

# Effets des radiations ionisantes - une introduction -

Jean-Luc Leray  
CEA Commissariat à l'Energie Atomique  
et aux Energies Alternatives  
[jean-luc.leray@cea.fr](mailto:jean-luc.leray@cea.fr)

**Ecole d'Electronique Analogique**  
**Organisée par l'IN2P3, Formation Continue**  
**Fréjus, du 16 au 19 juin 2014**

# Résumé

**Les radiations ionisantes sont partout**

***Les sources – OÙ , QUAND , COMMENT ?***

***Les trois principaux effets***

***Les tests et les caractérisations***

***Comment faire ?***

***Le blindage est il efficace ?***

***Où trouver de la doc ?***

***Annexes : fibres optiques, électronique et avionique***

# L'objectif de cet exposé est de préciser les ordres de grandeur et les méthodes d'analyse et de résolution

Les fonctions primordiales : **digitales et analogiques, haute puissance aussi bien que basse tension**

Elles déterminent le bon fonctionnement des **sous-systèmes** :

- **Diagnostics expérimentaux (bien sûr)**
- **Contrôle commande du système en salle d'expérience**
  - Informatique, réseaux, liaisons optiques et filaires (Ethernet, etc..)
  - Cryogénie, pompage (vide), contrôle du plasma ou du faisceau, actionneurs, etc
- **Système d'énergie en salle d'expérience ou dans les diagnostics**
  - Puissance (haute et basse tension) et commande (informatique)
- **Système de gestion de la sécurité**
  - Alarmes, contrôle d'accès, mises en sécurité en cas d'alerte

**etc**

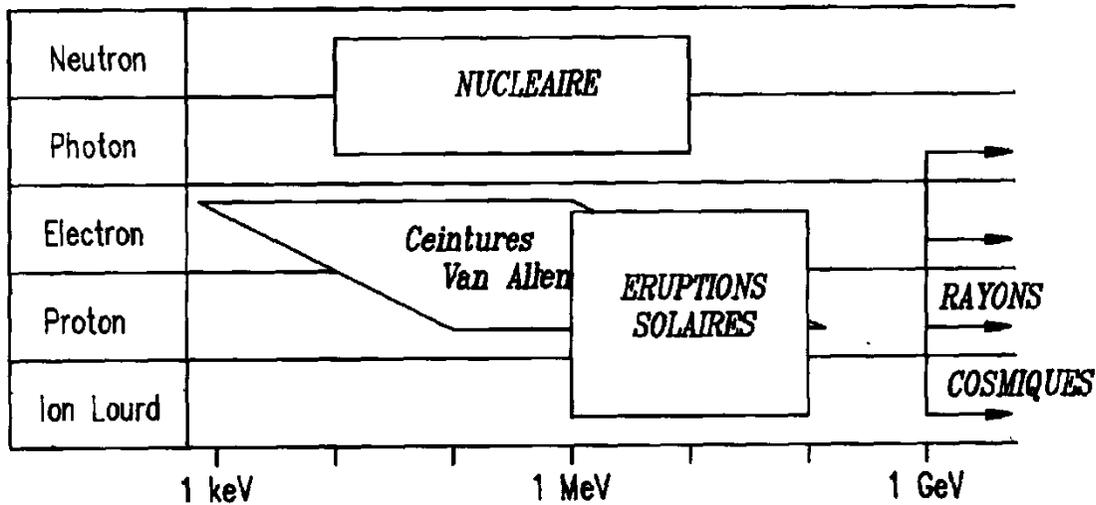
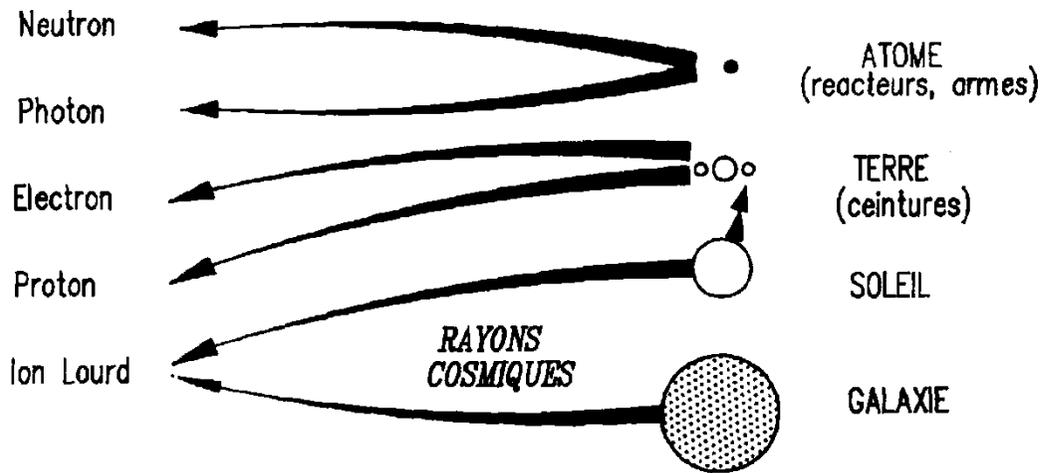
# Effets des radiations ionisantes - une introduction – Sommaire

- **1. Les radiations sont partout ! Flux vs. Fluence**
- **2. Effets « singuliers » à une particule et Effets « cumulatifs » à plus grandes fluences.**
- **3. Effets électriques « singuliers ».**  
**Courbe de la probabilité fonction du LET de la particule**
- **4. Effets cumulatifs « de la dose »**  
**Relation dose-fluence-energie**
- **5. Cas des particules massives (hadrons et leptons) chargées ou non**  
**Effets ionisants et d'endommagement des électrons, neutrons et protons**
- **6. Comment faire ?**  
**Référentiels de connaissance issus d'autres communautés**  
**(spatial, avionique, informatique, médical, etc)**

