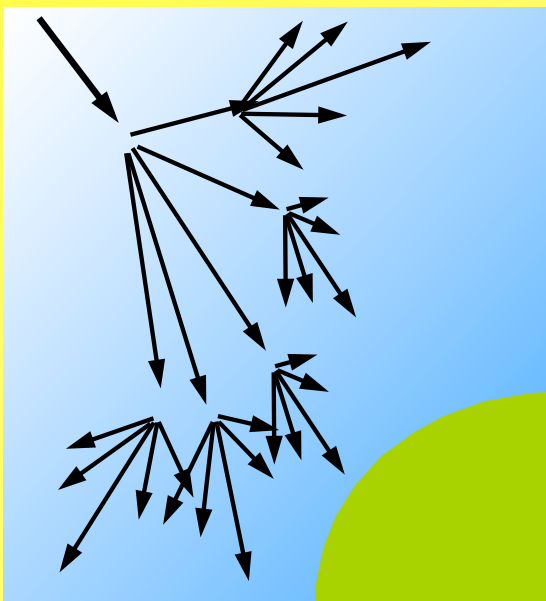


---

# Rayonnements ionisants et Compatibilité Electronique et Nucléaire

Effets, mécanismes et ordres de grandeur



**Jean-Luc Leray**

**Commissariat à l'Energie Atomique, CEA Saclay 91191, France**

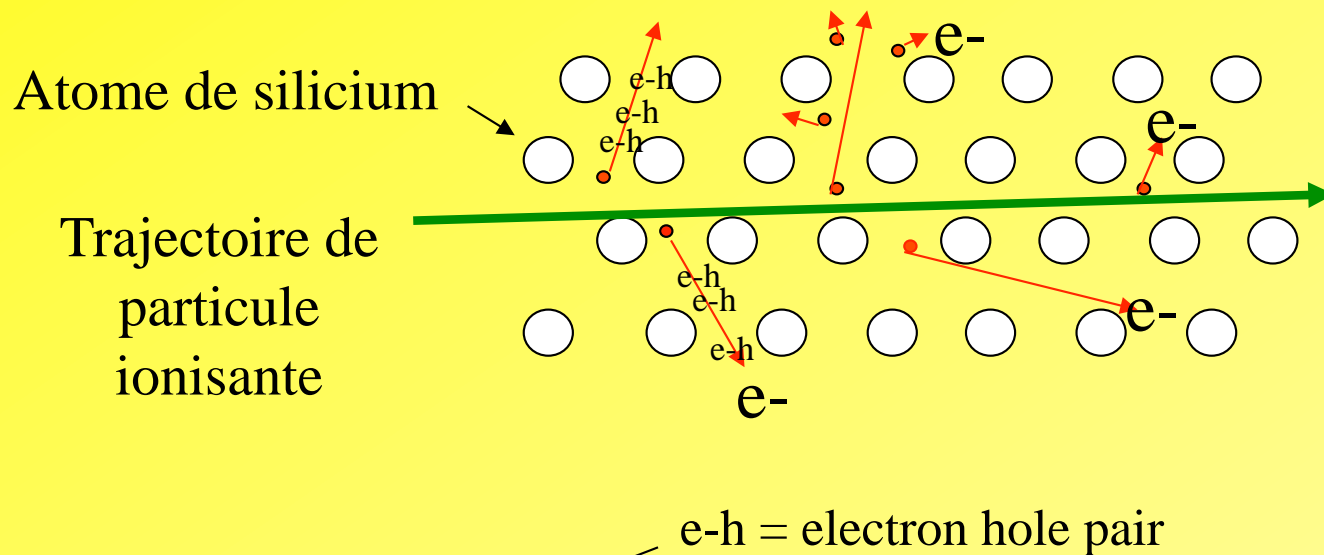
**jean-luc.leray@cea.fr**

# Rayonnements ionisants : définition de base

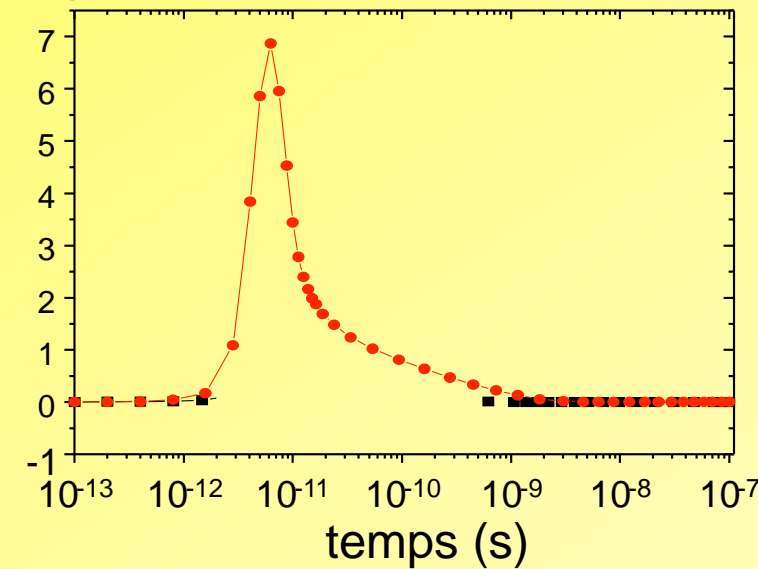
**Le rayonnement ionisant : possède suffisamment d'énergie pour arracher des électrons aux atomes ou aux molécules alors qu'il traverse une substance**

