courbes de calibration sont assez facilement réalisables, comparées aux études post-irradiation qui demandent beaucoup plus de temps : en effet, les dosimètres étant destinés à rester au minimum un an dans le LHC, il faudrait étudier leur comportement sur une année, et ceci pour plusieurs doses. Enfin, la température joue également un rôle essentiel dans le comportement de ces dosimètres, facteur à ne pas négliger pendant et après l'irradiation. Les résultats concernant les phénomènes post-irradiation obtenus au cours de ce stage ne sont que très peu à côté de tout ce qui reste à faire dans ce domaine, mais ils permettent déjà d'entrevoir les réponses à certaines questions.

Un tableau récapitulatif permet de passer en revue les résultats importants concernant ces dosimètres au silicium :

TYPE	SENSIBILITE	PLAGE DE MESURE	ERREUR SUR LA DETERMINATION DE LA DOSE	REMARQUES SUR LES EFFETS POST_IRRADIATION
Diode U/A2	$I_r = 111 \mu A.cm^{-3} / 10^{12} n.cm^{-2}$	de 5.10^{11} à plus de $10^{14} n.cm^{-2}$	$\pm 13\%$	avec les coefficients de Lindström la détermination de la dose est plus précise, mais $I_r = f(\phi)$ n'est plus une droite
Diode PIN d'Ukraine	$\Delta U_f = 4.3 V / 10^{12} n.cm^{-2}$	de 10^{10} à $10^{13} n.cm^{-2}$	$\pm 8\%$	très sensibles à la température annealing important
BPW34 (photodiode)	variref : $\Delta U_f = 53.5 mV / 10^{12} n.cm^{-2}$ keithley : $\Delta U_f = 36.5 mV / 10^{12} n.cm^{-2}$	de 10^{12} à plus de $2.10^{14} n.cm^{-2}$	variref : $\pm 15\%$ keithley : $\pm 7\%$	annealing faible
Radfet	R 0V : $\Delta U_{th} = 14.0 mV/Gy$ R 10V : $\Delta U_{th} = 1 V/Gy$ K 0V : $\Delta U_{th} = 6 mV/Gy$ K 10V : $\Delta U_{th} = 35 mV/Gy$	de 10^{-2} à $10^3 Gy$ de 10^{-2} à $60 Gy$ de 2 à $10^4 Gy$ de 2 à $5.10^3 Gy$	$\pm 5\%$	très sensibles à l'électricité statique annealing acceptable
MOS d'Ukraine	$\Delta U_{th} = 0.11 V/Gy$	de 0.3 à $20 Gy$	$\pm 7\%$	annealing assez important

CONCLUSION

Il reste encore beaucoup à faire dans ce vaste sujet qui m'a préoccupé tout au long de ces six mois...Malgré cela, cette première étude permet de rester tout à fait optimiste quant à la possibilité de mettre au point un dosimètre au silicium capable de séparer la dose gamma de la fluence en neutrons.

