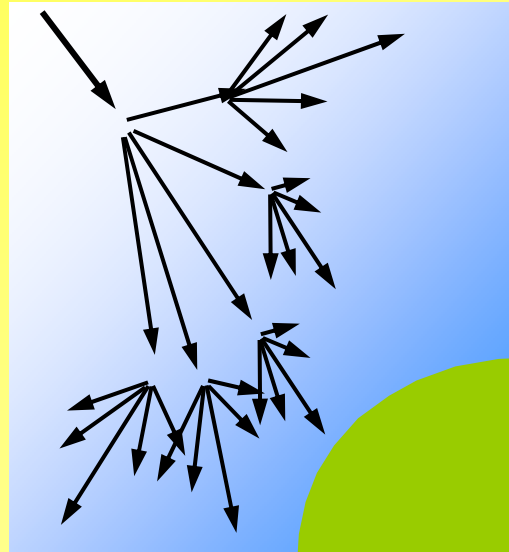

Rayonnements ionisants et Compatibilité Electronique et Nucléaire

Effets, mécanismes et ordres de grandeur



Jean-Luc Leray

Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA Saclay 91191, France

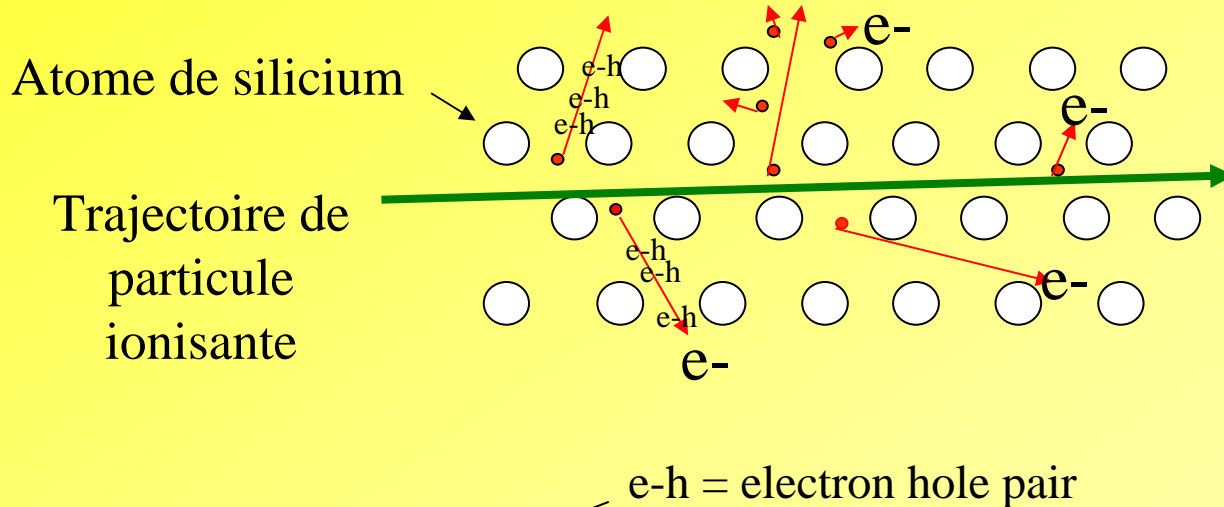
jean-luc.leray@cea.fr

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

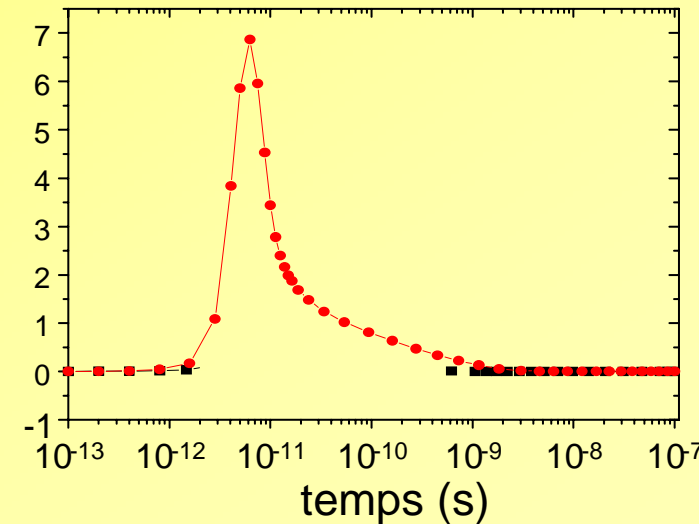
Le silicium est un des meilleurs détecteurs de radiations

Cf : photopiles solaires, détecteurs nucléaires



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

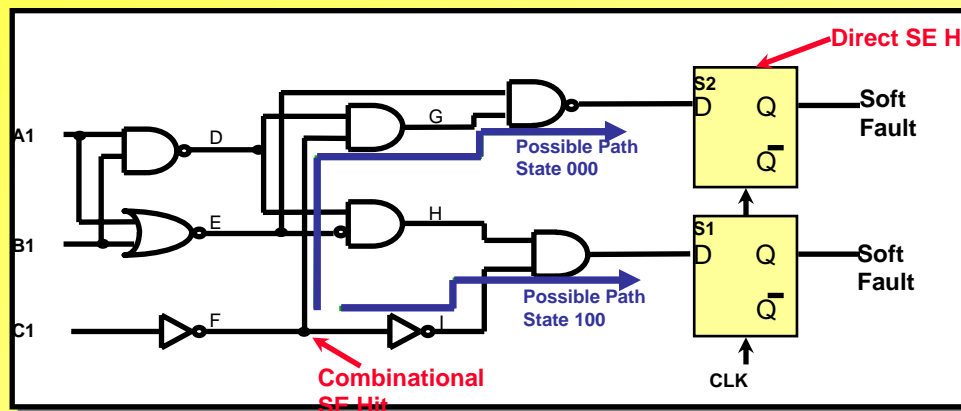
Impulsion de courant dans le transistor
milliampère/micron