Le silicium est un des meilleurs détecteurs de radiations

Cf : photopiles solaires, détecteurs nucléaires



Impulsion de courant dans le transistor  
milliampère/micron

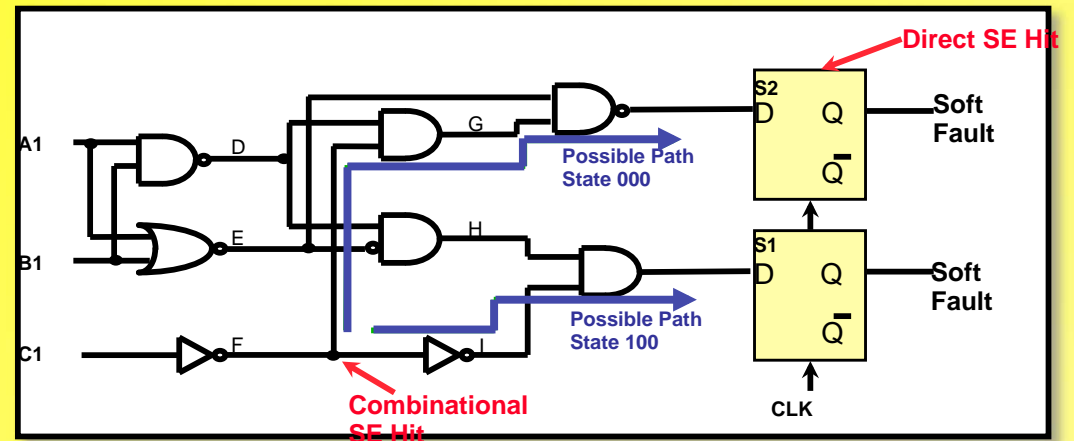


**6250 électrons = 1 femtocoulomb = est relié à un dépôt d'énergie de  $E=3.6\text{eV}\cdot 6250=22.5\text{ keV}$**

# • Une seule particule cause un transitoire

## “Single Event Transient”

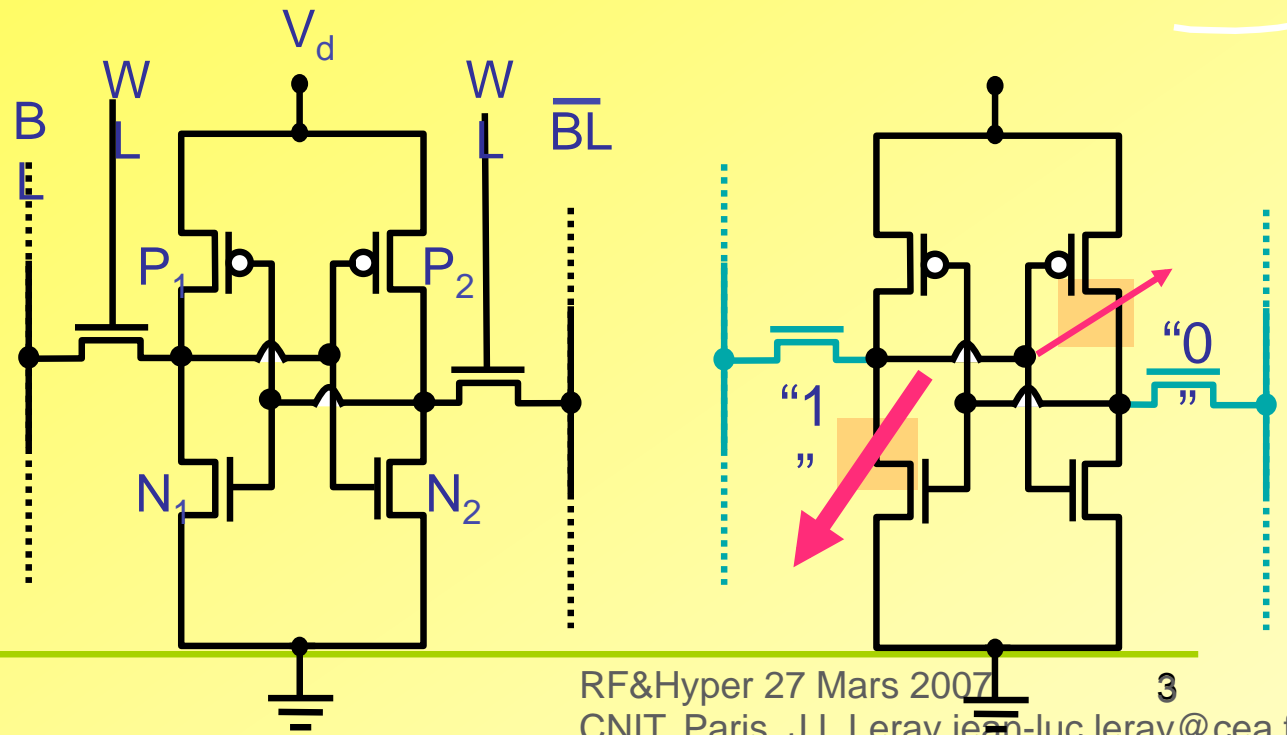
Massengil-99



# • Dans les mémoires, une particule peut causer un “bit-flip” 0-1 ou 1-0

## “Single Event Upset”

Baumann-01



# Effets transitoires et effets permanents

- Un composant est constitué de semi-conducteur et d'isolants
- Le semiconducteur conduit les impulsions
  - Sensible aux traces
  - Proportionnel au flux
  - On observe des « glitches » et corruption de données
  - Unité : flux de particule/cm<sup>2</sup>/s
- L'isolant stocke les charges
  - Sensible à l'accumulation de traces
  - Proportionnel au flux et au temps
  - On observe des réduction de performance, puis arrêt permanent
  - Unité : énergie déposée ou « dose »

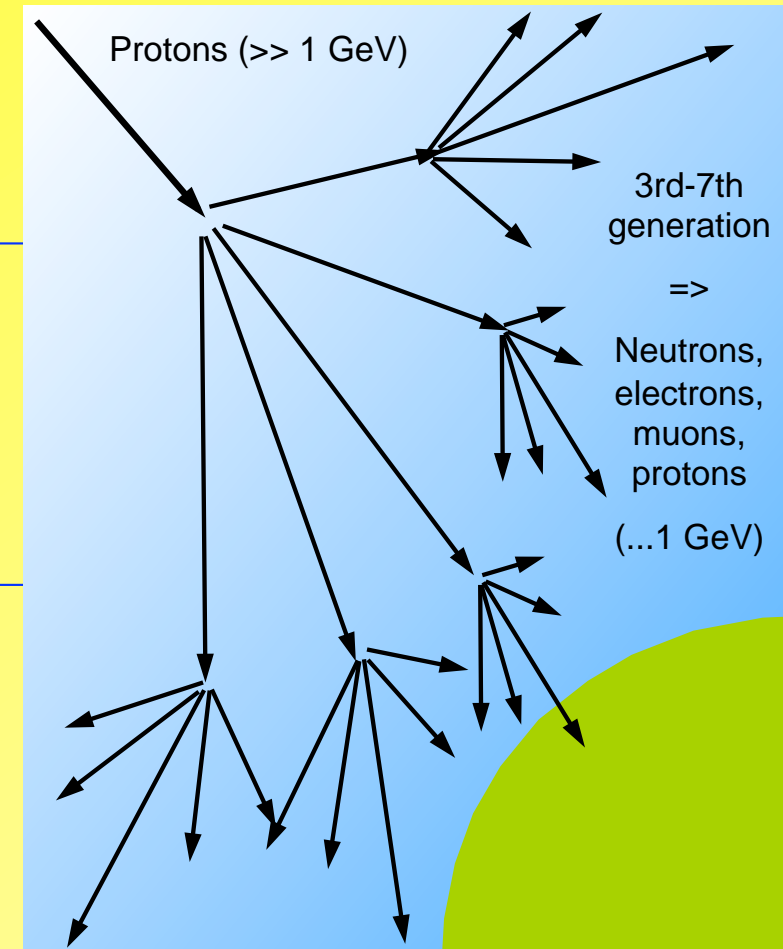
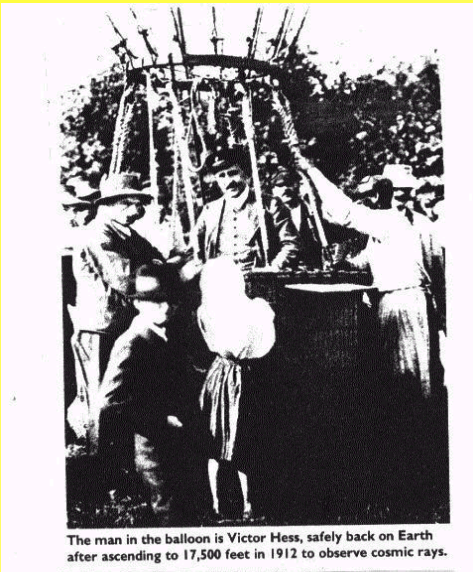
Unité légale	1 Gray	= 1 Joule/kilogramme
unité pratique	1 rad	= 1 centigray

# Où sont les rayonnements ionisants ?

**PARTOUT !**

les neutrons cosmiques atmosphériques

- Ionosphère imaginée pour expliquer la propagation ionosphérique (Kennely-Heaviside and Nikola Tesla 1900's, <http://www.teslasociety.com/cosmos.htm>)
  - Rayons cosmiques découverts en 1912 par les vols en Ballons (Victor Hess, [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1936/hess-bio.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1936/hess-bio.html))
- NAMED « ULTRA-RADIATION » (COSMIC RADIATION)