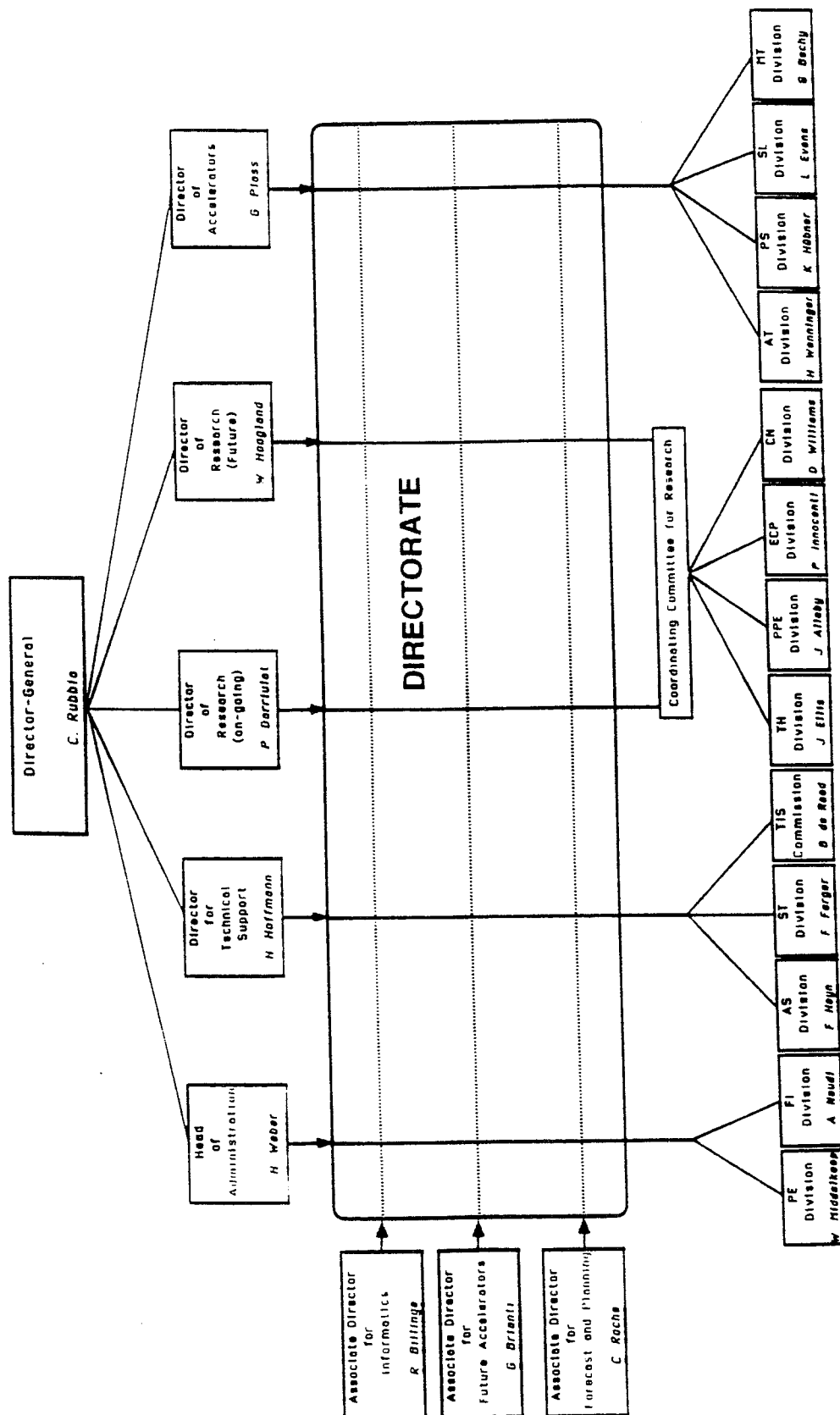
Je suis très heureuse d'avoir participé à l'avancement de ce projet autant pour le travail qu'il a nécessité que pour les personnes qu'il m'a permis de rencontrer.

