

FR 850 2820

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

CEA-CONF - - 7872

M2

TENUE AUX RAYONNEMENTS ET QUALIFICATION NUCLEAIRE
DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES SEMICONDUCTEURS

FRIANT, A.; PAYAT, R.

- CEA, CEN Saclay, IRDI, DEIN

Communication présentée à : International symposium on aging in tests of
safety equipment for nuclear power plants
Paris (France) 13-16 May 1984

I - INTRODUCTION

Un allègement significatif de l'ensemble des équipements de contrôle-commande des réacteurs nucléaires et notamment du nombre de traversées de l'enceinte étanche pourrait être obtenu par une utilisation plus intensive d'équipements électroniques à l'intérieur de cette enceinte.

L'amélioration spectaculaire de la résistance de certains composants semiconducteurs à des environnements hostiles (température, rayonnement, humidité, chocs, accélérations) et leur utilisation dès à présent dans des techniques comme les systèmes d'armes, les expériences spatiales, la recherche pétrolière, où les contraintes sont parfois plus sévères, militent en faveur d'une utilisation accrue dans les réacteurs (du moins pour les matériels de classe K2) ainsi que dans les usines de retraitement (robotique).

Après un rappel de l'action des rayonnements sur les semiconducteurs et de leurs effets sur les principaux types de composants nous tenterons d'analyser les principales questions qui se posent pour la qualification des équipements électroniques à semiconducteurs susceptibles d'être introduits dans une centrale nucléaire. Pour cela nous montrerons la spécificité des problèmes rencontrés dans l'industrie nucléaire par rapport à ceux qui se posent dans les applications militaires et spatiales par exemple, où des solutions acceptables ont été trouvées pour le "durcissement" des composants et la simulation des environnements réels auxquels ils devront résister.

Nous tenterons de définir les grandes lignes à suivre pour la qualification des équipements électroniques dans le domaine de l'industrie nucléaire en fonction de ses impératifs propres.

II - RAPPEL DES MECANISMES DE DETERIORATION DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES

EFFETS DES RAYONNEMENTS

II.1 - Action des rayonnements sur les semiconducteurs

- Les particules chargées traversant un semiconducteur interagissent avec ce dernier en lui cédant leur énergie et leur charge suivant trois modes principaux :
 - l'ionisation : les particules en interaction avec le cortège électronique arrachent des électrons qui ionisent à leur tour et dont les plus énergiques ont un parcours appréciable vis à vis des dimensions du composant. Ce mécanisme sera responsable des phénomènes temporaires (courants d'ionisation) mais aussi de phénomènes permanents (transfert de charges à travers les interfaces).
 - les déplacements atomiques : la collision élastique d'une particule avec le noyau d'un atome (essentiellement en fin de parcours) provoque le déplacement de l'atome dans le réseau cristallin. L'atome de recul provoque à son tour dans son voisinage une cascade de déplacements ("cluster") conduisant à l'apparition de vacances (sites cristallins vides) et d'interstitiels. Ces phénomènes sont permanents et donc cumulatifs au cours de la vie du composant.
 - les réactions nucléaires : les chocs inélastiques avec les noyaux des atomes du semiconducteur peuvent provoquer, pour les particules de très grande énergie, des réactions nucléaires.
- Les neutrons n'étant pas chargés n'ionisent pas directement mais interagissent directement avec les noyaux des atomes et peuvent leur communiquer une énergie élevée. Il en résulte :
 - soit un déplacement d'atomes dont l'énergie est assez élevée pour provoquer une cascade de déplacements (plus d'une centaine pour 1 neutron de 1 MeV) et la formation de grappes de défauts ("clusters") ;
 - soit une réaction nucléaires ; dans le cas du Si en particulier, il y a production de ^{31}P . Or le phosphore est un donneur dans le Si ; le changement de dopage n'est cependant notable que pour des flux intégrés élevés ($10^{16} n_{th} \text{ cm}^{-2}$).
- Les photons γ , comme les neutrons, ne sont pas directement ionisants. Leurs effets dans les composants, se manifestent principalement par l'intermédiaire des électrons créés au cours de leur interaction avec la matière par effets photoélectrique, Compton et de production de paires.

Leur action sera donc de même nature que celle des rayonnement β , mais à la différence de ces derniers qui ont un parcours relativement faible dans les solides et qui interagissent principalement en surface, les photons, même d'énergie modeste, créent des électrons dans tout le volume des composants.

Les tableaux I et II résument les phénomènes principaux produits dans les composants semiconducteurs (essentiellement le Si) par les neutrons d'une part, par les photons γ et les rayonnements β d'autre part.

Dans le cas des neutrons (tableau I) tous les phénomènes conduisent à des défauts permanents (déplacements et transmutations) qui provoquent des dérives des caractéristiques des composants croissant avec la dose intégrée. L'effet majeur est celui causé par les déplacements d'atomes et plus spécialement par la formation de "clusters" en raison de l'énergie élevée de l'atome de recul.