• Une seule particule cause un transitoire

“Single Event Transient”

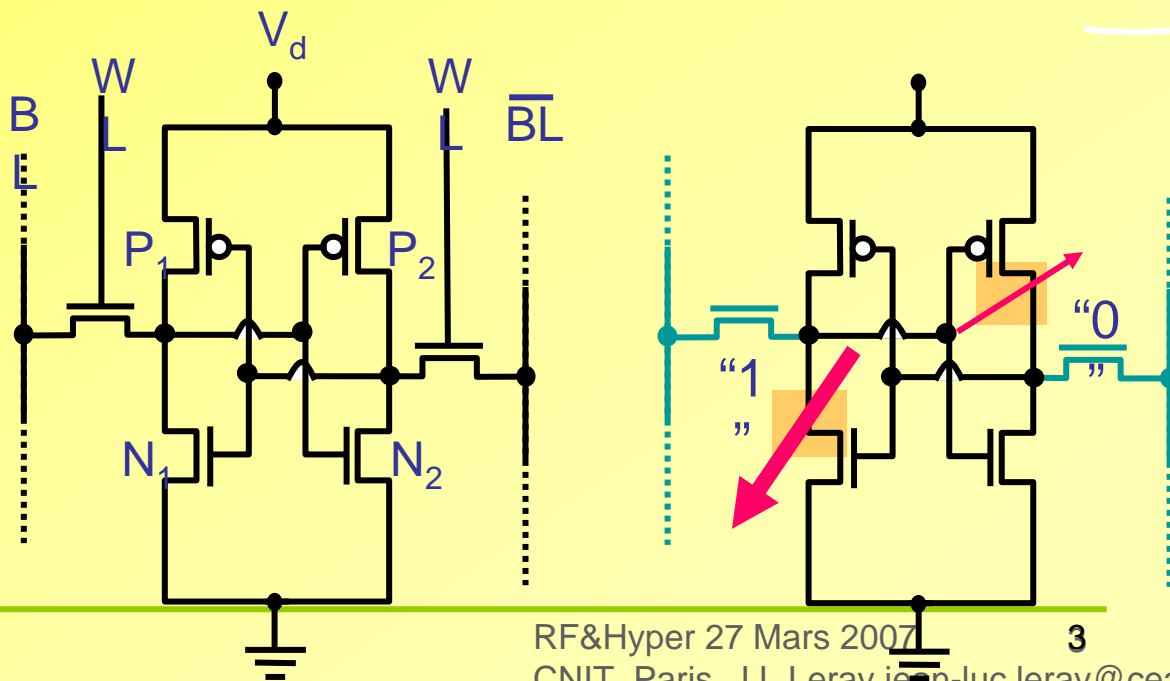
Massengil-99



• 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/cm²/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 »

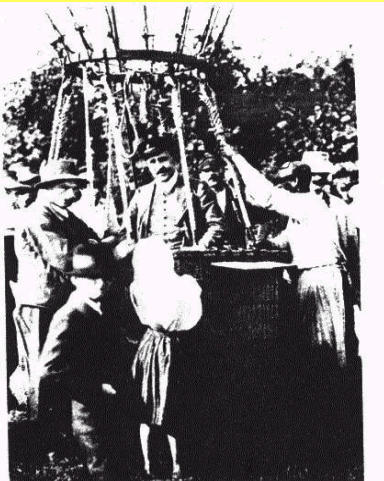
Unité légale	1 Gray	= 1 Joule/kilogramme
unité pratique	1 rad	= 1 centigray

Où sont les rayonnements ionisants ?

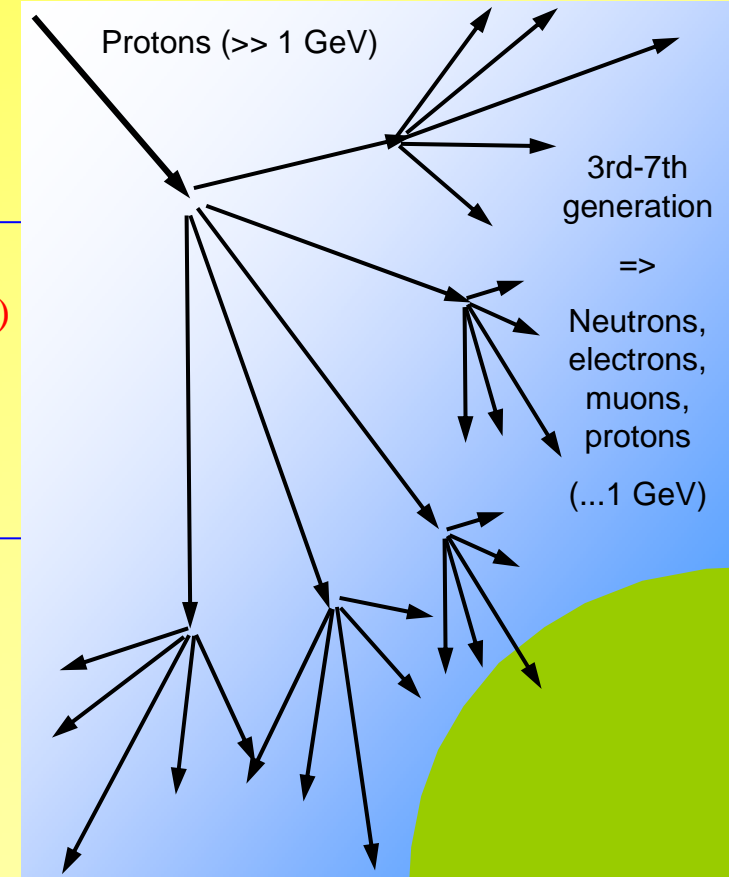
PARTOUT !