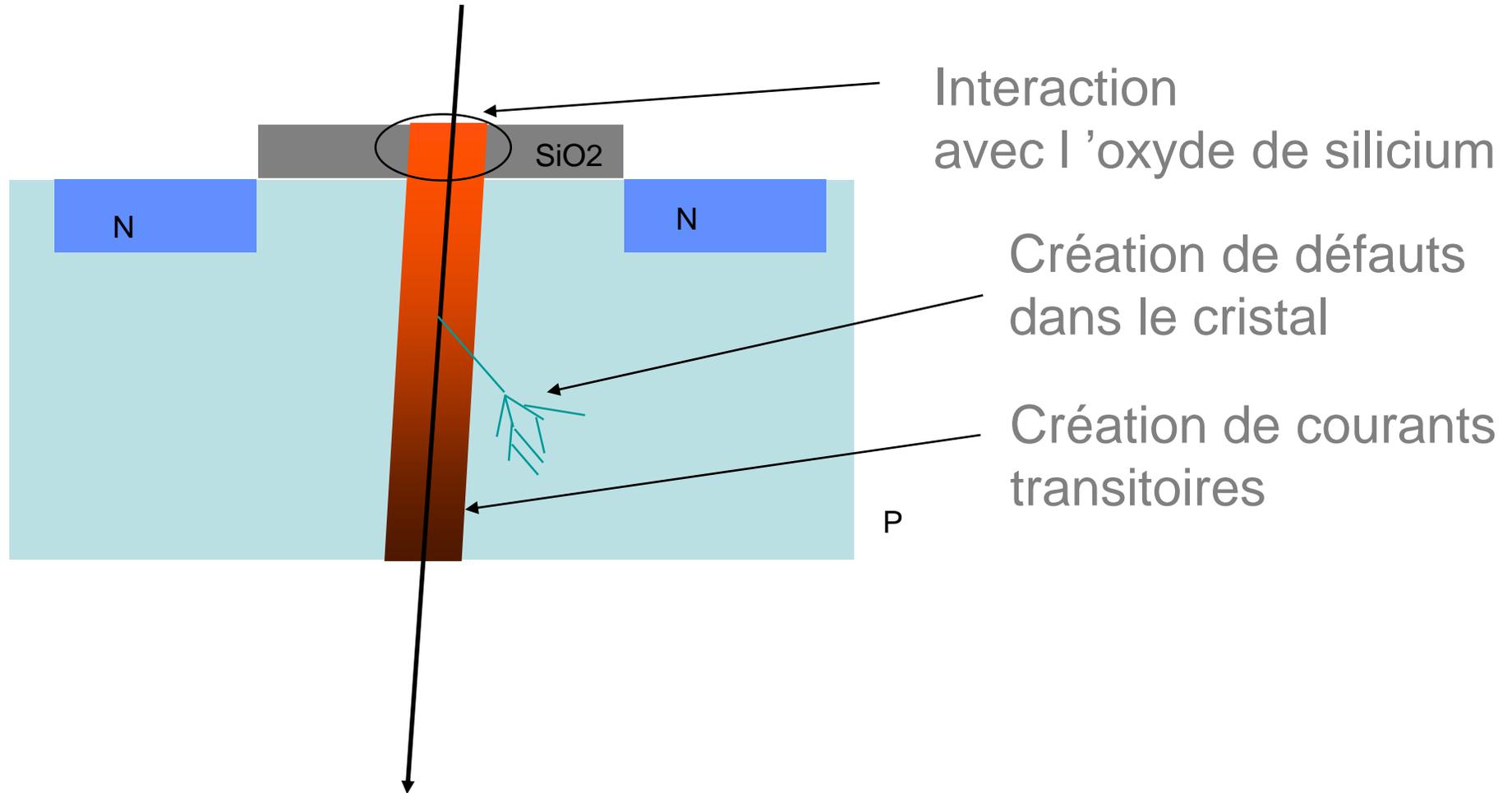
# Sommaire

- **1. Les radiations sont partout ! Flux vs. Fluence**
- **2. Effets « singuliers » à une particule et Effets « cumulatifs » à plus grandes fluences.**
- **3. Effets électriques « singuliers ».**  
**Courbe de la probabilité fonction du LET de la particule**
- **4. Effets cumulatifs « de la dose »**  
**Relation dose-fluence-energie**
- **5. Cas des particules massives (hadrons et leptons) chargées ou non**  
**Effets ionisants et d'endommagement des électrons, neutrons et protons**
- **6. Comment faire ?**  
**Référentiels de connaissance issus d'autres communautés**  
**(spatial, avionique, informatique, médical, etc)**