L'irradiation γ (tableau II) se traduit par la création dans tout le volume du composant d'électrons d'énergie égale (effet photoélectrique) ou inférieure (effets Compton et de production de paires) à celle du photon. Suivant leur énergie ces électrons produisent dans les semiconducteurs trois effets principaux :

- l'excitation électronique, phénomène transitoire très bref qui modifie provisoirement certaines propriétés des atomes.
- l'ionisation, phénomène transitoire également, qui provoque la création d'un grand nombre de paires électron-trou. Dans les zones où règne un champ électrique, (zones désertées des jonctions), ceci conduit à la naissance des photocourants primaires eux-mêmes à l'origine des photocourants secondaires qui peuvent être très importants (dans un transistor par ex.). Dans les zones isolantes il se produit une accumulation de charges. Aux débits de dose faibles il y a augmentation des courants de fuite et du bruit, mais, dans le cas de débits de dose élevés ("flash γ "), l'amplitude des photocourants est telle qu'elle conduit à la saturation puis au blocage des dispositifs ou, en raison de la puissance dissipée, à l'emballage thermique et à la destruction.

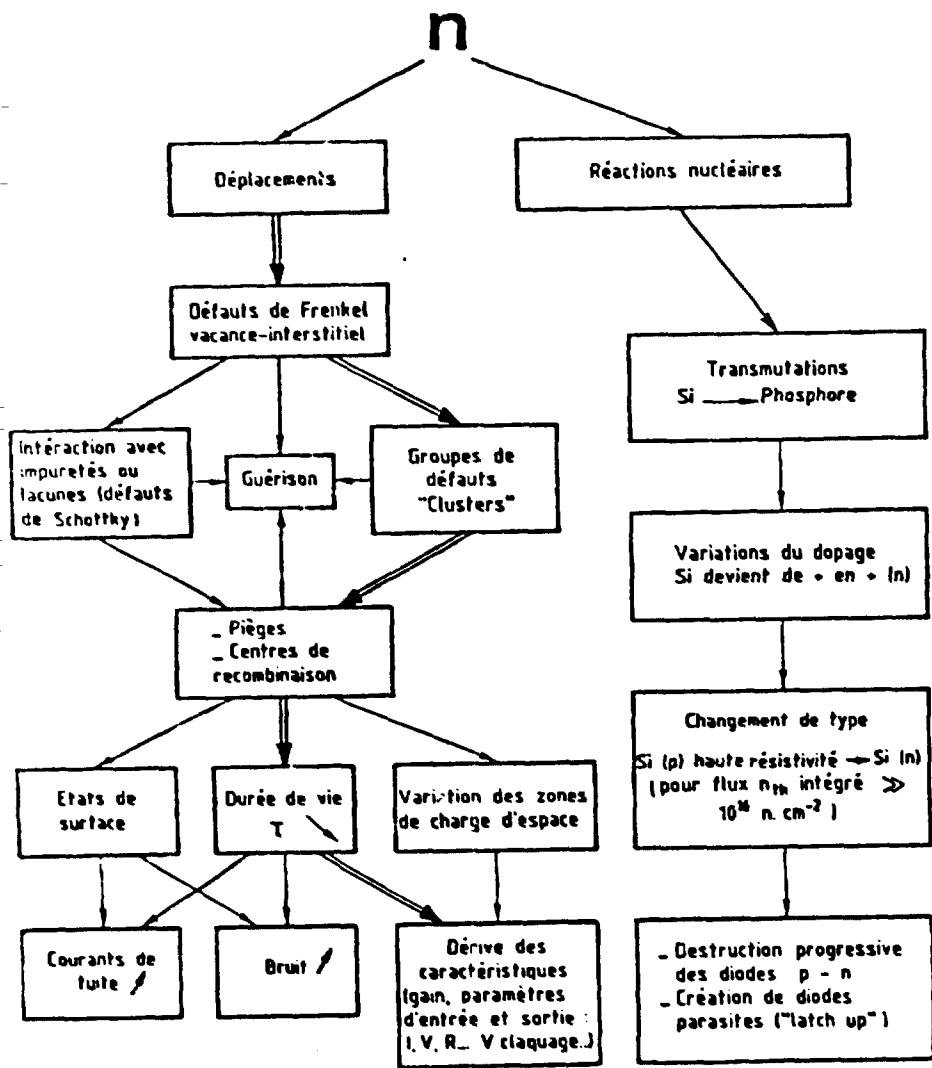


TABLEAU I

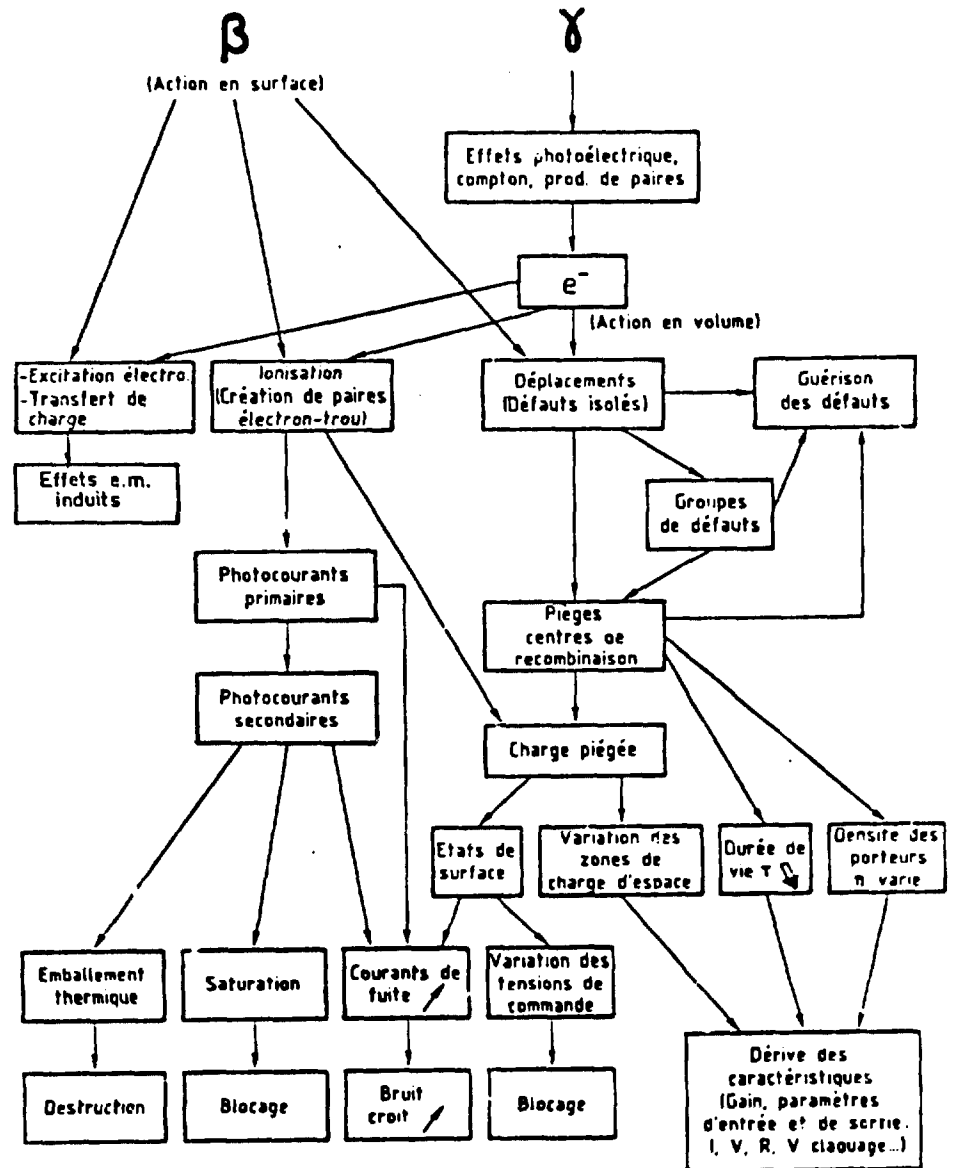


TABLEAU II