les neutrons cosmiques atmosphériques

- Ionosphère imaginée pour expliquer la propagation ionosphérique
(Kennelly-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)
NAMED « ULTRA-RADIATION » (COSMIC RADIATION)



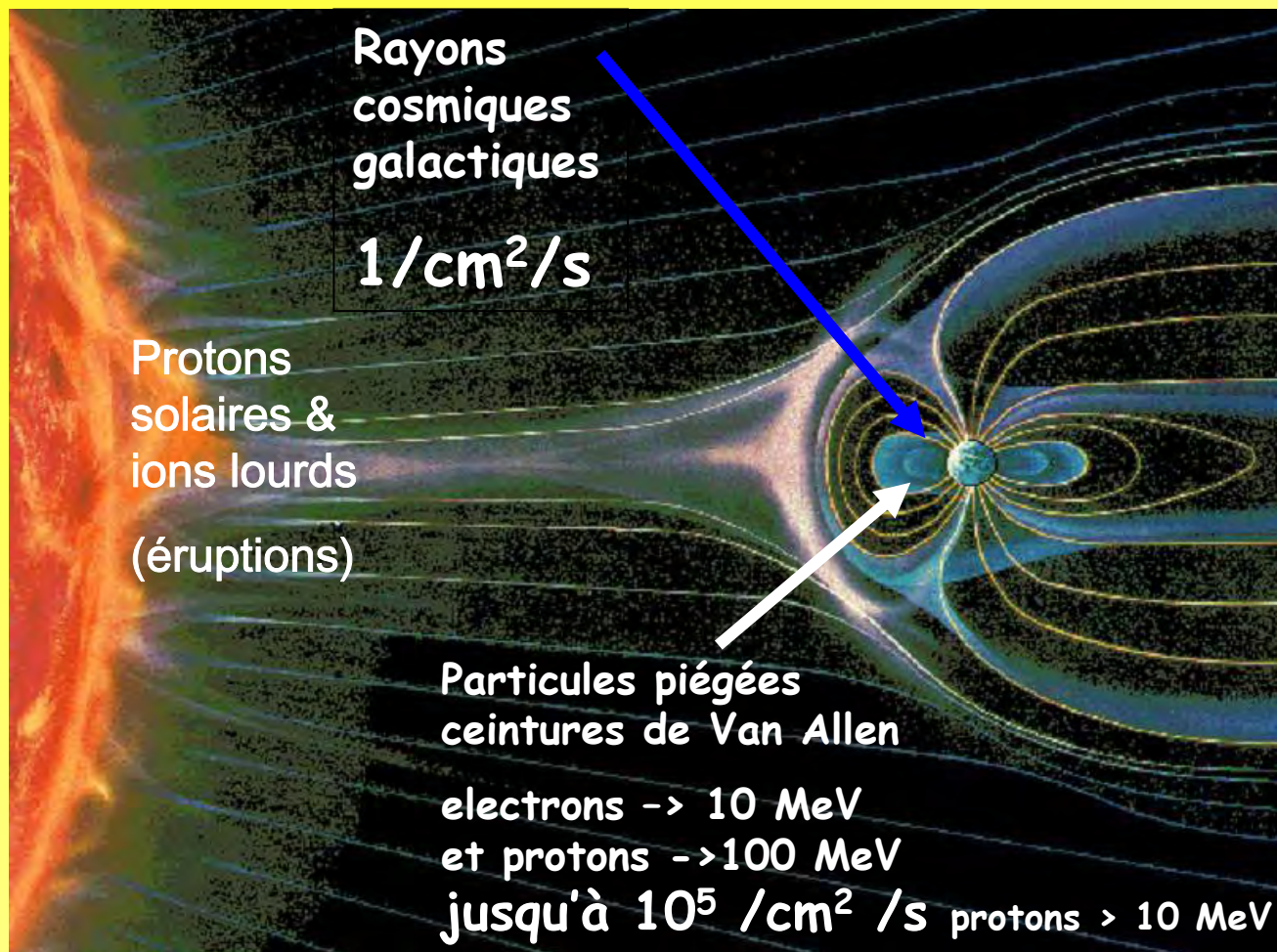
The man in the balloon is Victor Hess, safely back on Earth after ascending to 17,500 feet in 1912 to observe cosmic rays.



~10 neutrons/cm²/heure altitude zero (New York City)