# Les principales particules ionisantes, en spatial et nucléaire



# Pour chaque « trace » (track), plusieurs genres d'interactions



# Perspective Historique

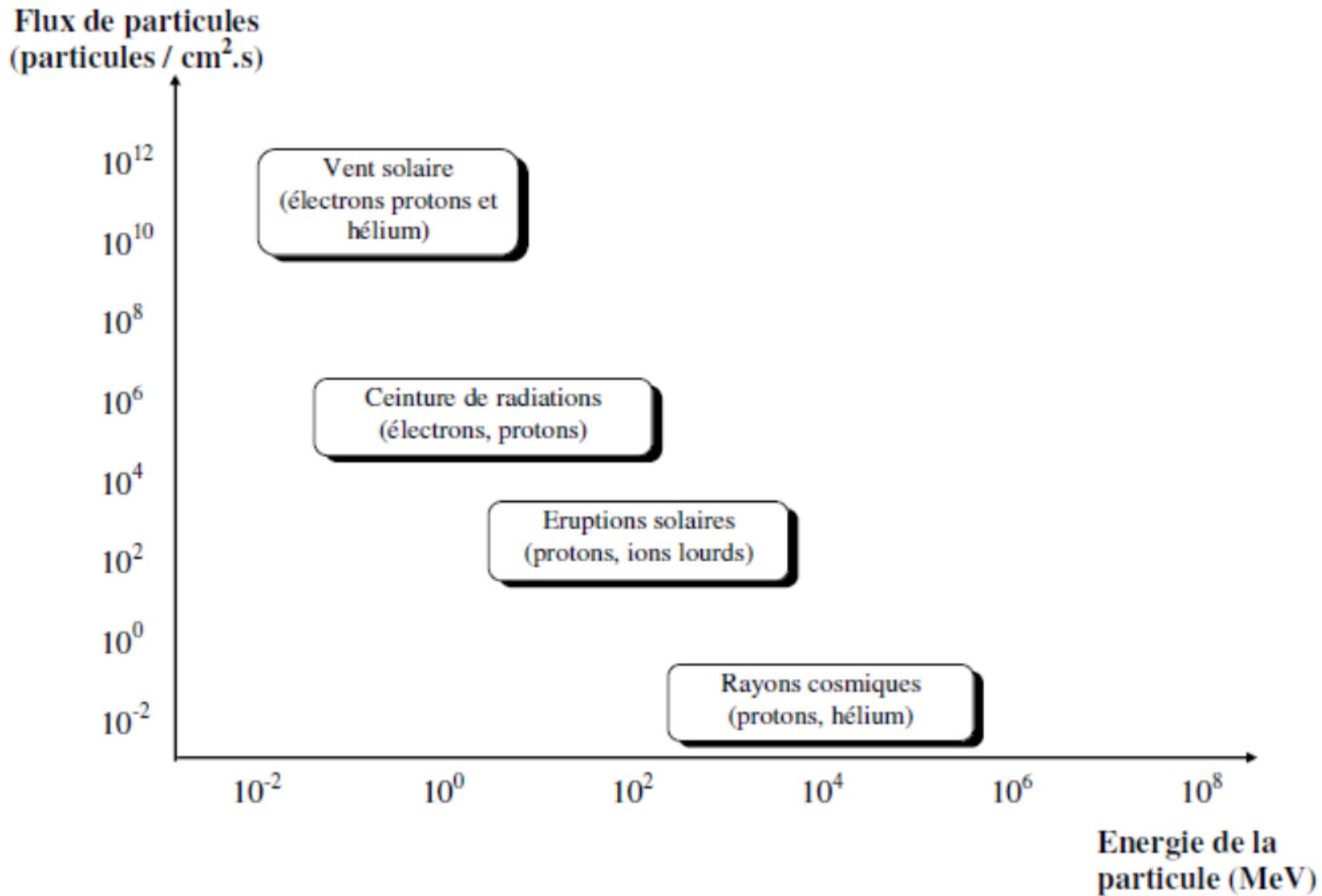
- **Années 50. APPLICATIONS MILITAIRES**
  - Explosions Nucléaires Haute Altitude n,γ
  - Missiles Stratégiques et Tactiques
  - Découverte des Ceintures de Van Allen : naturelles (58) et artificielles (58-62)
- **Années 60-70. APPLICATIONS SPATIALES CIVILES ET MILITAIRES**
  - Telecom, Navigation, Scientifique, Cartographie, Surveillance des Traités, Alertes p, e
  - Vulnérabilité des satellites (environnements naturel et artificiel) p, e, ions
- **Années 80. INDUSTRIE NUCLEAIRE (FISSION)**
  - Loss of Coolant Accident : Three Miles Island 1979 / 10 à 100 megarad en 1 semaine
  - Cellules de retraitement jusqu'à 100 megarad (n),γ
- **Années 90. GRANDS INSTRUMENTS DE PHYSIQUE CIVILS et MILITAIRES**

*Avant-Projets*

  - Théorie des Particules : Large Hadron Collider (CERN), [SSC (Dallas)] 10 à 100 megarad 10 ans K,π,n...
  - Fusion Inertielle : National Ignition Facility (USA), Le LaserMegaJoule (France) 10<sup>12</sup> rad/s 10nanosecondes n,γ
- **Années 2000. NEUTRONS ATMOSPHERIQUES**
  - 2001 Standard Microelectronique JEDEC JESD89 (SEMATEC)
  - 2004 Standards IEC 107 Boeing et Airbus
- **Années 2005**

*Mise en service*

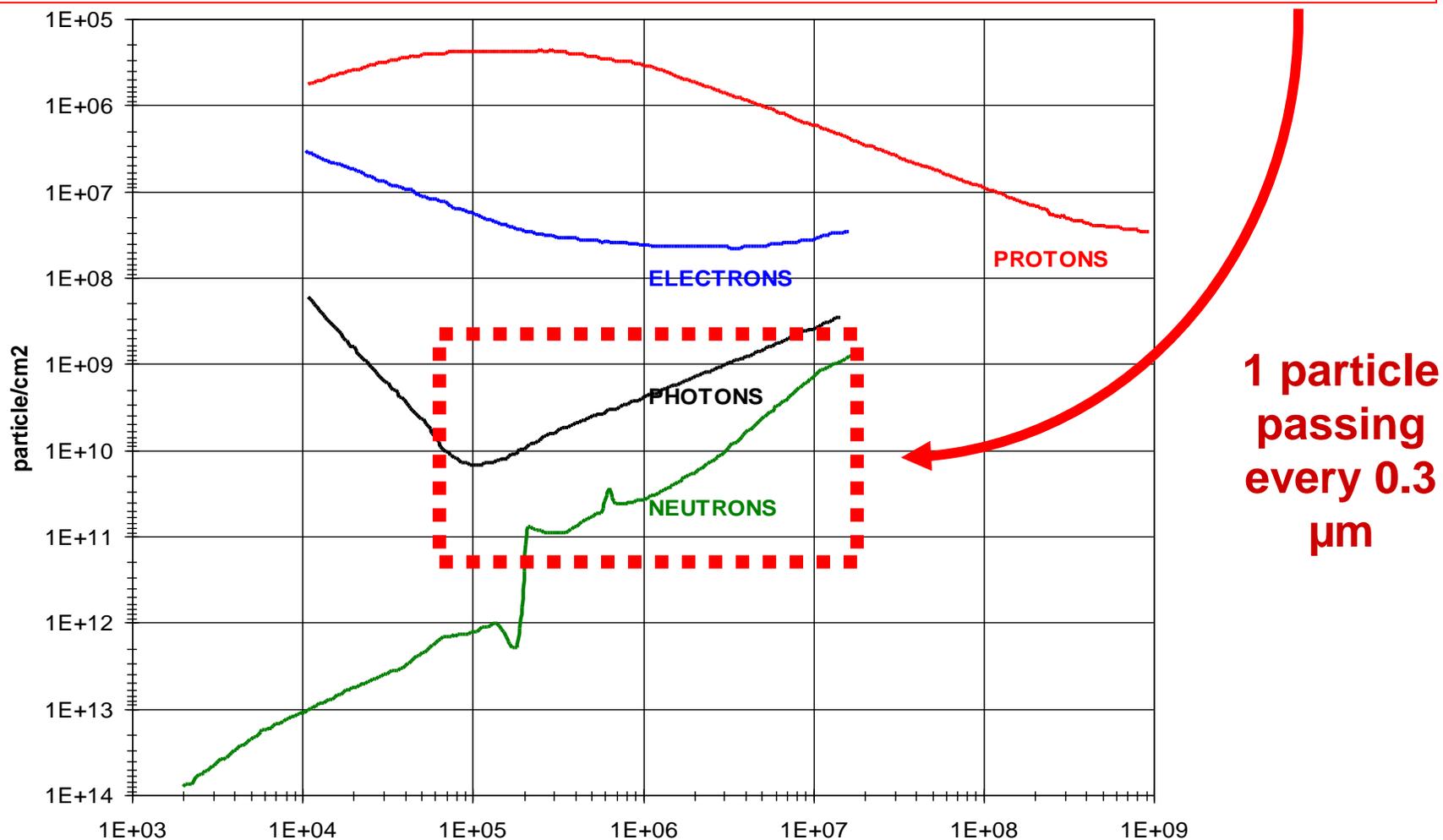
  - 2007-8-9-10 Large Hadron Collider n
  - 2008...2018 Fusion Inertielle : National Ignition Facility (USA), Le LaserMegaJoule (France, Bordeaux) K,π,n... n,γ
- **Années 2010. INDUSTRIE NUCLEAIRE (FUSION) Avant-Projets**
  - 2008-2018 Fusion Magnétique ITER (France, Cadarache) n,γ