- les déplacements d'atomes se produisent pour les électrons ayant une énergie supérieure à une valeur seuil (de l'ordre de 150 keV) et donnent naissance à des défauts isolés (lacunes-interstitiels) ou des groupements de tels défauts ("clusters"). A énergie égale le nombre de déplacements provoqué par un électron (et donc un photon) est très inférieur à celui provoqué par un neutron (plus d'un dr. de grandeur pour les défauts isolés et plus les deux ordres de grandeurs pour les clusters). Contrairement aux deux phénomènes précédents qui étaient transitoires, les déplacements créent des défauts permanents et donc cumulatifs au cours de l'irradiation. Une partie de ces défauts cependant est guérie au cours du temps et cette guérison est fortement accélérée lorsque la température est supérieure à la température ordinaire (recuit).

Les défauts introduits, dont le nombre est proportionnel à la dose γ intégrée par le dispositif, peuvent agir :

- comme centre de recombinaison des porteurs de charge (électrons et trous).
- comme pièges pour les électrons ou les trous.

Il en résulte une diminution de la durée de vie des porteurs, la création d'états chargés dans le volume du semiconducteur et aux interfaces, une variation de la densité des porteurs libres. Ces phénomènes se traduisent par une dérive continue des caractéristiques (gain, courants, tensions de saturation et de claquage ...) en fonction de la dose intégrée. La dose maximum admissible, dans ces conditions, est essentiellement fonction de la sévérité des critères de dérive qui sont imposés dans une application donnée et du paramètre que l'on considère.

