

BIBLIOTHEQUE DU CERIST



# THESE

Présentée par

*Said KAROUI*

pour obtenir le grade de **Docteur**

de l'**Institut National Polytechnique de Grenoble**

(arrêté ministériel du 30 Mars 1992)

**Spécialité : Signal, Image, Parole**

---

## ETUDE DU COMPORTEMENT DE CIRCUITS COMPLEXES EN ENVIRONNEMENT RADIATIF SPATIAL

---

Thèse préparée au sein du **Laboratoire de Génie Informatique**  
soutenue le 26 Novembre 1993 devant le jury d'examen :

Messieurs	Guy MAZARE	<i>Président</i>
	Jean GASIOT	<i>Rapporteurs</i>
	Jacques BOURRIEAU	
	Daniel AUVERGNE	<i>Examineurs</i>
	Raoul VELAZCO	
Mademoiselle	Françoise ESTREME	

TH1.

## RESUME

**C**ETTE THESE est consacrée à l'étude d'un phénomène critique induit par l'environnement spatial sur les circuits intégrés complexes : il s'agit du phénomène d'*upset* qui se traduit par le basculement intempestif du contenu d'un point mémoire suite à l'impact d'une particule lourde dans des zones sensibles du circuit. Les conséquences de ce phénomène sur le fonctionnement de processeurs complexes peuvent être fatales au niveau du contrôle d'un engin évoluant dans l'espace.

Les techniques de *durcissement* ne garantissant pas une totale immunité face au phénomène d'*upset*, il devient alors nécessaire d'avoir recours à des méthodes dites de *prévision* qui consistent à estimer la vulnérabilité en orbite des composants candidats aux applications spatiales, dans le but de choisir les circuits les moins sensibles. Ces techniques de *prévision* reposent sur la mise en oeuvre de méthodologies expérimentales de test aux ions lourds destinées à déterminer le comportement du circuit cible en ambiance radiative.

Dans le but de réaliser de telles expériences nous avons conçu et réalisé un système de test, le testeur FUTE 16, et utilisé trois moyens différents de simulation de l'environnement spatial (un accélérateur de particules lourdes, un accélérateur de protons et un équipement à base d'une source Californium).

Dans le cas des microprocesseurs, des séquences de test dites de *test de registres* sont généralement utilisées. Ces séquences se limitent à initialiser l'ensemble des registres accessibles par programme, pour en observer leur contenu après une attente. A partir des résultats obtenus par application de la méthodologie de test pour évaluer la sensibilité de divers processeurs CISC et RISC, nous montrons que les estimations des taux d'erreur en orbite réalisées à l'aide de séquences de test de registres peuvent conduire à des *décisions erronées* en ce qui concerne l'acceptation ou le rejet de circuits candidats aux applications spatiales.

## MOTS CLES

ENVIRONNEMENT SPATIAL - IONS LOURDS - PHENOMENE D'UPSET - SEU - SIMULATEURS DE PARTICULES - TESTEURS FONCTIONNELS - TEST AUX IONS LOURDS - MICROPROCESSEURS.

---

# SOMMAIRE

---

INTRODUCTION .....	23
--------------------	----

<p>SECTION I L'ENVIRONNEMENT SPATIAL ET SES CONSEQUENCES SUR L'ELECTRONIQUE EMBARQUEE</p>
---

<b>Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>Chapitre 1 Caractéristiques de l'environnement spatial .....</b>	<b>33</b>
Introduction .....	35
I Les particules légères .....	36
I.1 Les particules provenant du soleil .....	36
I.1.1 Le vent solaire - activité normale .....	37
I.1.2 Les éruptions à protons .....	37
I.2 Les particules piégées .....	39
II Les particules lourdes .....	42
II.1 Les particules lourdes galactiques et extragalactiques - le rayonnement cosmique .....	43
II.2 Les particules lourdes des éruptions solaires .....	44
Conclusion .....	45

Chapitre 2 <b>Interaction des particules chargées avec la matière</b>	47
Introduction	49
I Interaction matière-radiation	49
I.1 L'ionisation	49
I.2 Les déplacements d'atomes	50
I.3 Les rayonnements secondaires	50
I.4 Les réactions nucléaires	51
II Effets des radiations sur les composants électroniques	51
II.1 Les effets dus à la dose cumulée	51
II.2 Les effets singuliers des ions lourds	52
II.2.1 Le pouvoir d'arrêt	53
II.2.2 Les mécanismes de dépôt d'énergie	54
II.2.3 Le phénomène d'upset - basculement intempestif de point mémoire	55
II.2.4 Le phénomène de latchup - verrouillage de l'alimentation	57
II.2.5 Les phénomènes de snapback et de burnout	58
II.2.6 Notion de LET seuil et de section efficace	58
Conclusion	59

**SECTION II MOYENS D'ACTION FACE AUX EFFETS  
DES PARTICULES CHARGÉES**

Introduction	63
Chapitre 3 <b>Les moyens de prévention</b>	73
Introduction	75
I Le blindage	75
II Le durcissement des composants	76
II.1 Durcissement de la technologie	77