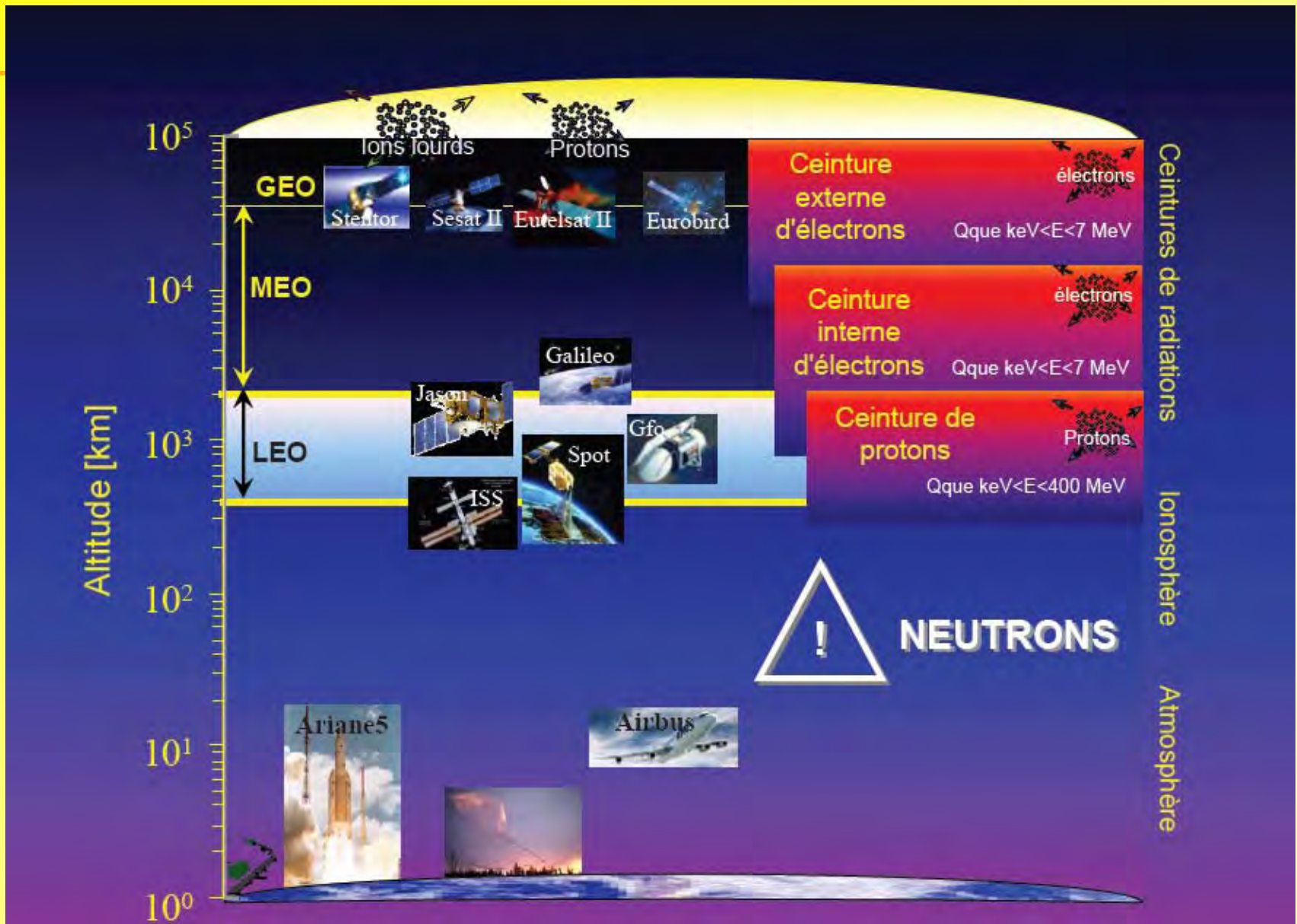
~1 neutron/cm²/seconde à l'altitude des jets (12.000 m - 40k pieds)

Le rayonnement cosmique et solaire spatial



ESPACE

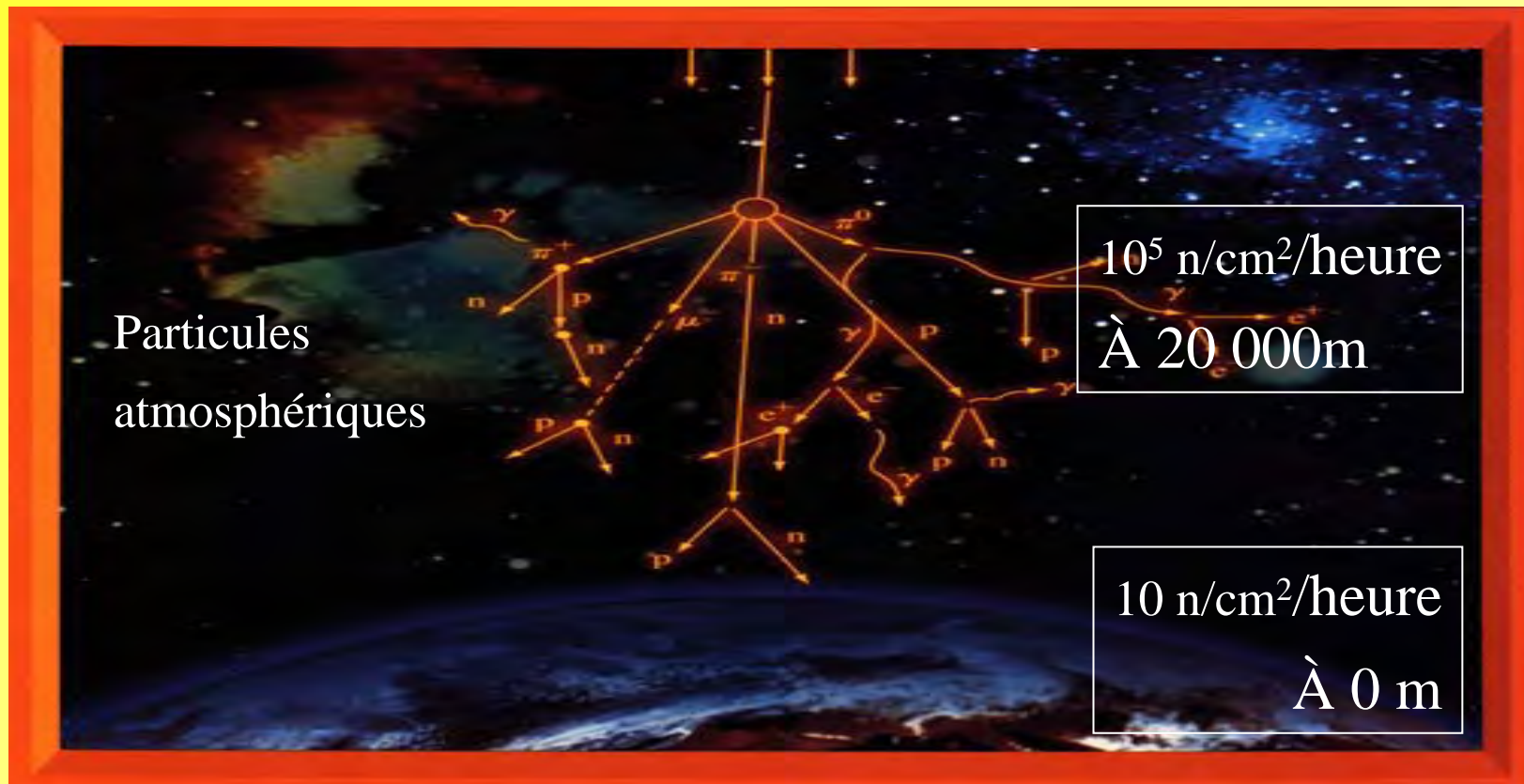
<http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/tour/vanallen.html>