En considérant le tableau II on se rend compte aisément de la différence fondamentale qui existe entre :

- une irradiation continue à débit de dose faible ou moyen (cas de l'industrie nucléaire).
- et une irradiation extrêmement brève à débit de dose énorme (cas concernant les applications militaires ou les accidents nucléaires).

Dans le premier cas les photocourants sont faibles ou moyens et conduisent à une augmentation des courants de fuite et du bruit électronique du dispositif ; ce seront les déplacements d'atomes qui constitueront la cause presque exclusive de détérioration des caractéristiques (voie de droite sur le tableau II).

Dans le second cas c'est l'ionisation (voie de gauche qui est à l'origine des photocourants transitoires très élevés dont la conséquence sera, dans la meilleure hypothèse la saturation puis le blocage temporaire du circuit, et dans le cas de débits de dose très élevés, la destruction du composant, soit par emballement thermique, soit par des mécanismes ne provenant pas du semiconducteur lui-même. Ainsi l'absorption des photons γ est fortement différente dans les matériaux entourant le semiconducteur si leur numéro atomique Z n'est pas voisin (loi en Z^3 pour des photons de l'ordre du MeV). Ceci provoque des contraintes thermiques qui occasionnent des ruptures (contacts par ex.) et dans certain cas pour des éléments à Z élevé il peut y avoir fusion du fait de l'énergie transitoire absorbée ; c'est le cas notamment des fils d'or qui assurent les connexions sur les "puces".

II.2 - Action des rayonnements sur les composants électroniques courants

Nous avons résumé ci-dessous, à titre indicatif, les principaux mécanismes conduisant à la modification des caractéristiques des composants usuels, même si ceux-ci sortent du cadre strict des composants semiconducteurs.

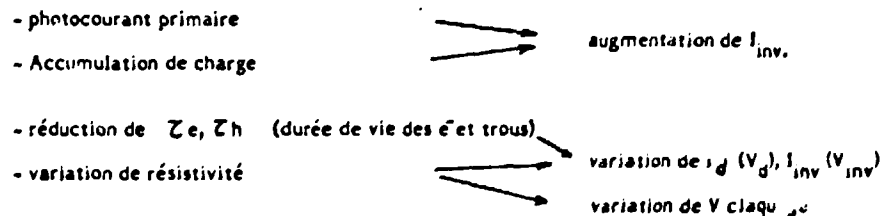
- Condensateurs



- Résistances, inductances, enrobages, câblages

- transferts de charges entre interfaces (métal-isolant, air-métal,
- courants parasites

- Diodes



- Transistors bipolaires

- photocourant primaire → photocourant secondaire → augmentation de I_{CB0} et I_{CE0}
 - pièges → réduction de τ_e, τ_h → baisse de h_{fe} (gain en émetteur commun)
 - changement de résistivité → variation de $V_{claquage}$
 - charge piégée dans isolants
 - ionisation du gaz d'encapsulation
- } courants de fuite - baisse du gain

- Transistors à effet de champ à jonction (JFET)

- surtout sensibles aux photocourants, à la charge piégée et aux effets de surface

- M.O.S. et M.I.S

- effet dominant est la charge piégée dans l'oxyde ou l'isolant
- } modification de la tension de commande de porte
} baisse de transconductance

- Circuits intégrés LSI - VLSI

- comportent essentiellement les structures citées plus haut (diodes, transistors, structures MOS) associées avec des degrés de complexité et de miniaturisation croissants ;
- phénomènes de base identiques à ceux indiqués ci-dessus mais difficilement prévisibles du fait de la complexité et des effets cumulatifs ou compensateurs
- phénomènes propres à chaque technologie (Ex. : "latch-up" dans CMOS)

- Composants optoélectroniques

- Photodiodes, phototransistors, photoconducteurs :
 - très sensibles aux effets transitoires → photocourants
 - peu sensibles aux effets permanents (déplacements) qui diminuent progressivement la sensibilité lumineuse
- Diodes électroluminescentes
 - réalisées dans des matériaux fortement dopés elles sont relativement peu sensibles aux radiations
- Diodes lasers : très résistantes
- Fibres optiques :
 - défauts et pièges chargés → pertes optiques
 - les fibres avec un coeur en silice gainé silicone sont les plus résistantes aux γ

- Composants divers :

- oscillateur à quartz : charge piégée dans isolant + déplacements → variation du module d'élasticité : pour 10^6 rad, $\frac{\Delta f}{f} \sim 10^{-7}$
- capteurs piézoélectriques : variation de la polarisation du matériau → dérive de la fréquence de résonance pour des doses relativement modestes .