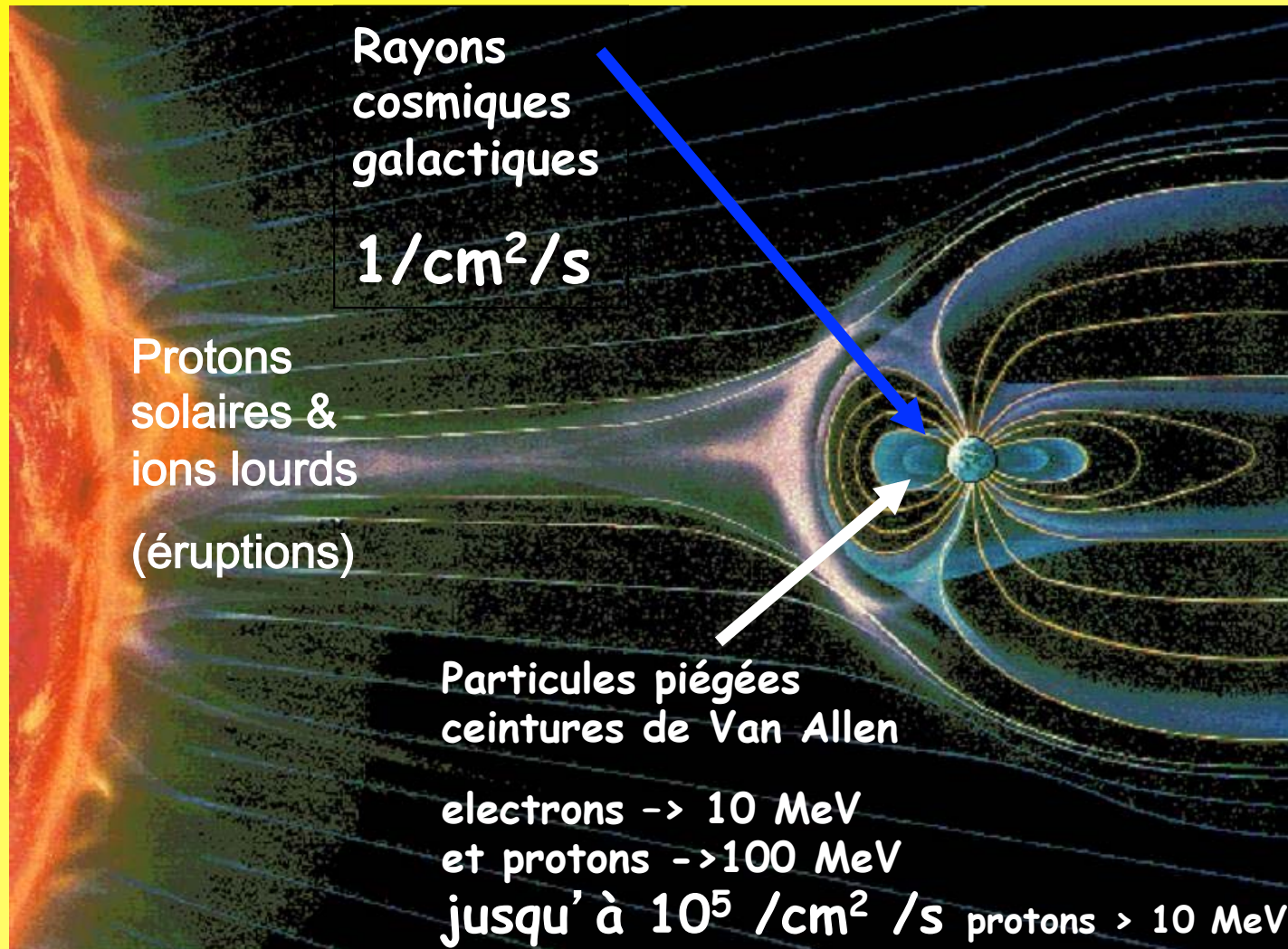


**~10 neutrons/cm<sup>2</sup>/heure altitude zero (New York City)**

**~1 neutron/cm<sup>2</sup>/seconde à l'altitude des jets (12.000 m - 40k pieds)**

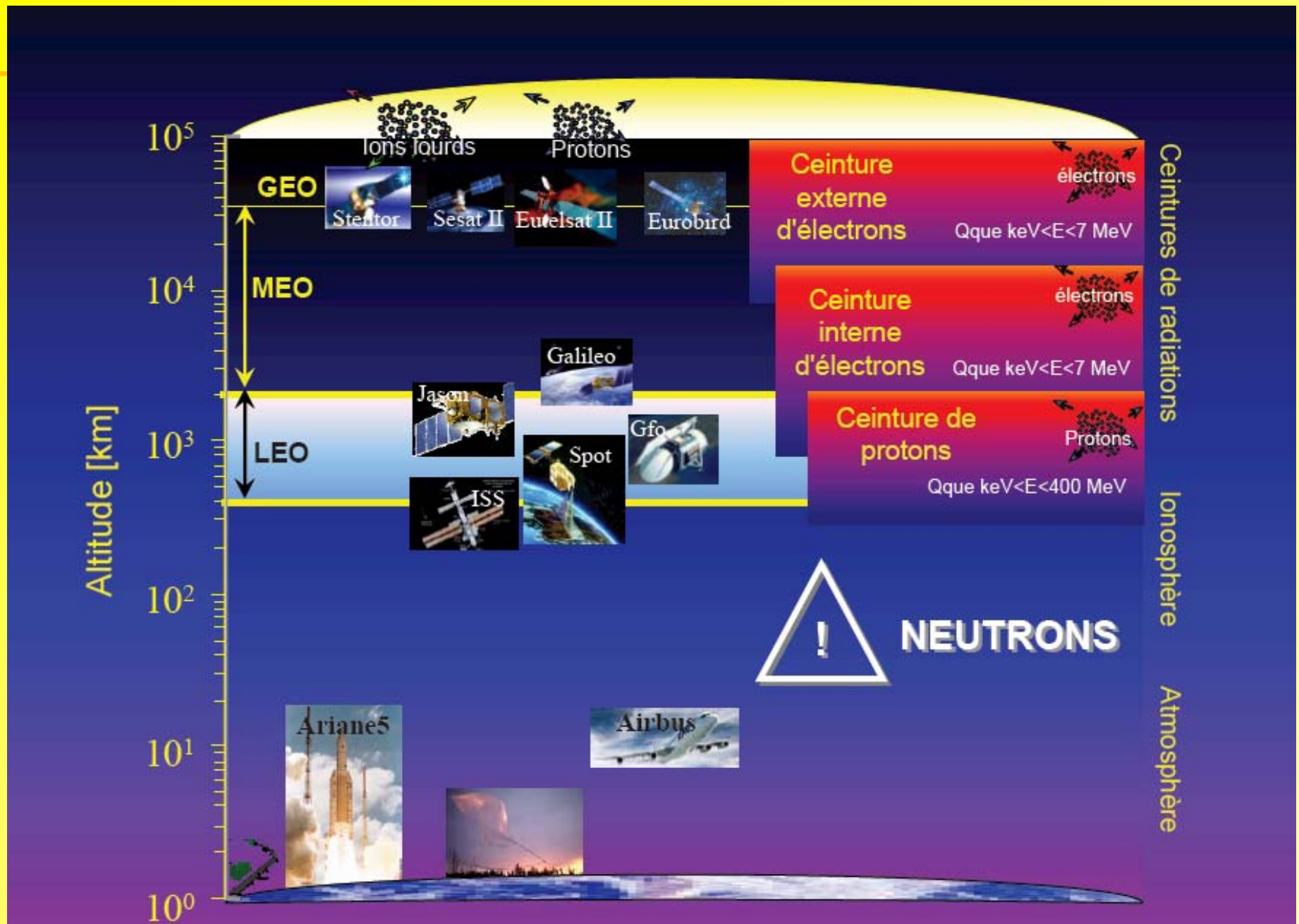


# Le rayonnement cosmique et solaire spatial



## ESPACE

<http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/tour/vanallen.html>

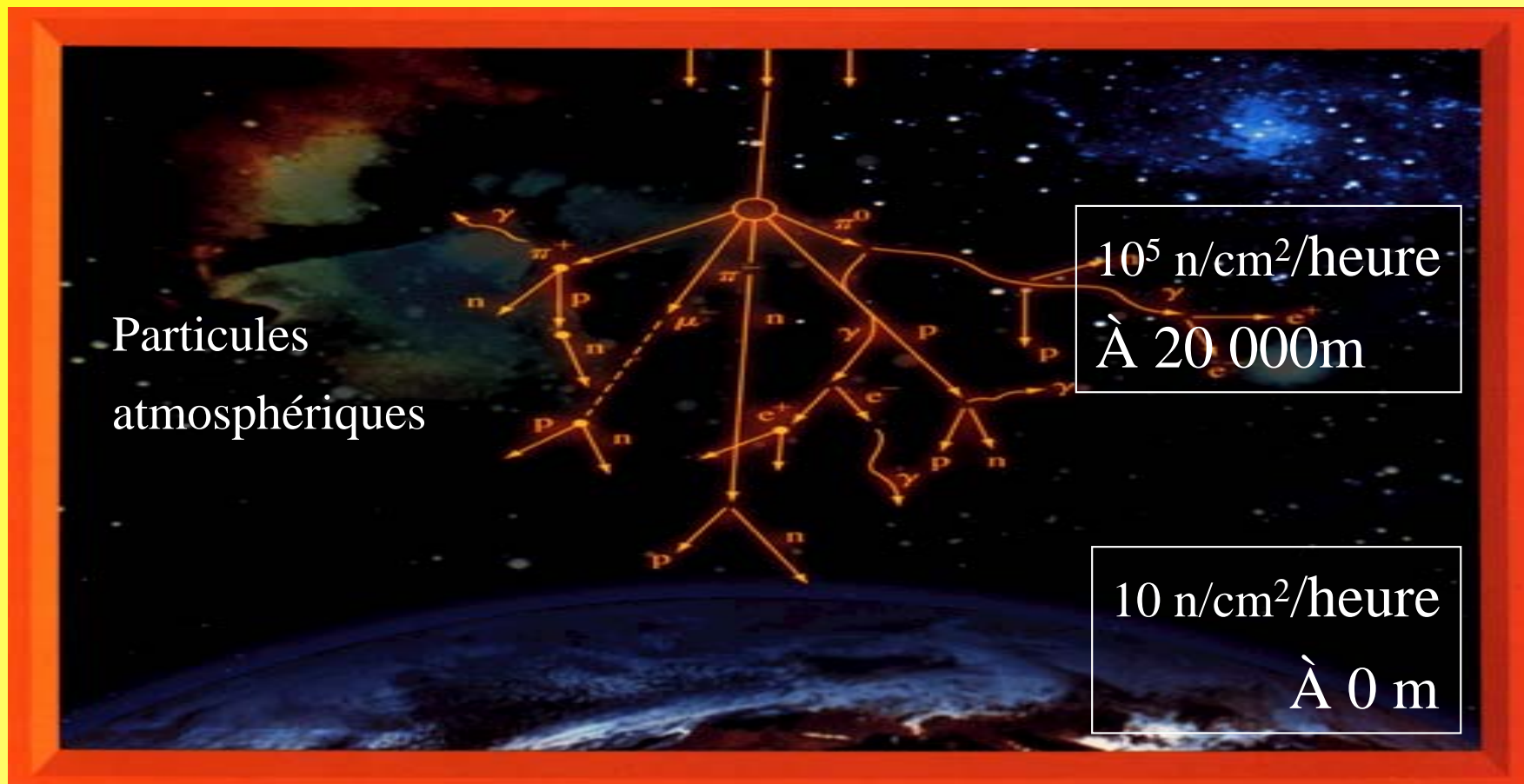


D'après Karine Castellani-Coulié, Université de Provence [www.i2mp.fr/](http://www.i2mp.fr/)



# Les rayonnements cosmiques terrestres

- Les protons de haute énergie entrent en collision avec les noyaux des atomes de l'atmosphère et créent des fragments eux-mêmes dotés d'une énergie élevée ( protons, neutrons, muons, neutrinos, mésons, ....).



ATMOSPHERE



# Neutrons

---

- Le neutron n'étant pas chargé, il ne produit pas d'ionisations en traversant la matière.
  - Les neutrons ne forment donc pas un rayonnement ionisant par lui-même
- Mais par chocs ou en provoquant des fissions nucléaires, ils peuvent générer des rayonnements ionisants secondaires.
  - Les neutrons sont indirectement ionisants
- **Collisions inélastiques**
  - **Interactions quantiques de la particule avec ses congénères du noyau**
  - **neutron : sans seuil**
- Pénétration dépendante de leur énergie. Le blindage est très difficile