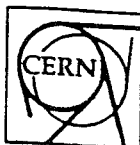
BIBLIOGRAPHIE

- A. B. Rosenfeld et al.: PIN diodes with a wide measurement range of fast neutron doses. Radiation protection dosimetry Vol 33 No 1/4 pp 175-178 (1990)
- P. W. Cattaneo : Calibration procédure for irradiation tests on silicon devices. IEEE transactions on nuclear science Vol 38 No 3 (June 91)
- P. G. Litovchenko, A. B. Rosenfeld et al.: MOS structure for emergency Gamma and Proton dosimetry. Radiation protection dosimetry Vol 33 No 1/4 pp 179-182 (1990)
- A. G. Holmes Siedle, L. Adams : pMOS dosimeters, long term annealing and neutron response. IEEE transactions on nuclear science Vol 33 No 6 (Dec. 1986)
- A. G. Holmes Siedle et al.: MOS dosimeters - improvement of responsivity. Conférence RadeCS 91, Montpellier.
- E. Heijne : Radiation damage in silicon detectors. CERN - PRE 88.061
- D. Pitzl et al.: Type inversion in silicon detectors. SCIPP 91/05 - July 1991 - E
- J.E. Gover, T.A. Fischer : Radiation hardened microelectronics for accelerators. IEEE transactions on nuclear science Vol 35 No 1 Febr. 88
- F. Lemeilleur et al.: Measurements of neutron-induced effects in silicon detectors and MOS capacitors. CERN/ECP 91-16 Sept 91
- F. Lemeilleur et al.: Neutron-induced radiation damage in silicon detectors. IEEE Nss Nov 91
- M. Tavlet, M.E. Leon Florian : PSAIF, the PS-Acol Irradiation Facility at CERN. IEEE catalog No 91TH0400.2 pp 582-585 (1991)
- F. Coninckx et al.: High level dosimetry results for the CERN high-energy accelerators. CERN-TIS-CFM/91-10 (1991)
- F. Coninckx et al.: Alanine dosimetry as the reference dosimetric system in accelerator environments. Appl. Radiat. Isot. Vol. 40 No 10-12 pp 977-983 (1989)

Annexe A : Organigramme du CERN

CERN ORGANIZATIONAL CHART 1992





EUROPEAN LABORATORY FOR PARTICLE PHYSICS

GENERAL INFORMATION 1992

Member States and their normalized contributions (%)

Austria	2.21	Netherlands	4.19
Belgium	3.00	Norway	1.45
Czech and Slovak Federal Republic	0.14	Denmark	1.76
Poland	0.12	Portugal	0.65
Finland	0.71	Spain	8.06
France	16.71	Sweden	3.30
Germany	22.06	Switzerland	3.78
Greece	0.40	United Kingdom	14.99
Italy	16.48		

Observers

Turkey, Yugoslavia, Israel, Russian Federation,
Commission of the European Communities
UNESCO

President of Council
President of the Scientific Policy Committee
Chairman of the Finance Committee

Sir William Mitchell (United Kingdom)
C.H. Llewellyn Smith (United Kingdom)
B. Brandt (Sweden)

INTERNAL STRUCTURE

Management

Director-General	C. Rubbia
Research Directors	P. Darriulat, W. Hoogland, J.J. Thresher
Director of Accelerators	G. Plass
Head of Administration	H. Weber
Director for technical tasks	H.F. Hoffmann
Associate Director for future Accelerators	G. Brianti
Associate Director for Informatics	R. Billinge
Associate Director for Forecast and Planning	C. Roche
Advisers to the Director-General	R. Klapisch, W.O. Lock, J.-P. Revol, J.A. Rubio
Head of Cabinet of the Director-General	G. Hentsch
Communication and Public Education	H. Miettinen
Legal Adviser	J.-M. Dufour
Council Secretariat	H. Schmal

Divisions

Theory (TH)	J. Ellis	Mechanical Technologies (MT)	G. Bachy
Experimental Physics (PPE)	J.V. Allaby	Technical Services (ST)	F.A. Ferger
Electronics and Computing		Finance (FI)	A.J. Naudi
for Physics (ECP)	P.G. Innocenti	Personnel (PE)	W. Middelkoop
Computing and Networks (CN)	D.O. Williams	Administrative Support (AS)	R.F. Heyn
Proton Synchrotron (PS)	K. Hubner	Technical Inspection and	
SPS + LEP (SL)	L.R. Evans	Safety Commission (TIS)	B. de Raad
Accelerator Technologies (AT)	H. Wenninger		
Pension Fund	C. Cuénoud	Staff Association	M. Borghini

OPERATION

1992 Budget (million S.F.) 945.47

1992 Breakdown of expenditure (million S.F.)		
	Research	231.57
	Accelerators and experimental areas	457.70
	Technical support	137.65
	Administrative support	118.54