D'une manière générale la dose maximale admissible se situe, avec les réserves que nous avons évoquées sur les conditions de test, entre :

- 10^8 à 10^{11} rad pour les résistances,
- 10^8 et 10^{10} rad pour les condensateurs inorganiques,
- 10^3 à 10^6 rad (Si) pour les composants semiconducteurs

III - SPECIFICITE DU PROBLEME POSE DANS L'INDUSTRIE NUCLEAIRE VIS A VIS DES DOMAINES MILITAIRE ET SPATIAL

Applications militaires :

C'est essentiellement la tenue à un "flash γ " (ou γ -n) très intense qui se pose ici, pour garantir la fiabilité des systèmes d'armes vis à vis d'éléments perturbateurs extérieurs (anti-missiles par ex.), soit pour permettre l'étude des explosions nucléaires. L'équipement électronique, en général aveuglé pendant un court instant, doit redevenir opérationnel immédiatement après cette bouffée de radiations ou dans les cas les plus contraignants rester opérationnel durant cette bouffée.

Le but recherché est tout d'abord d'éviter la destruction des dispositifs lors de ce phénomène transitoire (par emballement thermique, contraintes thermiques et mécaniques liées aux différences de numéro atomique des matériaux....). L'impératif second est de minimiser les effets mémorisés dans les composants (charges accumulées, défauts créés, changement d'état logiques,) effets qui peuvent être du soit au débit de dose élevé soit à la dose totale intégrée.

Applications spatiales

Les expériences embarquées au cours des missions spatiales sont composées presque entièrement de matériel électronique qui subit les effets de l'environnement spatial, à savoir :

- les ceintures de Van Allen, entre quelques centaines de km et 12 000 km d'altitude environ ; elles sont constituées essentiellement d'électrons et de protons ;
- les particules (protons) émises lors des éruptions solaires ;
- les particules d'origine galactique (rayonnement cosmique) constituées de particules chargées de très grande énergie.

Ce sont les ceintures de Van Allen qui présentent les flux de particules les plus intenses et les plus gênantes (10^6 protons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ d'énergie > 4 MeV et 10^8 électrons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ d'énergie $> 0,5$ MeV) surtout pour les satellites sur orbites basse ou moyenne (satellites d'observation de la terre) qui traversent plusieurs fois par jour les zones de flux élevé de ces ceintures.

Les satellites géostationnaires (orbite moyenne à 36 000 km ne subissent ces ceintures que lors du lancement et sont donc soumis essentiellement au rayonnement cosmique.

Quand aux missions vers les autres planètes elles subissent également à leur voisinage les ceintures de Van Allen de ces dernières.

Dans les applications spatiales les effets des radiations sont pratiquement imputables en totalité à des particules chargées, les flux de photons γ et X (γ compris le bremsstrahlung) étant comparativement faibles.

Si on excepte les capteurs (détecteurs de rayonnements, de lumière, ...) une grande partie des électrons et des protons peut être arrêtée par un blindage ; ainsi 2 mm d'Al arrêtent les électrons d'énergie inférieure à 1,2 MeV et les protons d'énergie inférieure à 15 MeV. Mais ceci peut occasionner un surcroît de poids et l'utilisation de composants durcis sera le plus souvent souhaitable.

Quand aux rayonnements cosmiques leurs effets les plus gênants sont provoqués par la très forte densité de charges qu'ils créent ponctuellement dans des microcircuits (mémoires, C.C.D, systèmes microprogrammés) en changeant par exemple certains états logiques. Ces effets peuvent être notablement atténués par la mise au point de logiciels spéciaux (redondance par exemple).

Industrie nucléaire

A l'heure actuelle on n'utilise pratiquement pas d'électronique dans les zones actives des installations industrielles nucléaires. Les domaines où l'introduction de matériel électronique moderne dans de telles zones serait le plus souhaitable sont :

- l'enceinte étanche des réacteurs à eau pressurisée, ce qui permettrait en particulier une réduction importante du nombre de câbles sortant de cette enceinte et une simplification notable des ensembles de contrôle et de commande ;
- les installations de traitement et de manipulation des combustibles irradiés où une robotisation et une télécommande intégrale des opérations semble la seule solution pratique en raison des débits de dose élevés dans les cellules actives.

Les composants devront subir dans ces deux cas soit une irradiation de très longue durée à débits de dose γ (ou γ -n) faibles ou moyens (enceintes de réacteurs), soit une irradiation de longue durée (de l'ordre de l'année) à débit de dose $\gamma + \beta$ moyens ou relativement élevé (cellules de retraitement).

Le problème rencontré est le plus souvent fondamentalement différent de celui rencontré généralement dans les applications militaires (bouffée γ -n très intense mais très brève) ou dans les applications spatiales (défauts créés par des particules chargées de grande énergie). Les différences proviennent aussi bien du mécanisme de détérioration ou de mise hors service des composants que de la méthodologie à mettre en oeuvre pour, dans un premier stade, prévoir leur comportement à long terme sous rayonnement, et dans un deuxième stade, améliorer ce comportement (composants ou circuits "durcis").

IV - PROBLEME DE LA QUALIFICATION NUCLEAIRE DES COMPOSANTS ET EQUIPEMENTS ELECTRONIQUES A SEMICONDUCTEUR

Dans le tableau III nous avons tenté de schématiser les impératifs qui se posent dans l'industrie nucléaire par rapport aux applications militaires et spatiale où un effort très important a été effectué pour la qualification de composants "durcis".