  - Seule une forte épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine (entre 10 cm et 1 mètre) arrête les neutrons jusqu'à une dizaine de MeV

# Spécificité des Neutrons

---

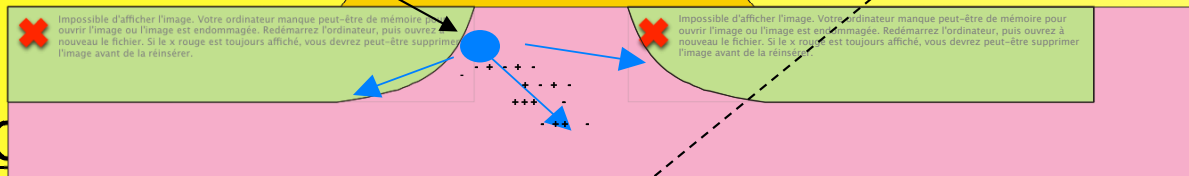
- Les neutrons (rapides  $> 1$  MeV) sont **très invasifs** car ils interagissent rarement (pour  $\sigma = 1$  barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>)
  - libre parcours entre 2 chocs de l'ordre de
    - matière solide => **10 cm** (épaisseur d'un mur)
    - air au niveau de la mer 1000 fois moins dense => **10.000 cm** = 100 mètres
- Mais quand ils interagissent ils transfèrent beaucoup d'énergie dans un volume micrométrique
- Conséquences
  - Biologie : rupture de liaisons C-H
    - ruptures et réparations ADN
  - Electronique : nuage d'électrons et de trous
    - 3,6 eV/paire e-h, impulsions propagée ou non

# Ordres de Grandeur

La Physique Nucléaire donne la probabilité de choc avec un atome de silicium

neutron

=> Probabilité de  $10^{-5}$  dans une couche de  $1 \mu\text{m}$



Épaisseur d' un transistor  $\sim 1 \mu\text{m}$

La Fiabilité définit une unité d' usage : le Failure in Time F.I.T =  $10^{-9}$  défaut par heure

**Au niveau de la mer**

**10 neutrons/cm<sup>2</sup>/heure**

=>  $10 \times 10^{-5} = 10^{-4}$  transitoire par cm<sup>2</sup> de silicium et par heure