Staff (total 3126 as of 31st December 1991)

research physicists	108	administrators	548
engineers and scientists	745	craftsmen	663
technicians	1094		

* to this one should add 165 fellows and 270 paid associates

Site	109 hectares in Switzerland
	487.5 hectares in France

ACCELERATORS

LEP	55 + 55 GeV Electron-positron Collider, 27 km in circumference
SPS	450 GeV Super Proton Synchrotron, 6.9 km in circumference
SPSp $\bar{p}$	315 + 315 GeV Proton-Antiproton ($p\bar{p}$) SPS Collider ring
PS	28 GeV Proton Synchrotron
LEAR	Low Energy Antiproton Ring
ISOLDE	Booster-ISOLDE Isotope Separator

EXPERIMENTAL PROGRAMME

Experiments running or in preparation

LEP	6 experiments installed
SPS	13 active, 5 being prepared
SPSp $\bar{p}$	1 active
PS LEAR	10 active, 1 being prepared
ISOLDE	6 being prepared
R & D	4 active, 18 being prepared

USERS

Number of Institutes and Universities participating in the above programme

Member States	164	Non-Member States	108
---------------	-----	-------------------	-----

Corresponding number of experimental physicists

Member States	3471	Latin America	39
Eastern Europe	95	Japan	71
CIS	209	People's Republic of China	79
USA	369	India	47
Canada	96	Other countries	149

Headquarters	Geneva
Telephone	Geneva (022) 767 61 11
Telefax	Geneva (022) 767 65 55
Telex	Switzerland : 4190000 CER CH
Postal addresses	Switzerland : CH - 1211 Geneva 23

Annexe B : Ma situation dans la division TIS

COMMISSION TIS

Chef: B. de Raad Tél. 2458-5097

Adjoint: G. Rau Tél. 2220-4860

Secrétariat: J. Guex Tél. 5097

Bureau du Chef de Division (DI)
Administration, cours sécurité, formation,
documentation, secrétariat DSOC, tél. 5097

Expertise ingénierie mécanique tél. 4616

RADIOPROTECTION (RP)

M. HÖFERT
tél. 4602-2156

Contrôleur uranium
M. Höfert tél. 4602

Nouveaux Projets (NP)
G.R. Stevenson tél. 4623

Contrôle rayonnements

- SPS/LEP (Section SL)
A. Fassò tél. 3937
- Site, Services, ISOLDE, SC
J.W.N. Tuyn tél. 4581
- Complexe PS
A.H. Sullivan tél. 3272

Dosimétrie et étalonnage
C. Raffnsøe tél. 4402
Film-Badges tél. 2155

Environnement tél. 4047-4040

SECOURS ET FEU (FB)

J.L. DENBLYDEN
tél. 6666

ACCIDENTS, FEU tél. 18

**SECURITE GENERALE, ELECTRIQUE ET
MECANIQUE + SUPPORT TECHNIQUE
(GS)**

G. RAU
tél. 2220-4860-4154

- Sécurité et Inspections
R. Bouquin tél. 2176
- Sécurité Expériences
G. Löhr tél. 5276
- Support technique
B. Moy tél. 4154
- Support software
L. Tausch tél. 5280

SERVICE MEDICAL (ME)