L'impératif essentiel dans un réacteur se résume à un fonctionnement sans défaillance, pendant de très longues périodes (plus de 20 ans si possible) sous irradiation γ continue à faible débit de dose. Cet impératif diffère sensiblement de ceux des systèmes d'armes et des matériels embarqués dans l'espace qui doivent résister à des "bouffées" γ et n d'une part, e^- et protons d'autre part, à très forts débits de dose (effets transitoires) et aussi fonctionner après des doses intégrées élevées (effets permanents). La simulation de ces conditions se fait généralement par des irradiations pulsées (γ et n) ainsi que des irradiations γ continues à très fort débit de dose (10^5 à 10^6 rad.h⁻¹ de ⁶⁰Co) dans le cas des applications militaires, des irradiations p ou e^- de grande énergie auprès d'accélérateurs, dans le cas des équipements spatiaux.

Si l'on se réfère aux tableaux II et III on constate que les mécanismes de détérioration ou d'évolution des composants diffèrent totalement en ce qui concerne les effets transitoires et ont pour seul point commun les effets permanents dus aux déplacements d'atomes (essentiellement de fauts isolés) et à la charge piégée.

Même en ce qui concerne ces effets permanents il y a lieu d'être très prudent dans la transposition à l'industrie nucléaire des doses maximales admissibles publiées dans la littérature scientifique pour les raisons suivantes :

- une grande majorité des résultats publiés concerne des doses admissibles obtenues par sommation des doses intégrées à chaque bouffée très courte (10^{-8} à 10^{-6} s) et à très fort débit de dose (couramment 10^{10} à 10^{12} rad.s⁻¹), ou pour des irradiations continues courtes à très fort débit de dose (10^5 à 10^6 rad.h⁻¹), ou sur des composants spéciaux non disponibles commercialement ;
- les effets permanents, pour une même dose intégrée peuvent différer notablement suivant le débit de dose (guérison des défauts), suivant que des effets transitoires ont eu lieu pendant l'irradiation ou non (état de charge des pièges créés), suivant que le composant est en fonctionnement ou non pendant l'irradiation,
- la dérive des paramètres d'un composant ne suit pratiquement jamais une loi linéaire en fonction de la dose intégrée et très souvent cette loi n'est pas monotone (ex. fig. 2) et un trop fort débit de dose peut occulter des phénomènes se produisant à des doses intégrées moyennes, le composant retrouvant des caractéristiques acceptables pour des doses intégrées supérieures.

En fonction de ces conditions très complexes et variables d'un type de composant à l'autre, un certain nombre de règles fondamentales sont à respecter pour la qualification de composants pour l'industrie nucléaire et notamment pour les réacteurs nucléaires (en se limitant dans un premier stade aux matériels de classe K2) :

- nécessité de rechercher des conditions d'irradiation de qualification simulant au mieux les conditions d'utilisation (comme cela est réalisé dans les domaines militaire et spatial pour leurs impératifs propres), c'est à dire :
 - irradiation γ continue,
 - durée d'irradiation la plus longue possible,
 - équipement électronique ou composants en fonctionnement continu pendant l'irradiation (et non irradiation statique),
 - contrôle permanent ou à intervalles de temps rapprochés des caractéristiques pendant l'irradiation,
 - recherche des paramètres les plus significatifs pour chaque composant ou pour chaque fonction électronique,
 - étude, sur les mêmes composants, de l'action des rayonnements à différents débits de dose, de manière à rechercher une corrélation permettant de prévoir, en un laps de temps acceptable (< 1 an par ex.) sinon le comportement à long terme du composant pour des débits de dose plus faibles, du moins une limite supérieure des dommages qu'il subira.
 - prise en compte des autres facteurs liés à l'environnement dans un réacteur sur le vieillissement des équipements (température, humidité,....)

Cette recherche des doses maximales admissibles devra s'effectuer :

- sur les composants d'une part
- sur des fonctions électroniques complètes d'autre part qui seront assurées par des circuits spécialement conçus pour admettre une grande dynamique de variation des paramètres des composants.