= upper limit  $10^5$  FIT

1 défaillance / 10.000 heure x composant

Tolérable pour le multimédia, pas pour l' automobile, le bancaire ou la santé

**A l' altitude d' un avion**

**10 000 neutrons/cm<sup>2</sup>/heure**

=>  $10^4 \times 10^{-5} = 10^{-1}$  transitoire par cm<sup>2</sup> de silicium et par heure

= upper limit  $10^8$  FIT

1 défaillance / 10 heure.composant

Intolérable dans tous les cas => corrections d' erreur, redondance



# Digital CMOS: Chargé stockée sur un noeud de circuit

Year	2001	2004	2007	2010	2013	2016
Litho CD (nm)	130	90	65	45	32	22
Supply Voltage (V)	1.3	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4
Nodal Capacitance (fF)	2.00	1.38	1.00	0.69	0.49	0.34
Nodal Charge (fC)	2.60	1.38	0.70	0.42	0.25	0.14
Nodal Charge (electrons)	16250	8654	4375	2596	1538	846

Table according to [INTEL-01]

10 000 electrons

3 000 electrons

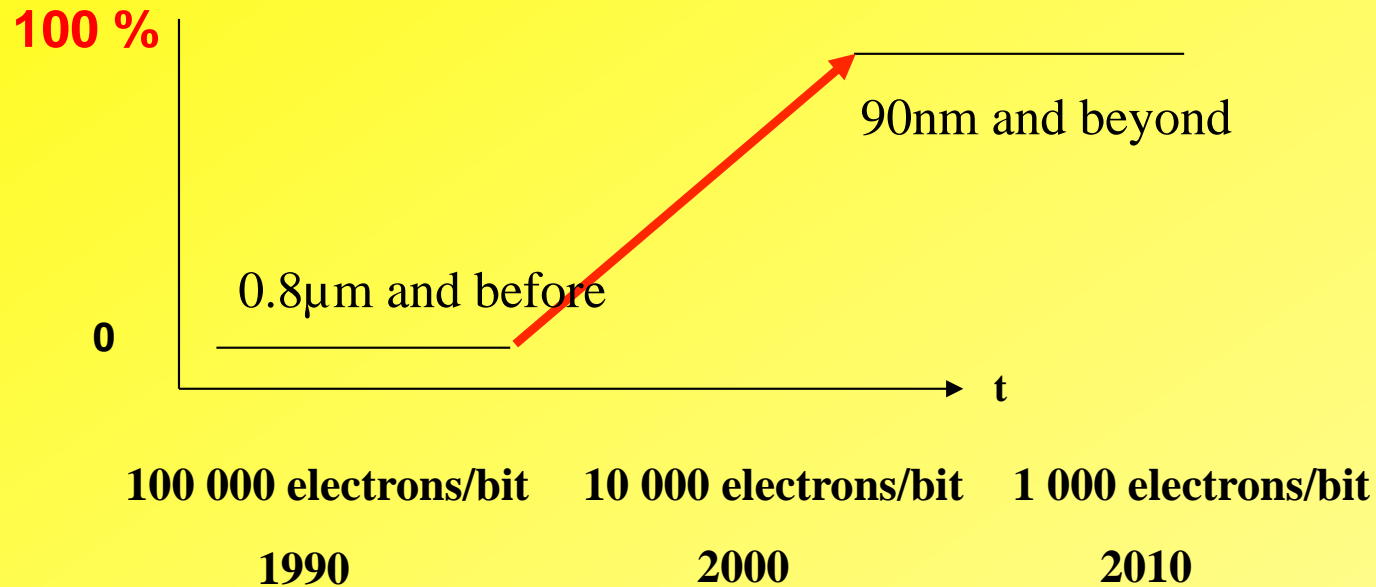
1 000 electrons



## Conséquence de la loi de Moore

Toute technologie CMOS < 0.5 $\mu$ m est devenue vulnérable

### Probabilité de basculement binaire à chaque passage de particule



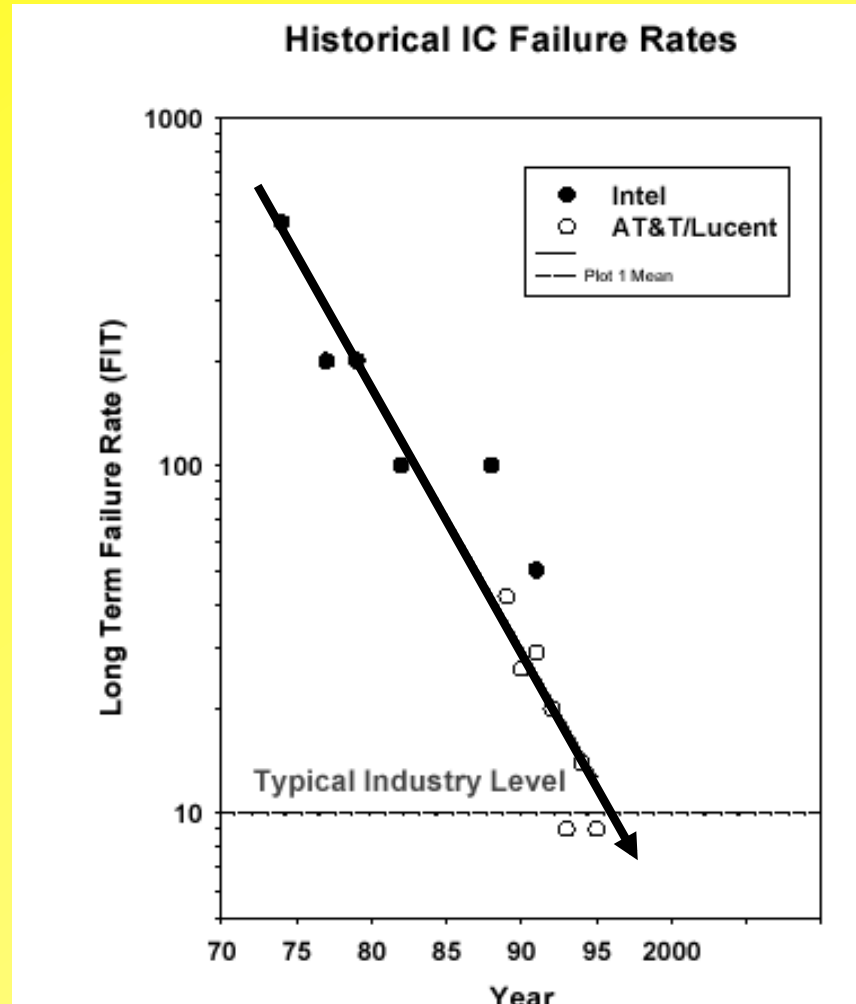
**Le taux de défaillance (Upset Rate) augmente pour trois raisons :**

Réduction de la charge stockée par bit (downscaling)

Augmentation de la fréquence => probabilité de capture (upscaling)

Complexity des systèmes (upscaling)