D'Après Karine Castellani-Coulié, Université de Provence www.l2mp.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,).



Particules
atmosphériques

10^5 n/cm²/heure
À 20 000m

10 n/cm²/heure
À 0 m

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

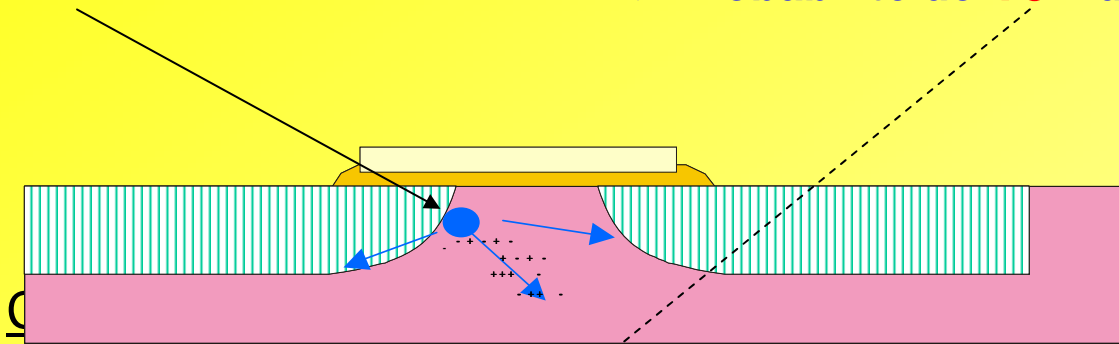
- Les neutrons (rapides > 1 MeV) sont **très invasifs** car ils interagissent rarement (pour $\sigma = 1$ barn = 10^{-24} cm²)
 - libre parcours entre 2 chocs de l'ordre de
 - matière solide => **10 cm** (épaisseur d'un mur)
 - air au niveau de la mer 1000 fois moins dense => **10.000 cm** = 100 mètres
- 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

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

neutron



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/cm²/heure

=> $10 \times 10^{-5} = 10^{-4}$ transitoire par cm² 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/cm²/heure

=> $10^4 \times 10^{-5} = 10^{-1}$ transitoire par cm² 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

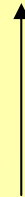
Year	2001	2004	2007	2010	2013	2016
Litho CD (nm)	130	90	65	45	32	22
Supply Voltage (V)	1.3	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4
Nodal Capacitance (fF)	2.00	1.38	1.00	0.69	0.49	0.34
Nodal Charge (fC)	2.60	1.38	0.70	0.42	0.25	0.14
Nodal Charge (electrons)	16250	8654	4375	2596	1538	846

Table according to [INTEL-01]