	APPLICATIONS MILITAIRES	APPLICATIONS SPATIALES	INDUSTRIE NUCLEAIRE	
			Réacteurs (matériel classe K2)	Usines de retraitement
Rayonnement	n et γ - X	e^- , P, cosmiques	γ	γ
Débit de dose	Très élevé	- élevé dans ceintures de Van Allen - moyen ailleurs	Faible	Moyen à élevé
Impératifs principaux	1 - Résister à un "flash" γ ou n très intense (effets transitoires) 2 - Fonctionner pour une dose intégrée élevée (effets permanents)	- Résister et fonctionner pendant les traversées des ceintures de radiations	Fonctionner sous irradiation continue pendant de très longues périodes > 20 ans ~ 1 an	
Effets transitoires	- Photocourants ¹ aires ² aires - Effets thermiques - Effet e.m. induits	- Photocourants pendant les traversées des ceintures de radiations	Négligeables	- Photocourants pendant les périodes d'exposition max.
Effets permanents	- Déplacements d'atomes : → { - défauts isolés (γ) - grappes de défauts (n) - pièges ($\gamma + n$) - Réactions nucléaires (n) - Accumulation de charge	- Déplacements d'atomes : → { - défauts isolés (e^-) - grappes de défauts (P) - pièges ($e^- + p$) - Réactions nucléaires (P) - Accumulation de charge - Changement d'état logique (cosmiques)	- Déplacements d'atomes : → { - essentiellement défauts isolés (γ) - pièges - Accumulation de charge	
Essais de qualification	Simulent de manière acceptable les conditions réelles		? à définir pour les conditions spécifiques aux réacteurs et usines -----	
	- Irradiation pulsée à très fort débit de dose (10^{10} à 10^{12} rad.s ⁻¹ , durée 10^{-8} à 10^{-6} s.) - débit de dose max. admissible - dose max. admissible par \sum des doses par bouffée - Irradiation continue (^{60}Co) mais à très forts débits de doses (10^4 à 1 Mrad.h^{-1} typiquement)	- Irradiation auprès d'accélérateurs (p, e^-)	- Irradiation en fonctionnement continu à débits de dose faibles ou moyens - Irradiation à différents débits de dose → corrélation entre effets à différents débits de doses pour permettre des essais de qualification d'une durée acceptable (< 1 an) - Prise en compte des autres facteurs liés à l'environnement (température, humidité, ...) sur le vieillissement	

TABEAU III

V - ETUDES DE TENUE AU RAYONNEMENT MENEES AU DEIN

Elles concernent essentiellement des irradiations γ continues (^{60}Co), à des débits de doses variables, généralement faibles ou moyens, de composants électroniques ou optoélectroniques en fonctionnement normal, ainsi que de fibres optiques.

La figure 1 montre l'irradiateur "SIGMA" avec une géométrie de révolution, conçu pour l'irradiation de fibres optiques enroulées sur un tambour et des composants électroniques (ou circuits de faibles dimensions) répartis sur des couronnes. Les débits de doses varient de 100 rad.h^{-1} à quelques 10^5 rad.h^{-1} grâce à l'utilisation d'un ou de deux atténuateurs cylindriques. Un passage de câbles permet une étude dynamique des composants sous irradiation.

D'autres enceintes d'irradiation pour des débits de dose faibles sont en cours d'installation.

La figure 2 donne, à titre indicatif, des résultats obtenus à un débit de dose de 1000 rad.h^{-1} sur trois types d'amplificateurs opérationnels. Ces résultats illustrent les variations de comportement, d'une technologie à l'autre, pour une même fonction électronique ainsi que la nécessité d'une mesure permanente des paramètres en cours d'irradiation. Ainsi dans le cas des échantillons 4 et 5, un seul contrôle à 1 Mrad intégré aurait conclu à une dérive pratiquement nulle aussi bien du gain que de la tension de décalage.

VI - CONCLUSION

La qualification nucléaire des composants électroniques semiconducteurs susceptibles d'être introduits dans les générations futures de centrales nucléaires devra avant tout tenir compte des impératifs propres aux réacteurs et ne pourra être basée uniquement sur les méthodes utilisées dans les domaines militaires et spatiaux.

Il serait souhaitable qu'un maximum de données soit recueilli dès à présent, par des irradiations continues de longue durée, sur la tenue des composants à de faibles débits de dose γ , sur l'influence du débit de dose, et sur les effets conjugués des autres facteurs de l'environnement réacteur.

Pour des composants destinés à fonctionner dans des zones plus proches du coeur l'action des neutrons sera à ajouter à l'action des γ .