# Or, les composants sont devenus de plus en plus fiables (à flux de particules maintenu nul)

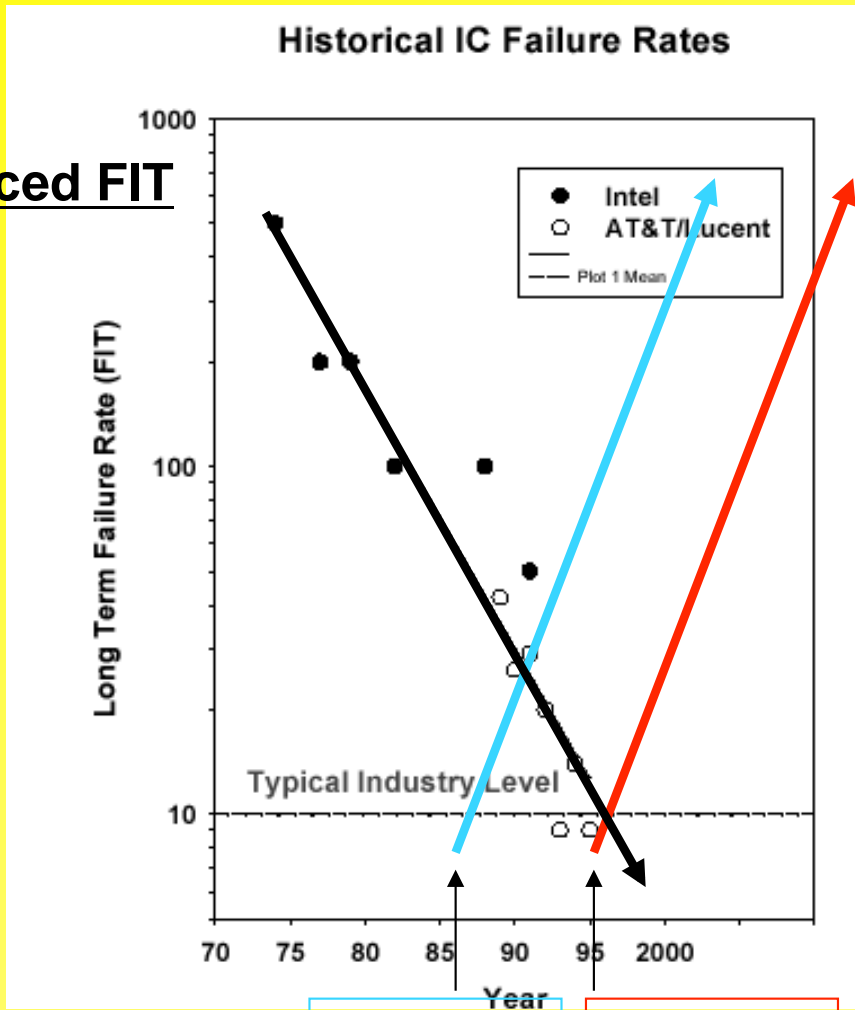


INTERNATIONAL RELIABILITY PHYSICS SYMPOSIUM 2002  
Reliability Issues for Advanced  
IC Technologies Anthony S. Oates



# Mais ils sont devenus de plus en plus sensibles aux particules

## Process-Induced FIT



Airplane  
Altitude  
early 90's

Sea Level  
2000's

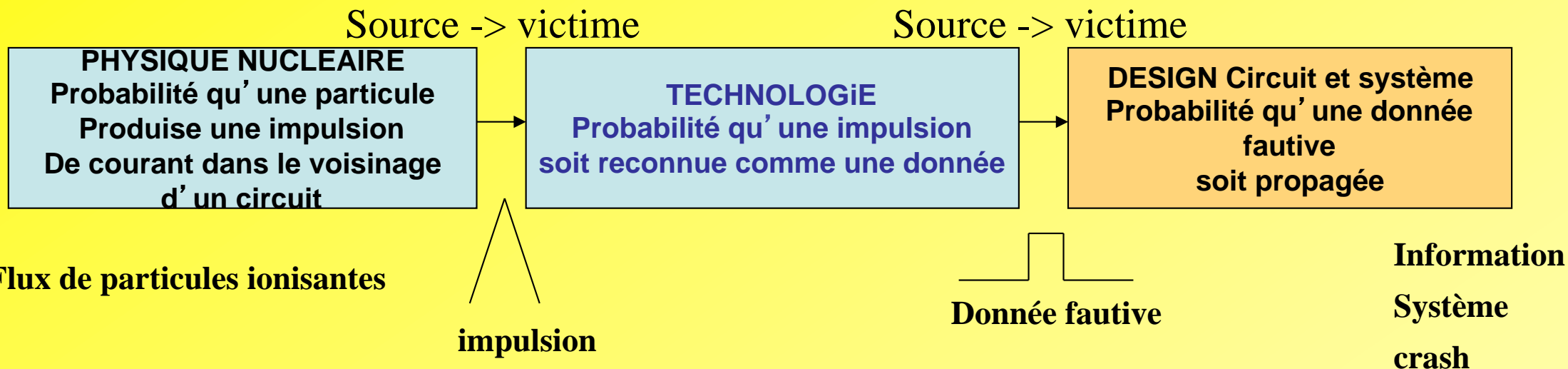
## Additional FIT

due to Circuit  
Sensitivity to  
natural particle  
environment

INTERNATIONAL RELIABILITY PHYSICS SYMPOSIUM 2002  
Reliability Issues for Advanced  
IC Technologies Anthony S. Oates