10 000 electrons

3 000 electrons

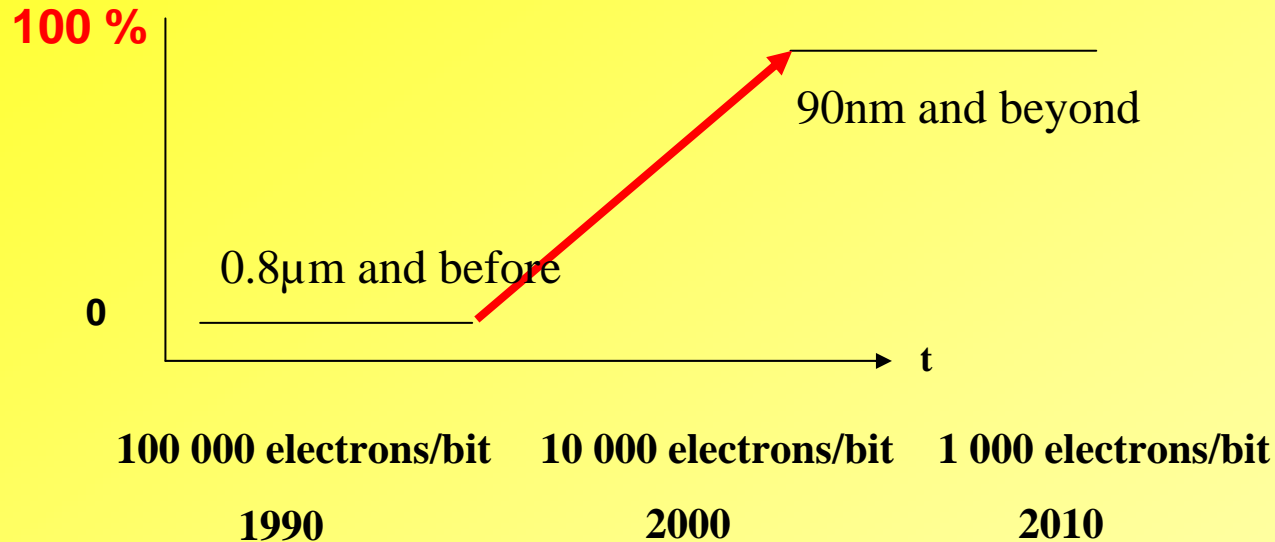
1 000 electrons



Conséquence de la loi de Moore

Toute technologie CMOS < 0.5µm est devenue vulnérable

Probabilité de basculement binaire à chaque passage de particule



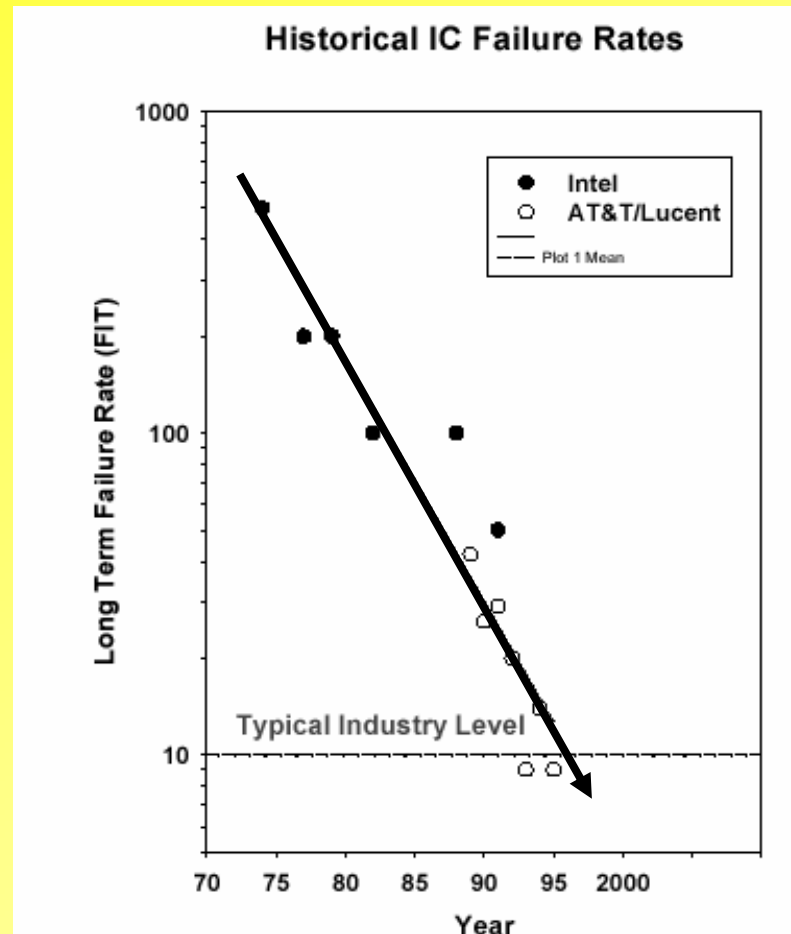
Le taux de défaillance (Upset Rate) augmente pour trois raisons :

Réduction de la charge stockée par bit (downscaling)

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

Complexity des systèmes (upscaling)

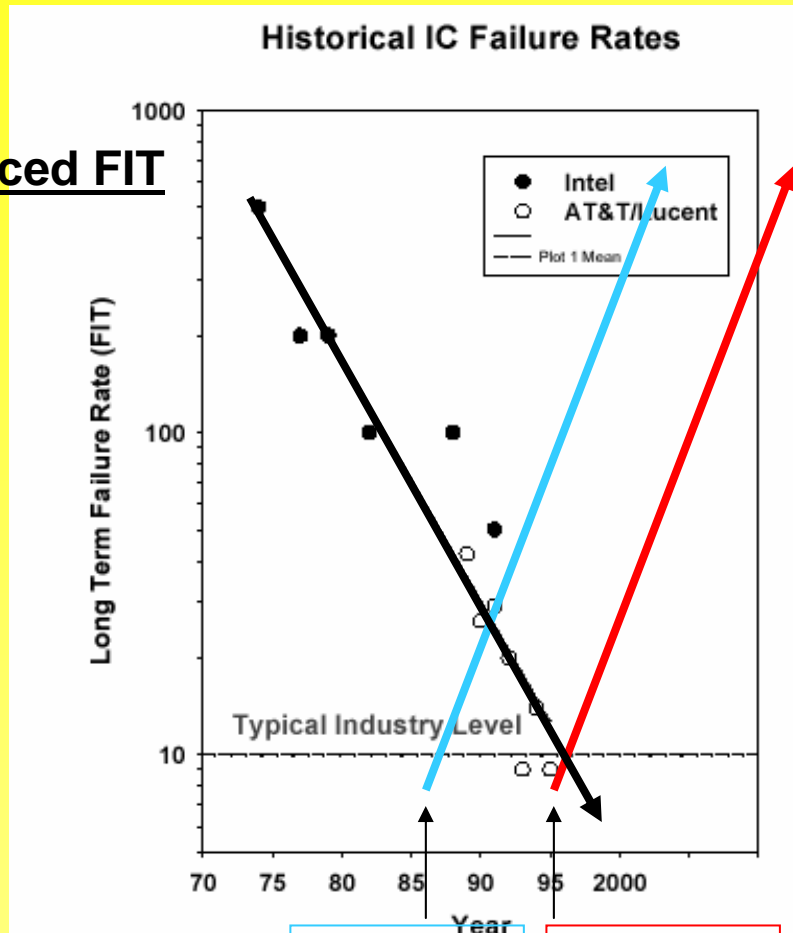
Or, les composants sont devenus de plus en plus fiables (à flux de particules maintenu nul)