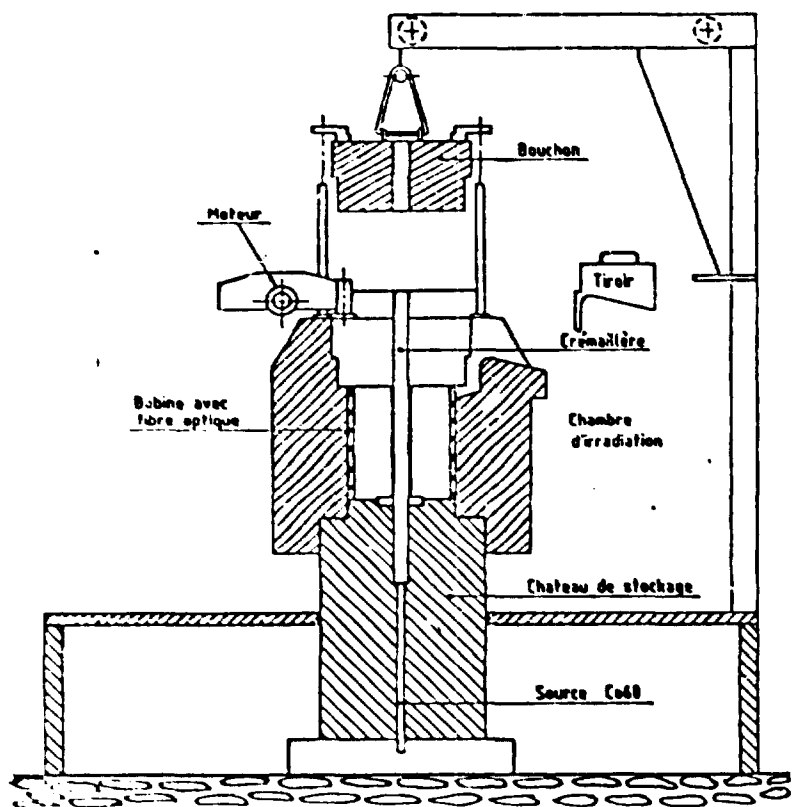


SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'IRRADIATEUR "SIGMA"

Fig. 1

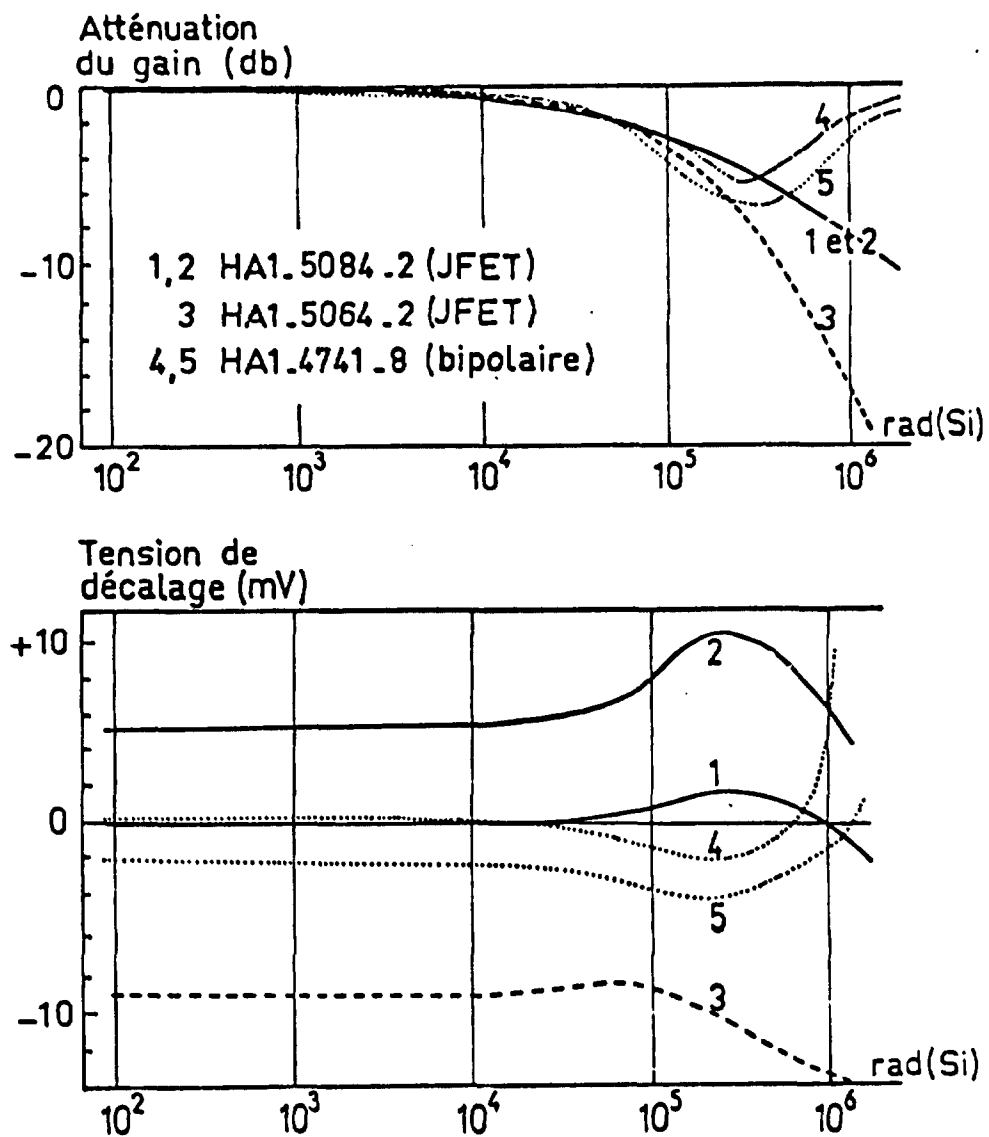


Fig. 2 - Gain en boucle ouverte et tension de décalage en fonction de la dose γ intégrée pour différents amplificateurs opérationnels