E. MAQUET
tél. 4166-3156-3186

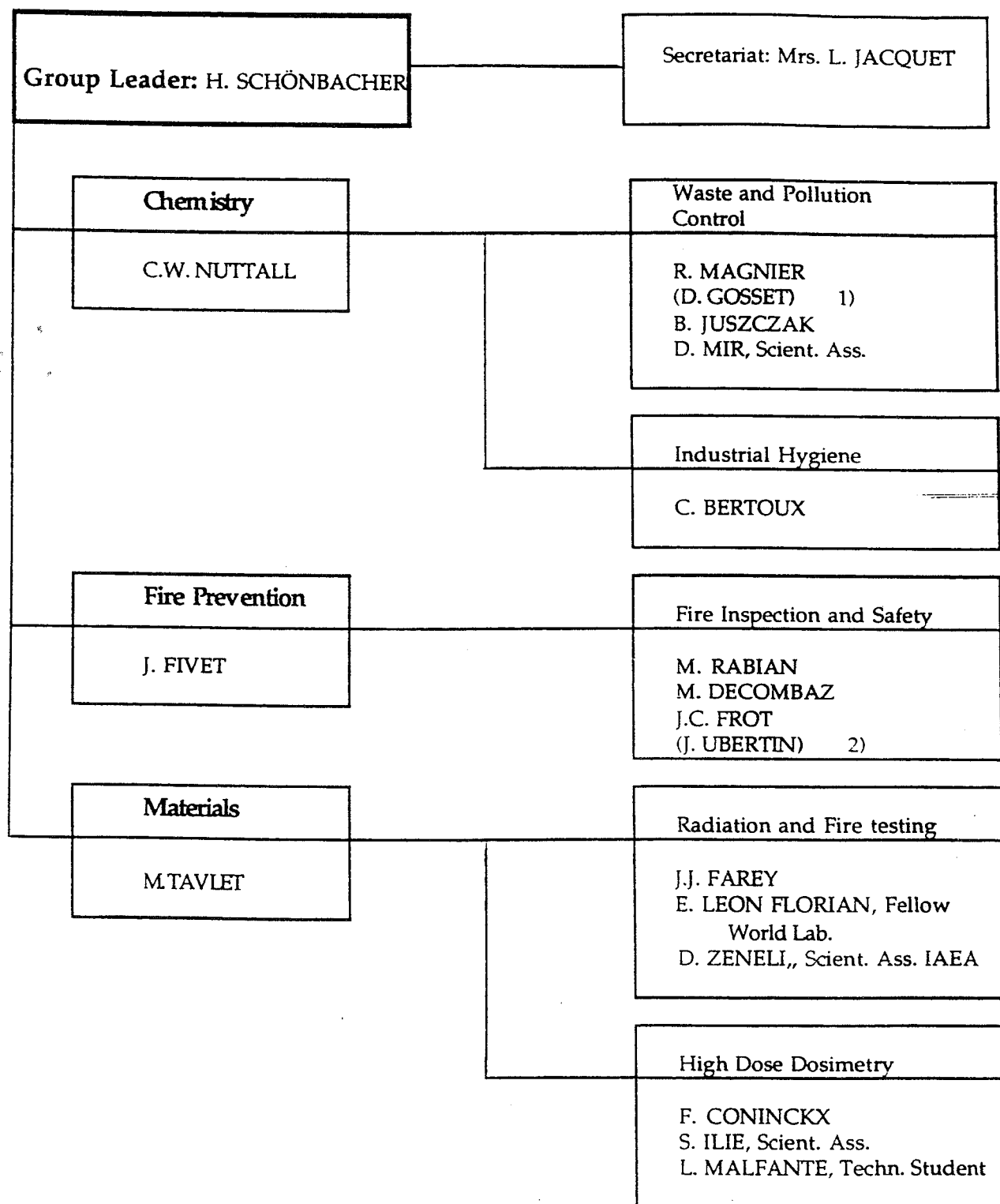
Infirmierie/
premiers soins tél. 3802

CHIMIE, FEU ET MATERIAUX (CFM)

H. SCHÖNBACHER
tél. 5288-3375

- Gaz, produits chimiques
C.W. Nuttall tél. 3583
- Prévention feu
J. Fivet tél. 6665
- Matériaux et dosimétrie
M. Tavlet tél. 3717.

ORGANIZATION TIS CHEMISTRY, FIRE AND MATERIALS GROUP



1) 100 % sick leave as from June 1990

2) On paid leave, early departure