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

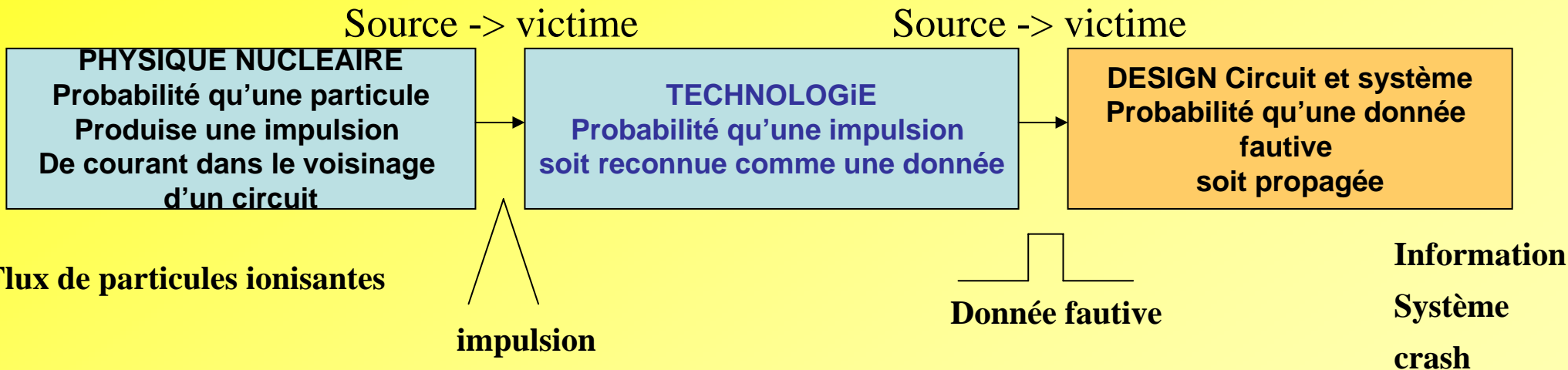
Sea Level
2000's

Additional FIT

due to Circuit
Sensitivity to
natural particle
environment

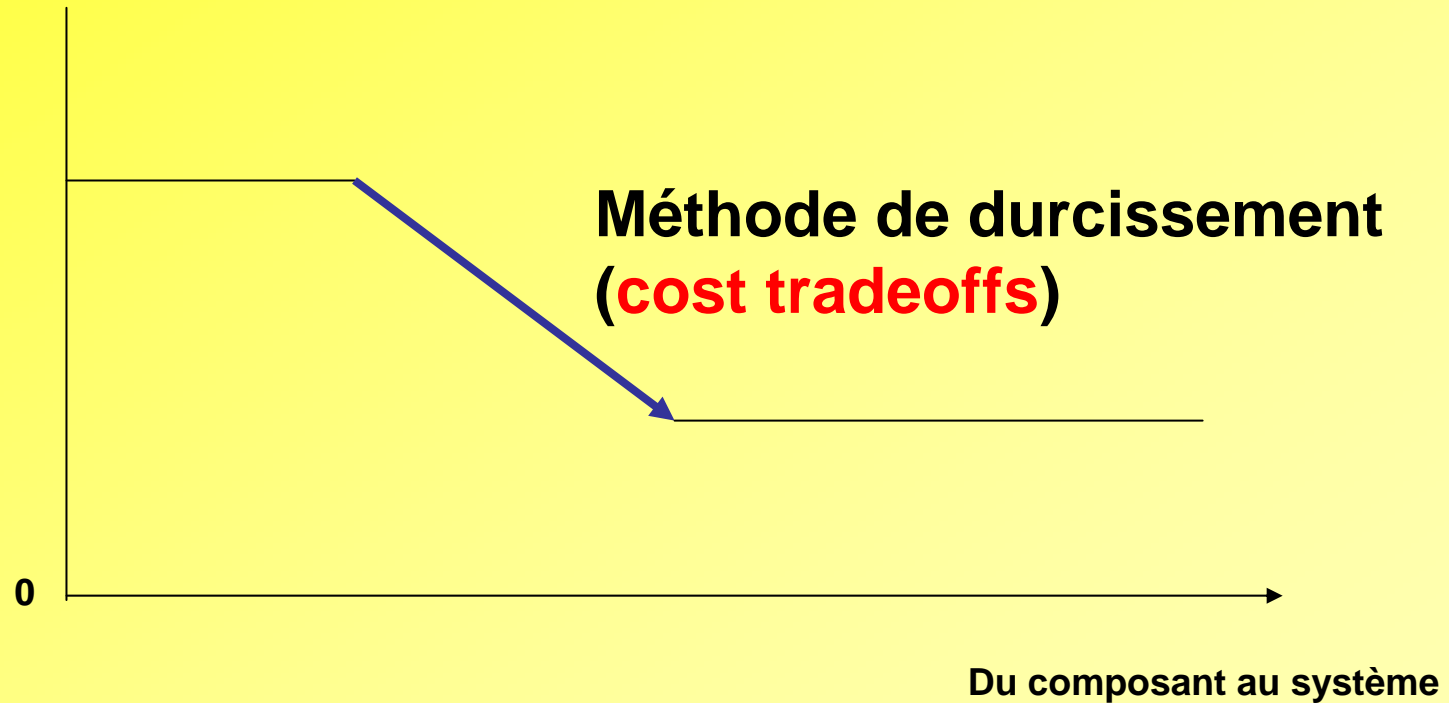
INTERNATIONAL RELIABILITY PHYSICS SYMPOSIUM 2002
Reliability Issues for Advanced
IC Technologies Anthony S. Oates