II.1.1 Technologie CMOS sur substrat épitaxié .....	77
II.1.2 Technologie CMOS sur substrat isolant .....	78
II.1.3 La technologie AsGa .....	79
II.2 Préventions à la conception .....	80
II.2.1 Amélioration de la structure bistable classique .....	80
II.2.1.1 Augmentation des géométrie des transistors .....	80
II.2.1.2 Adjonction d'éléments passifs à la structure bistable classique .....	81
II.2.1.2.1 Diffusion de capacités .....	81
II.2.1.2.2 Résistances de contre réaction .....	81
II.2.2 Nouvelles structures de bistables .....	82
III Préventions au niveau du système .....	84
Conclusion .....	85
Chapitre 4 Les moyens de prévision .....	89
Introduction .....	91
I La simulation au sol .....	91
II Les méthodes de calcul de prédiction des taux d'événements .....	93
II.1 La méthode du DERTS .....	93
II.1.1 Application aux cas des ions lourds .....	93
II.1.2 Application aux cas des ions légers .....	95
II.2 Le logiciel CREME .....	96
II.3 Formule d'approximation .....	97
Conclusion .....	98

**SECTION III METHODOLOGIE DE TEST AUX IONS LOURDS**

Introduction .....	103
--------------------	-----

<b>Chapitre 5 Les moyens de simulations des particules chargées</b>	105
Introduction	107
I Simulation par impulsion laser ultra brève	107
II Les sources à fission radioactive	107
III Les accélérateurs de particules lourdes	113
IV Les accélérateurs de protons	115
Conclusion	116
<b>Chapitre 6 Les systèmes de test</b>	119
Introduction	121
I Types d'architectures de systèmes de test	122
I.1 Contrôle dominé, réponses préétablies	122
I.2 Contrôle dominé, circuit étalon	123
I.3 Contrôle assisté, réponses préétablies	123
I.4 Contrôle assisté, circuit étalon	125
II Critères de sélection d'un testeur pour le test aux ions lourds	125
III Le système de test réalisé - FUTE 16	127
III.1 L'architecture de FUTE 16	128
III.2 Le principe de fonctionnement du testeur FUTE 16	129
III.3 Les cartes de support des circuit sous test	132
III.4 Le moniteur de test de FUTE 16	136
III.4.1 Les fonctions de moniteur	136
III.4.2 L'architecture logicielle	137
Conclusion	138
<b>Chapitre 7 Les programmes de test</b>	141
Introduction	143
I Test fonctionnel	144
II Test d'upset	145
II.1 Test des circuits de type mémoire	146
II.2 Cas des circuits complexes	147
III Insuffisances d'un test de registres	148
IV Evaluation de la sensibilité d'un circuit complexe - l'état de l'art	150
V Méthode proposée	155

## SECTION IV RESULTATS EXPERIMENTAUX

<b>Introduction</b> .....	159
<b>Chapitre 8 Synthèse des résultats</b> .....	165
Introduction .....	167
I Influence du programme de test sur la sensibilité aux upsets .....	167
II Influence du programme de test sur les distributions des types d'erreurs .....	172
III Influence du programme de test sur l'estimation des taux d'événements en orbite .....	174
Conclusion .....	175
<b>Chapitre 9 Résultats complets</b> .....	177
Introduction .....	179
I Les processeurs 68020 et 68881/2 .....	179
I.1 Généralités .....	179
I.2 Programme de test utilisés .....	180
I.3 Résultats obtenus .....	181
I.3.1 Essais au Californium .....	181
I.3.2 Caractérisation au TANDEM de l'IPN .....	182
I.3.2.1 Tenue aux latchups .....	182
I.3.2.2 Tenue aux upsets du 68020 .....	182
I.3.2.3 Tenue aux upsets du 68882 .....	184
I.3.3 Essais aux protons .....	184
I.4 Classification des erreurs .....	185
I.5 Prédiction du taux d'événements en orbite .....	186
I.5.1 Cas des ions lourds .....	187
I.5.2 Cas des protons .....	188
I.6 Conclusion .....	189

II Les processeurs SPARC .....	189
II.1 Généralités .....	189
II.2 Programme de test utilisés .....	190
II.3 Résultats obtenus .....	190
II.3.1 Résultats au Californium .....	190
II.3.2 Résultats aux ions lourds .....	191
II.3.3 Résultats aux protons .....	192
II.4 Analyses des erreurs .....	193
II.5 Prédiction de taux d'événements en orbite .....	194
II.6 Conclusion .....	196
III Le PACE 1750 .....	196
III.1 Généralités .....	196
III.2 Programme de test utilisés .....	197
III.3 Résultats obtenus .....	197
III.4 Conclusion .....	199
IV Les MIPS R 3000 / 3010 .....	199
IV.1 Généralités .....	199
IV.2 Programme de test utilisés .....	200
IV.3 Résultats obtenus .....	200
IV.4 Conclusion .....	201
V Le transputer T800 .....	201
V.1 Généralités .....	201
V.2 Programme de test utilisés .....	202
V.3 Résultats préliminaires obtenus .....	202
V.4 Perspectives .....	203
VI Comparaison des résultats obtenus pour les différents circuits testés.....	203
VI.1 Comparaison des sections efficaces .....	203
VI.2 Comparaison des taux d'événements en orbite .....	205
CONCLUSION .....	209
REFERENCES .....	215
ANNEXES .....	233

---

Annexe A1 : Caractéristiques de la source de Californium du DERTS et du synchrotron SATURN .....	235
Annexe A2 : Dispositif expérimental de test .....	243
Annexe A3 : Schéma synoptique de carte d'interface FUTE 16 / PACE 1750 .....	249
Annexe A4 : Schémas "Orcad" de la carte de test des processeurs MIPS R3000 / 3010 .....	253
Annexe A5 : Schémas "Orcad" de la carte de test du transputer T800 .....	265
Annexe A6 : Schémas "Orcad" de la carte de test du reseau de transputers .....	275
Annexe A7 : Le moniteur de test de FUTE16 - Manuel d'utilisation .....	289