# L'environnement radiatif spatial

PROVENANCE	PARTICULES	ENERGIES	FLUX
Ceintures de radiations	Protons	< qq. 100 MeV (dont 99% < 10 MeV)	$10$ à $10^6$ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
	Electrons	< 7 MeV (dont 99% < 2 MeV)	$10^{-2}$ à $10^7$ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Vent solaire	Protons Electrons Particules $\alpha$ (7 à 8 %)	< 100 keV < qq. keV	$10^8$ à $10^{10}$ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Eruptions solaires	Protons	10 MeV à 1 GeV	$10^{10}$ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
	Particules $\alpha$ IONS LOURDS	10 MeV à qq. 100 MeV	$\sim 10^2$ à $10^3$ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Rayons cosmiques	Protons (87 %) Particules $\alpha$ (12 %) IONS LOURDS (1 %)	$10^2$ à $10^6$ MeV Fortes énergies 1 MeV à $10^{14}$ MeV	$1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 100 MeV $10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $10^6$ MeV

ONE RAD CORRESPONDS TO  $10^9 - 10^{11}$  photons or neutrons on the energy range of interest 100 keV- 14 MeV



Relation between dose and fluence of gammas and X-rays of any kind for homogeneous ionizing dose deposition (after [VANL 75]).

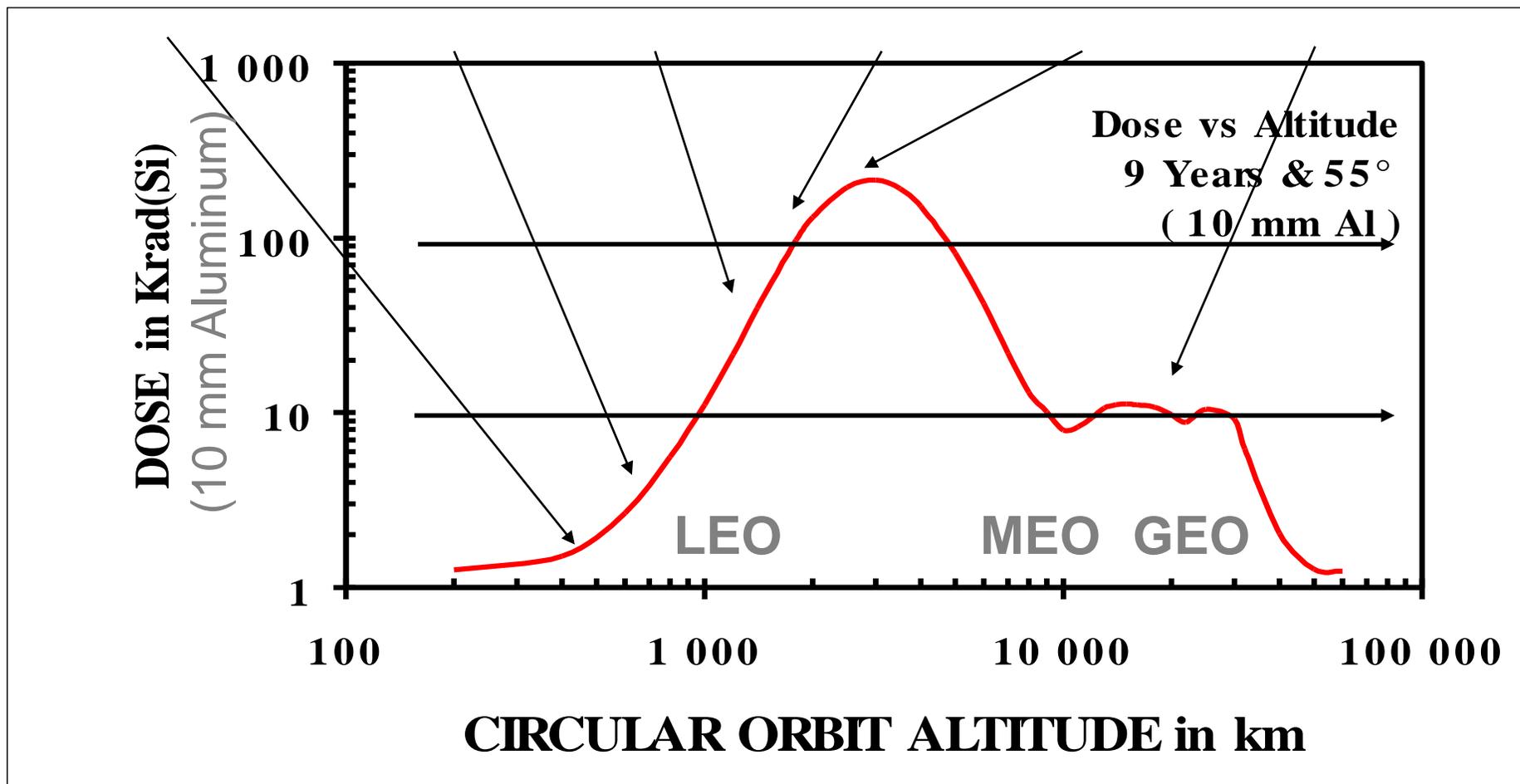
# Electronique spatiale : satellites terrestres