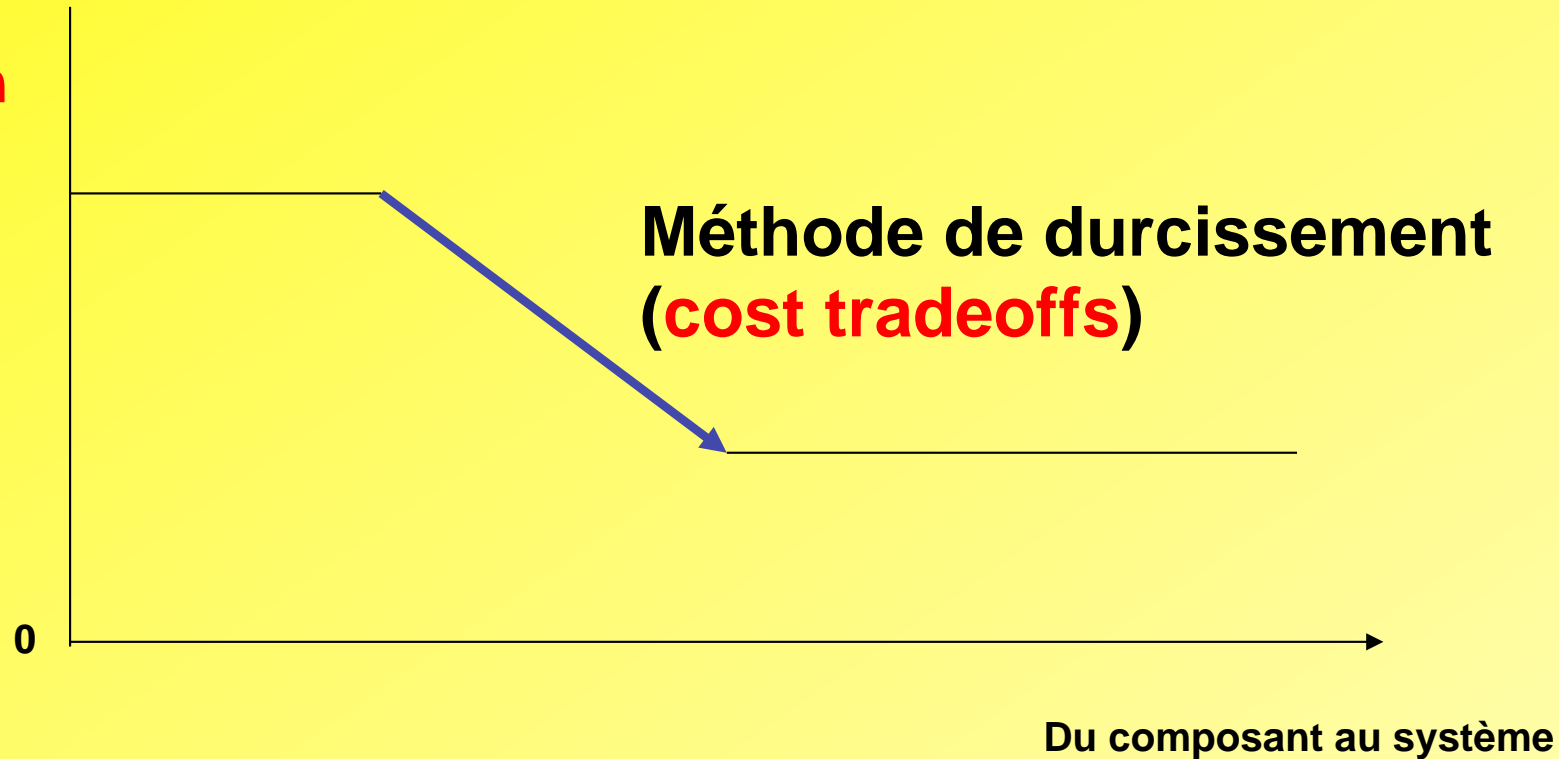


# Le durcissement repose sur deux niveau de relations sources/victimes



# Réduction des éléments de la chaîne des sources/victimes

Probabilité  
qu' une perturbation  
se propage



Technologie

Circuit

Silicon On Insulator

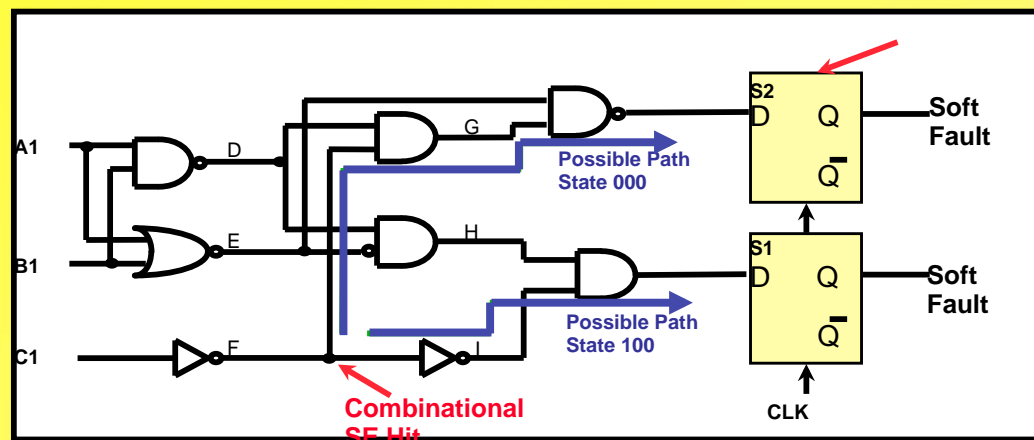
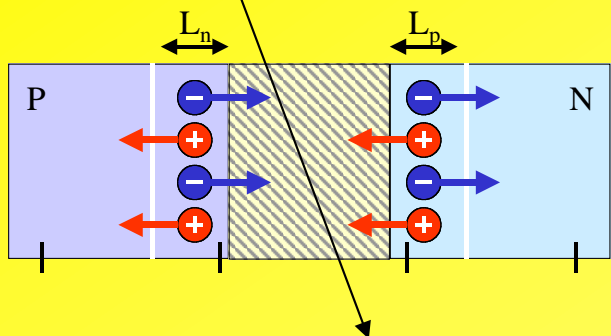
EDAC

Triple Well

Error Detection and Correction



# Le composant électronique est agressé « de l'intérieur »



- La dégradation ou la perturbation **remonte au système**
  - C' est du « bottom up »
- Les solutions sont le plus souvent « top down »
  - Dès lors que l' on a résolu les **éléments de compatibilité (durcissement)**
- Intérêt de l' approche **SOURCE-VICTIME, comme en CEM**

La **Compatibilité Electronique et Nucléaire** nécessite de **répondre à trois questions essentielles** décrivant la **chaîne source-victime** :

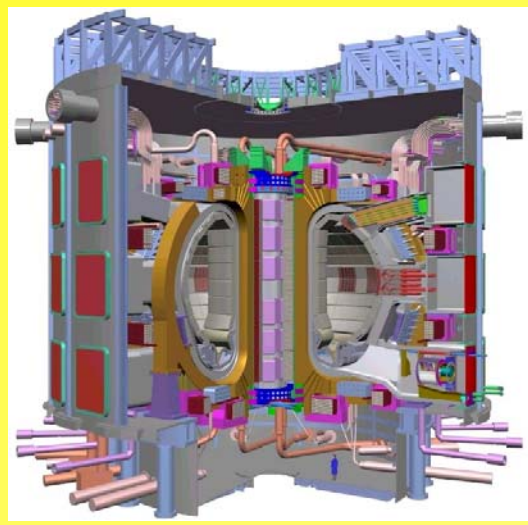
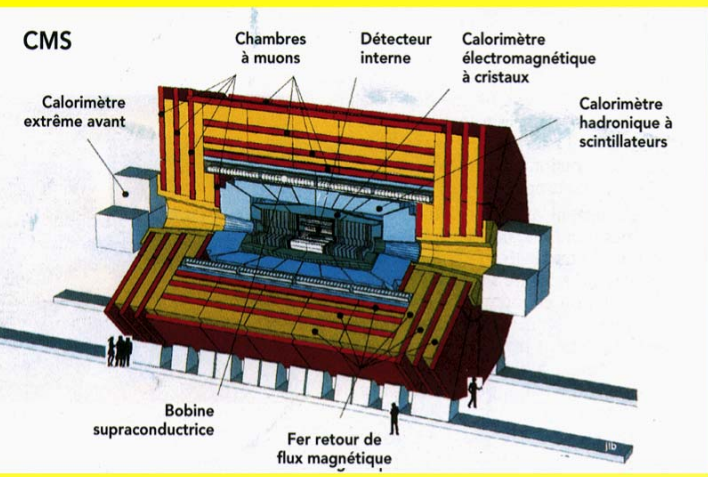
- Où ? (quel flux, quelles particules)
- Quand ? (quelles technologies)
- Comment ? (quels circuits et systèmes)

# Anciens et nouveaux challenges

---

- Anciens Challenges
  - Années 60 : le durcissement aux effets des Armes Nucléaires
  - Années 70 : le durcissement de l' électronique de commande des Réacteurs Nucléaires
  - Années 80 : le durcissement de l' électronique des Satellites
  - Années 90 : électronique de puissance (TGV = IGBT multi-kilovolts)
- Nouveaux Challenges
  - Le durcissement de l' électronique du transport
    - Fly by Wire, Avions et Drônes
    - Standard IEC publié en 2005
    - Drive by wire ?
  - Le durcissement des mémoires et processeurs des serveurs bancaires
    - Quelques alertes reportées dans la presse dans les années 2000
    - Standard JEDEC JESD 89 publié en 2002 et 2006
  - Les grands Instruments de Physique, LHC, ITER, LMJ
    - Effort international des Labos et Industries

# Les grandes expériences de physique des 10 prochaines années



Le Large Hadron Collider  
 CERN Genève  
 Très hautes énergies  
 par particule  
 7 téraélectron-volts (0,5  
 μJoule)  
 Collisions p<sup>+</sup> p<sup>-</sup>