Le durcissement repose sur deux niveau de relations sources/victimes



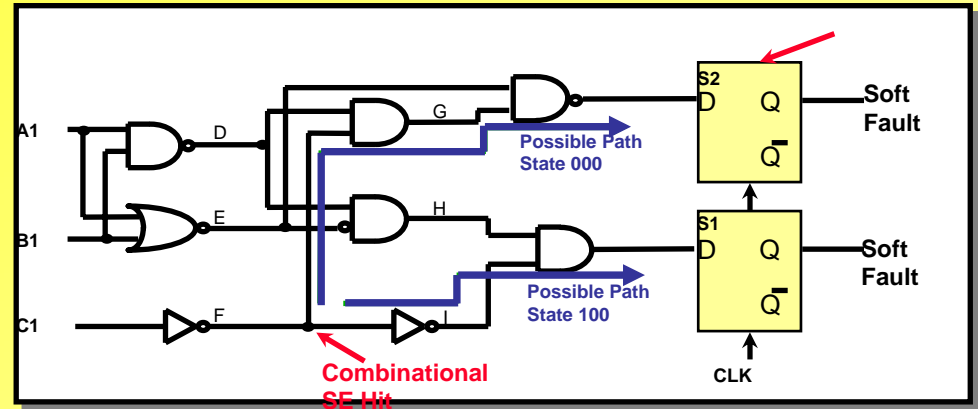
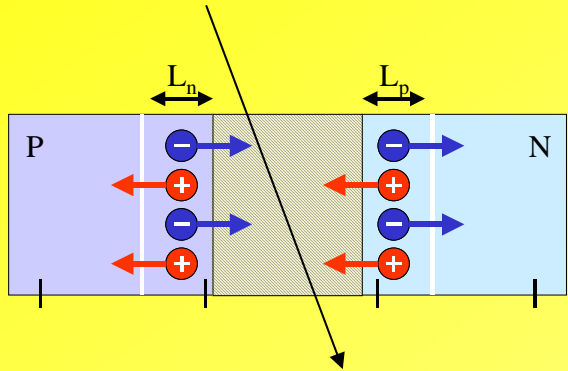
Réduction des éléments de la chaîne des sources/victimes

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** :

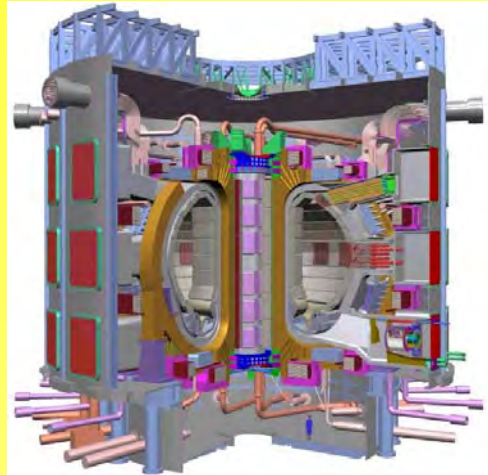
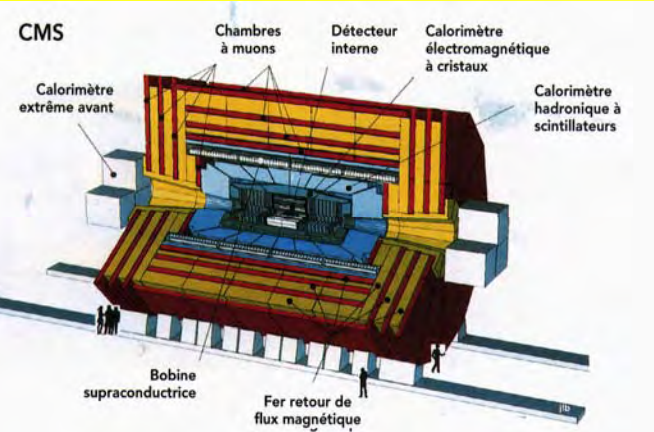
- **Où ? (quel flux, quelles particules)**
- **Quand ? (quelles technologies)**
- **Comment ? (quels circuits et systèmes)**

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



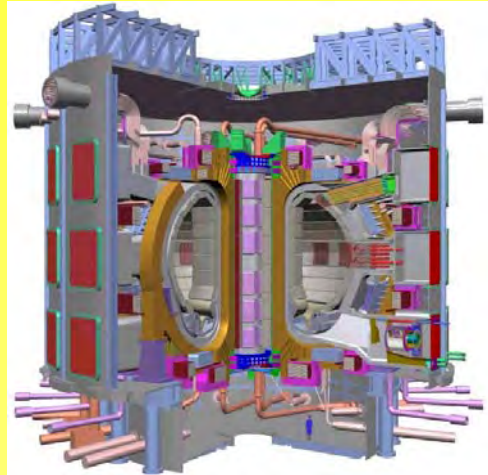
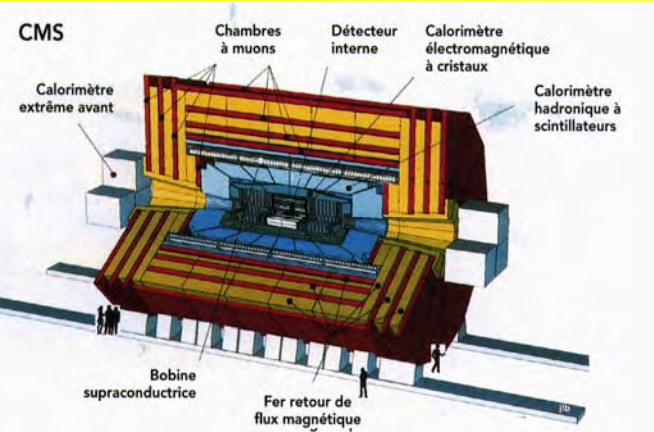
Le Large Hadron Collider
 CERN Genève
 Très hautes énergies
 par particule
 7 téraélectron-volts (0,5
 μJoule)
 Collisions p⁺ p⁻

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/cm²
 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 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 γ et neutrons par 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

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

Judi 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/>

Published

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