La dose de radiation dépend de l'orbite

Blindage typique de 1 cm d'Aluminium

Quelques satellites typiques

Space Station, Iridium, Celestri, Skybridge, Ecco, GPS-II, Ico, etc



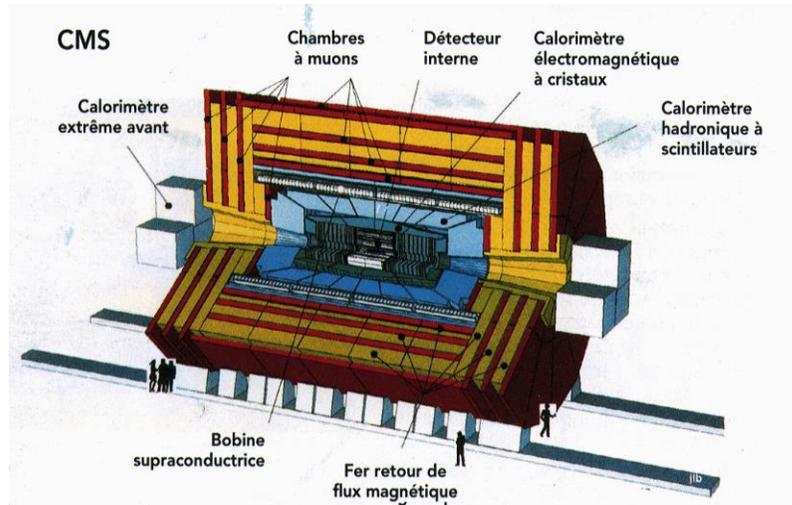
# Spécification selon la catégorie de composant (étude statistique du CNES, vers 2000)

## Compromis Blindage et tenue typique du composant

Category	Function	Dose (krad(Si)) for 10 Years
Diodes	Ultra High Frequency	120
	Signal	80
	Zener	40
Transistors	UHF	160
	Bipolar	50
	Power MOS	10
Linear Integrated	Amplifiers	30
	Regulators	40
Digital Integrated	Bipolar TTL-LS	80
	CMOS 4000B	40
	HCMOS	15
Microprocessors		10
Memories		10



# Particules artificielles : deux systèmes de recherche



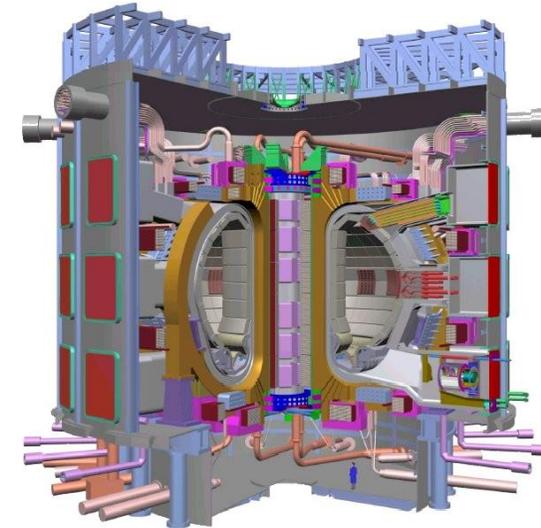
LHC, CERN, 1989-2009

Détecteur par ex. ATLAS et CMS

Full custom ASICs

Design et Procédures  
de production

**Assurance-Durcissement**



Réacteur Thermonucléaire Iter ...  
Cadarache, France

2006 (traité international)

→2019 (plasma)-2027 (neutrons)

Electronique de controle commande et de  
sécurité = Electronique industrielle

“Procurement” au niveau  
composant/équipement/système  
=> design système et procedures de qualification  
**Radiation Tolerant Iter Policy**

# Composants du commerce exemple de données publiées tous les ans

## (NASA/JPL website et IEEE/Nuclear and Space radiation Effects conference data workshop)

TABLE I. SUMMARY OF RECENT TID/DD TEST RESULTS AT THE JET PROPULSION LABORATORY (CONT'D.)