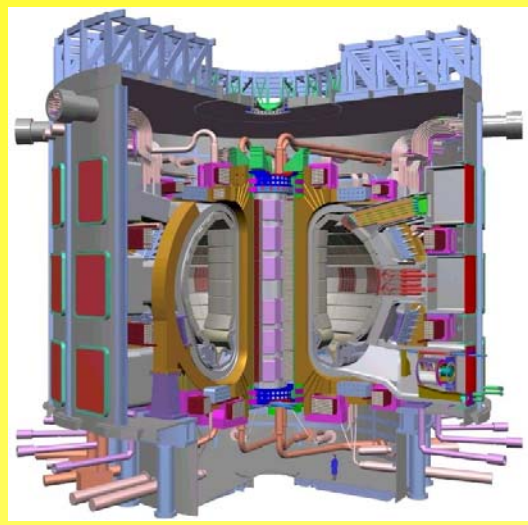
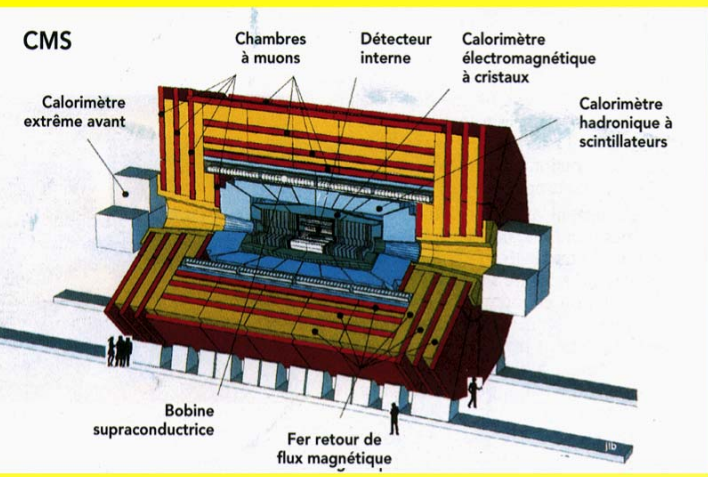
International Thermonuclear  
 Experimental Reactor  
 ITER Cadarache  
 Très hautes énergies collectives  
 Dans le plasma  
 > 500 Mégajoules (500 MW x durée)  
 D + T => n + He + gamma 17,6 MeV

Laser Mega-Joule  
 LMJ Bordeaux  
 Très hautes puissances  
 ~ 18 Méga Joules  
 D + T => n + He + gamma





# Les grandes expériences de physique des 10 prochaines années



Dans le détecteur  
 $10^{15}$  particules/cm<sup>2</sup>  
 10 à 100 mégarads  
 (sur 10 ans)  
 $10^7$  particules/s

Production dans le plasma  
 $10^{28}$  neutrons / expérience  
 (1000 secondes)  
 $10^{23}$  neutrons/s

Production dans le plasma  
 $10^{19}$  neutrons / expérience  
 (nanoseconde)  
 $10^{28}$  neutrons/s

Dans la Salle de Contrôle commande : selon conception et distance

$1/d^0$  (caverne)

$1/d^1$  (cylindre)

$1/d^2$  (sphère)





# Conclusions et remarques

*Nous avons focalisé l'exposé sur les neutrons*

Les neutrons **agissent localement une par une** avec une certaine probabilité.

Au sol et dans les avions, de l'ordre de 1 à  $10^3$  ions et neutrons par  $\text{cm}^2$  et par seconde pendant des milliers d'heures

ou

**collectivement et de façon indifférenciée** et certaine si en très grand nombre : tir LMJ

De l'ordre de  $10^{20}$  photons  $\gamma$  et neutrons par  $\text{cm}^2$  par seconde pendant 1 à 100 nanosecondes

Raisonnements analogues pour les protons, ions cosmiques du spatial

Raisonnement un peu différent pour les gamma du nucléaire (effets non probabiliste)

Mêmes méthodes de recherche de Compatibilité Electronique et Nucléaire

Fondées sur la recherche des couplages sources et victimes

# **Merci de votre attention**

---

## **1. Nous organisons la prochaine conférence RADECS**

**« Radiation and its Effects in Components and Systems »**

**Deauville, 10-14 septembre 2007**

[www.radecs2007.com](http://www.radecs2007.com)

**La première journée sera constituée par un séminaire (short course) Radiation effects, from material to system: a multi-scale approach”**

## **2. Nous participons au Séminaire ASPROM sur les effets des neutrons atmosphériques**

**Association pour la promotion des micronanotechnologies**

**"Effets des rayonnements sur les nanotechnologies"**

**La plateforme ASTEP tests aux neutrons atmosphériques, R&D et Industrielle du Plateau de Bure - Maison d'Accueil Super Dévoluy**

**Jeudi 7 et vendredi 8 juin 2007 de 9h à 18h**

<http://www.uimm.fr/fr/asprom/>

## **3. Pour tous renseignements : Chapitre France de l' IEEE / Nuclear and Plasma Physics Society**

<http://www.ieeenpssfrance.org/>

## Références JEDEC Composants électroniques

---

- <http://www.jedec.org/download/search/JESD89A.pdf>  
“Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices”  
Revision 1 - **OCTOBER 2006**

# Références IEC International Electrotechnical Commission

---

Référence Avionique / <http://www.iec.ch/>

## **Punlished**

**IEC/TS 62239 (2003-05)**

**Process management for avionics - Preparation of an electronic components management plan**

**IEC/TR 62240 (2005-06)**

**Process management for avionics - Use of semiconductor devices outside manufacturers' specified temperature range**

**IEC/TS 62396-1 (2006-03)**

**Process management for avionics - Atmospheric radiation effects –  
Part 1: Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics  
electronic equipment**

**IEC/PAS 62500 (2006-11)**

**Process management for avionics - Guide for defining and performing highly accelerated tests in avionic systems**

## **Work in progress**

**IEC TS 62239 Process management for avionics - Preparation of an electronic components management plan**

**IEC TS 62396-2 Process Management for Avionics - Atmospheric radiation effects - Part 2 - Guidelines for single event effects testing for avionics systems**

**IEC TS 62396-3 Process Management for Avionics - Atmospheric radiation effects - Part 3 - Optimizing system design to accommodate the single event effects, SEE of atmospheric radiation**

**IEC TS 62396-4 Process Management for Avionics - Atmospheric radiation effects - Part 4 - Guidelines for designing with high voltage aircraft electronics and potential single event effects**

**IEC TS 62396-5 Process Management for Avionics - Atmospheric radiation effects - Part 5 - Guidelines for assessing thermal neutrons fluxes and effects in avionics systems**

**IEC TS 62500 Process management for avionics - Guide for defining and performing highly accelerated tests in avionic systems**

**IEC/PAS 62396-2 Process Management for Avionics - Atmospheric radiation effects - Part 2 - Guidelines for single event effects testing for avionics systems**

**IEC/PAS 62396-3 TS Ed.1: Process Management for Avionics - Atmospheric radiation effects - Part 3: Optimising System Design to accommodate the Single Event Effects,SEE of Atmospheric Radiation**

**IEC/PAS 62396-4 Process management for avionics - Atmospheric radiation effects - Part 4: Guidelines for designing with high voltage aircraft electronics and potential single event effects**

**IEC/PAS 62396-5 Process Management for Avionics - Atmospheric radiation effects - Part 5 - Guidelines for assessing thermal neutrons fluxes and effects in avionics systems**



# Transports terrestres

---

- <http://www.actel.com/documents/AutoWP.pdf>  
Reliability Considerations for Automotive FPGAs