Part Type	Description	Tech.	Mfr.*	Date Code	Sample Size	Dose Rate (rad/s)	Bias During Exposure	Failure Parameter	Spec. Limit	Pre-Rad Value	Av. Dose/Fluence to Parm. Failure	Av. Dose/Fluence to Func. Failure	Comments
IRFMG40	MOSFET, 1000V	N-channel	Int. Rect.	0032	8	25 (HDR)	Gate or drain biased	BVDs, IDSS, & VG(th)	various		~14 krad	>16 krad	Usable to ~16 krad with some parameter derating @ high/low temperatures
LF2802A	MOSFET, RF	N-channel	M/A-Com	01F15	6	50 (HDR)	Various biases	VG(th)	various		5 krad	>10 krad	Usable to >5 krad with VG(th) derating
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	50 (HDR)	Biased	VOS	2 mV		5 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	50 (HDR)	Unbiased	VOS	2 mV		5 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	0.01 (LDR)	Biased	IB+	50 nA		3-4 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	0.01 (LDR)	Unbiased	IB+	50 nA		3-4 krad	>30 krad	Scotland foundry
LT1006A	Op Amp	Bipolar	Lin. Tech.	9626A	5 per group	HDR & LDR	Biased & Unbiased	VOS	180 μV	<50 μV	12 krad (LDR, biased)	10-15 krad (HDR, biased)	Generally OK to 10 krad; R-LAT recommended
LTC1157CS8	MOSFET driver	CMOS	Lin. Tech.	819	5	25 (HDR)	Biased	Voh, Icel	--	--	3 krad		OK to 2.5 krad
LTC1604AIG	A/D converter, 16-bit	CMOS	Lin. Tech.		4	25 (HDR)	Biased	Bipolar Gain Error					Bipolar gain error slightly out of specification at 100 krad
MAX306EW1	Multiplexer, 16-channel	CMOS	Maxim	0143	3	25 (HDR)	Biased	Functional	--	--	--	<1 krad	Address lines high
MAX306EW1	Multiplexer, 16-channel	CMOS	Maxim	0143	4	0.01 (LDR)	Biased (see comment)	ID(on)	300 nA	20 nA	3 krad	5 krad	Address lines cycled continuously
MAX539	D/A Converter, 12-bit	CMOS	Maxim	GF008	4	25 (HDR)	Biased, clocked	Linearity, supply currents			>10 krad	<20 krad	Minor parametric changes within spec. at 10 krad
OPA687N	Op Amp, wide-band	Bipolar, very high speed, complementary	Tex. Instr. (Burr Brown)	0231	5 per group	0.01 (LDR)	Biased & Unbiased	No significant changes after 30 krad	--		>30 krad	>30 krad	
PSS-QP50-6-SM	Quadrant photo-diode (Si)	Si diode	Pacific Silicon Sensor	0123	8	Protons	Unbiased	Responsivity		1 mA	2.4E11 p/cm <sup>2</sup> [-40 krad(Si)]		Responsivity degraded ~20% @ 1 krad, & ~50% @ 15 krad.
UC1717J (5962-9474601MEA)	Stepper-motor driver	Bipolar IC	Tex. Instr. (Unitrode)	0144A	5 & 4	0.01 (LDR)	5 Biased, 4 Unbiased	Comparator threshold voltage	--	--	--	~16 krad	

# Base de travail RadTol Policy (2013-14) : seuils d'alerte exemple des expérience de fusion, building Tokamak

	Sub-system	DOSE	EFFETS d'endommagement	EFFETS SINGLE EVENT
	En dessous de ces valeurs, RAS  Au delà, examen impératif	Accumulated dose rad(Si) (gamma et neutrons)	Neutron fluency (1 MeV Si eq. n.cm <sup>-2</sup> )	Neutron flux (n.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )
1	Critical system with electronics (calculateurs, liaisons Ethernet, alims)	100 (0,1 kilorad)	10 <sup>8</sup>	10
2	Non-critical system with electronics (certains diagnostics, servitudes)	1000 (1 kilorad)	10 <sup>10</sup>	10 <sup>2</sup>
3	Critical system without electronics (relais, thermocouples, ...)	10 <sup>5</sup> (100 kilorad)	N.A.	10 <sup>4</sup>
4	Non-critical system without electronics (cables, moteurs, etc)	10 <sup>6</sup> (1 Mégarad)	N.A.	10 <sup>5</sup>

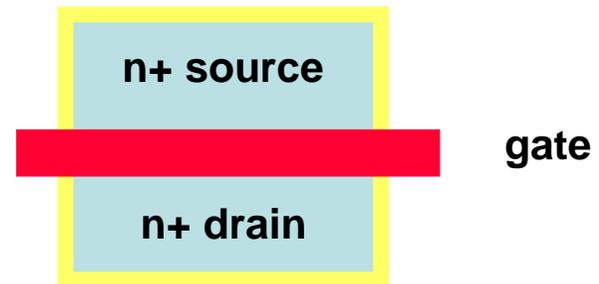
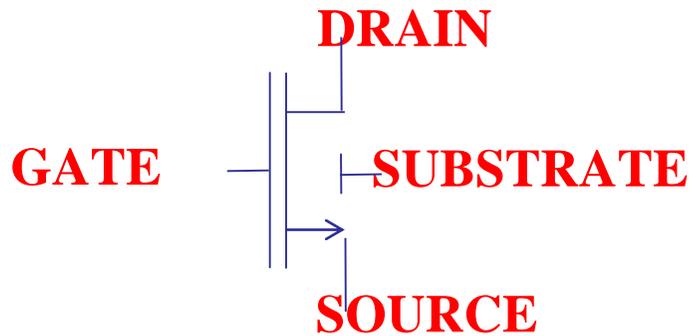
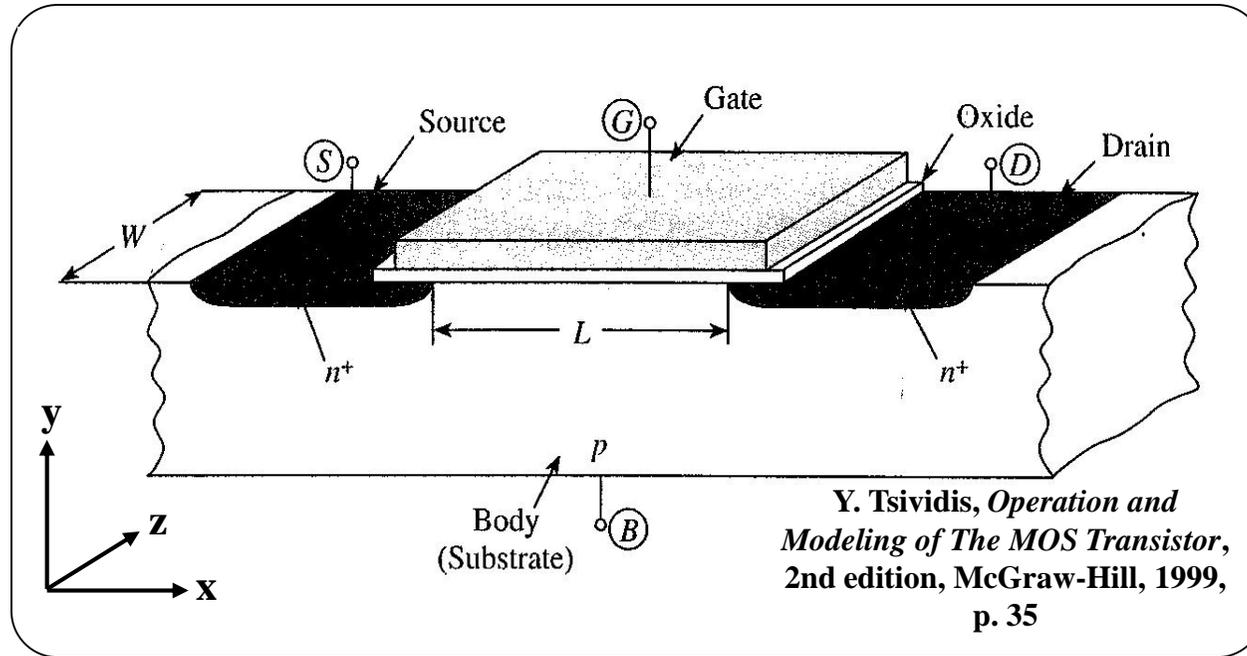
# Sommaire

- 1. Les radiations sont partout ! Flux vs. Fluence
- 2. Effets « singuliers » à une particule et Effets « cumulatifs » à plus grandes fluences.
- 3. Effets électriques « singuliers »
- 4. Effets cumulatifs « de la dose ». Relation dose-fluence-energie
- 5. Cas des particules massives (hadrons) chargées ou non
- 6. Comment faire ?
- 7. Référentiels de connaissance issus d'autres communautés (spatial, avionique, etc)

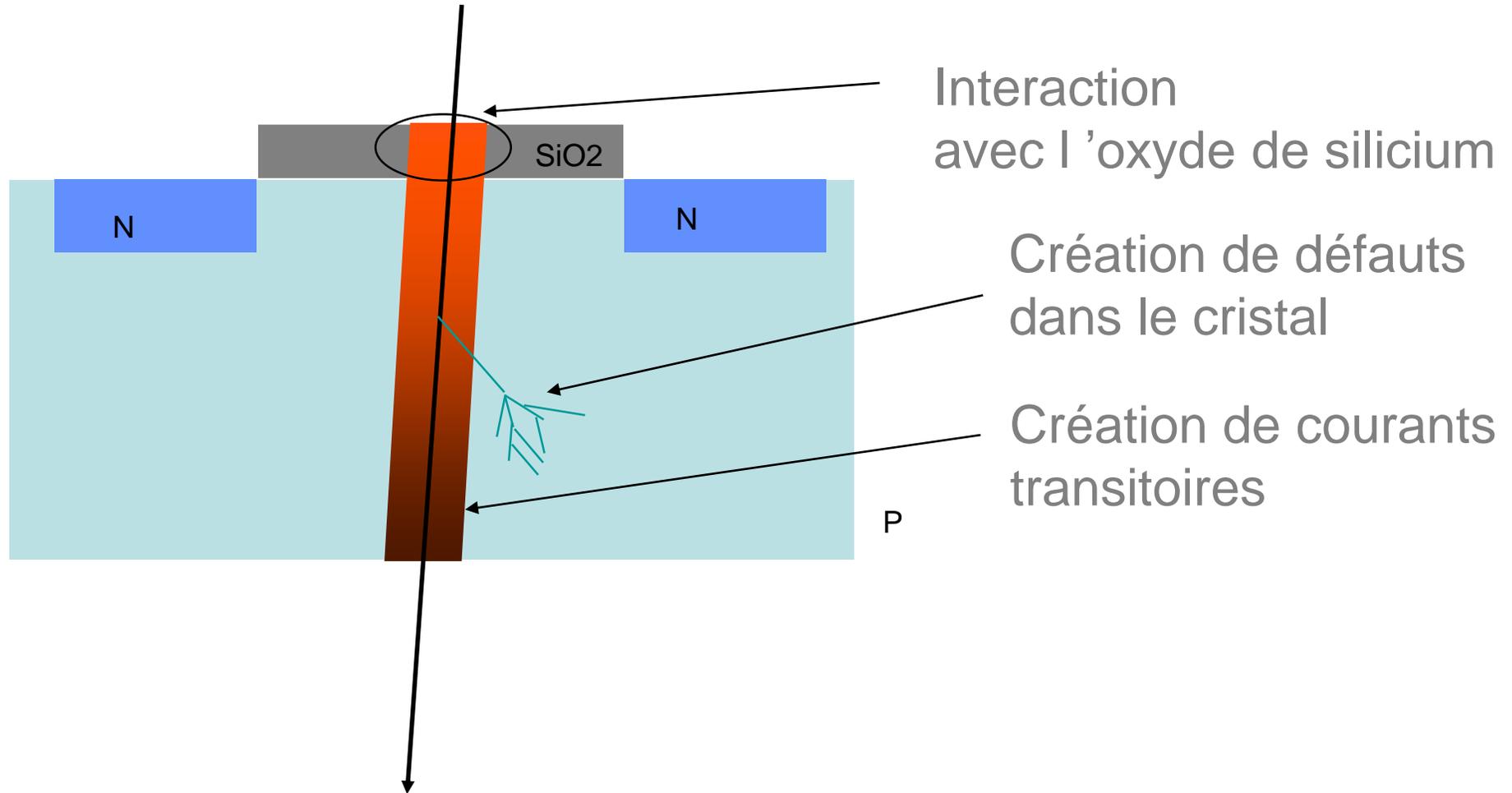
# ELECTRONIQUE

## LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP

c'est la brique de base



# Pour chaque « trace » (track), plusieurs genres d'interactions



# Effets collectifs et effets singuliers

- Effets singuliers (« SEE single event effects »)

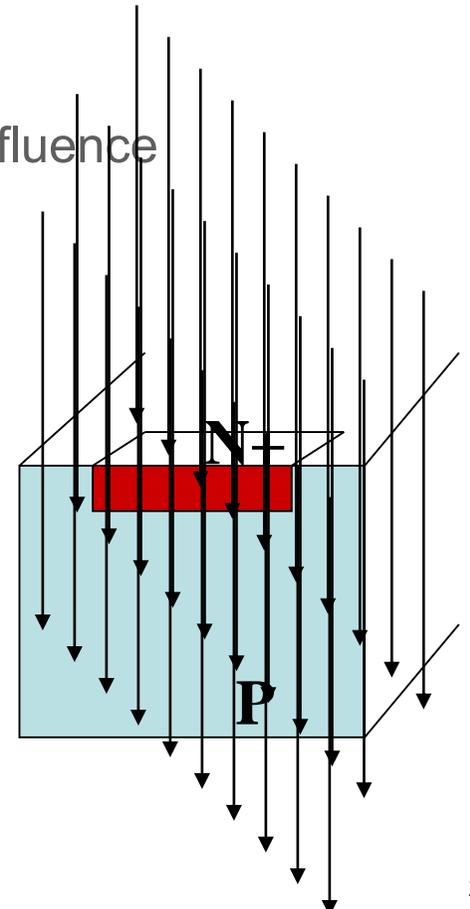
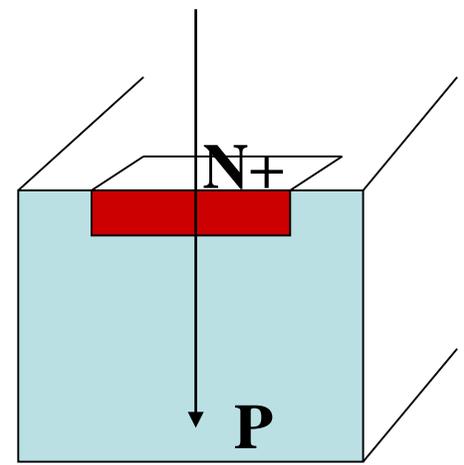
Effet lié à l'interaction d'une seule particule

⇒ Effet probabiliste

- Effets collectifs (« TID total integrated dose »)

Somme des effets d'un grand nombre de particules

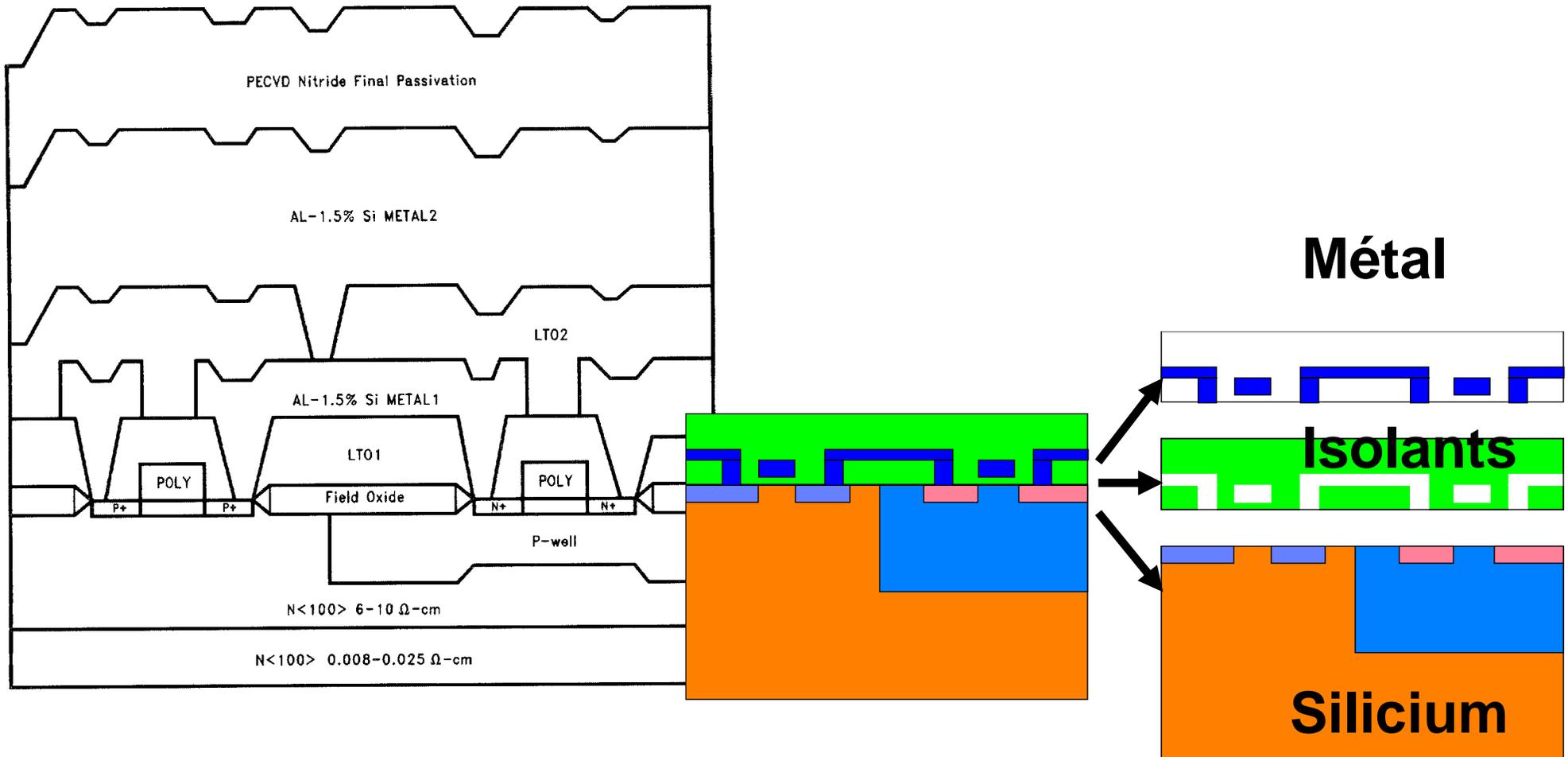
⇒ Effet moyen, variation continue d'un paramètre avec la fluence



# Sommaire

- 1. Les radiations sont partout ! Flux vs. Fluence
- 2. Effets « singuliers » à une particule et Effets « cumulatifs » à plus grandes fluences.
- 3. Effets électriques « singuliers » à une particule
- 4. Effets cumulatifs « de la dose ».
- 5. Cas des particules massives (hadrons) chargées ou non – effets d'endommagement
- 6. Comment faire ?
- 7. Référentiels de connaissance issus d'autres communautés (spatial, avionique, etc)

# Un circuit intégré comporte trois types de couches

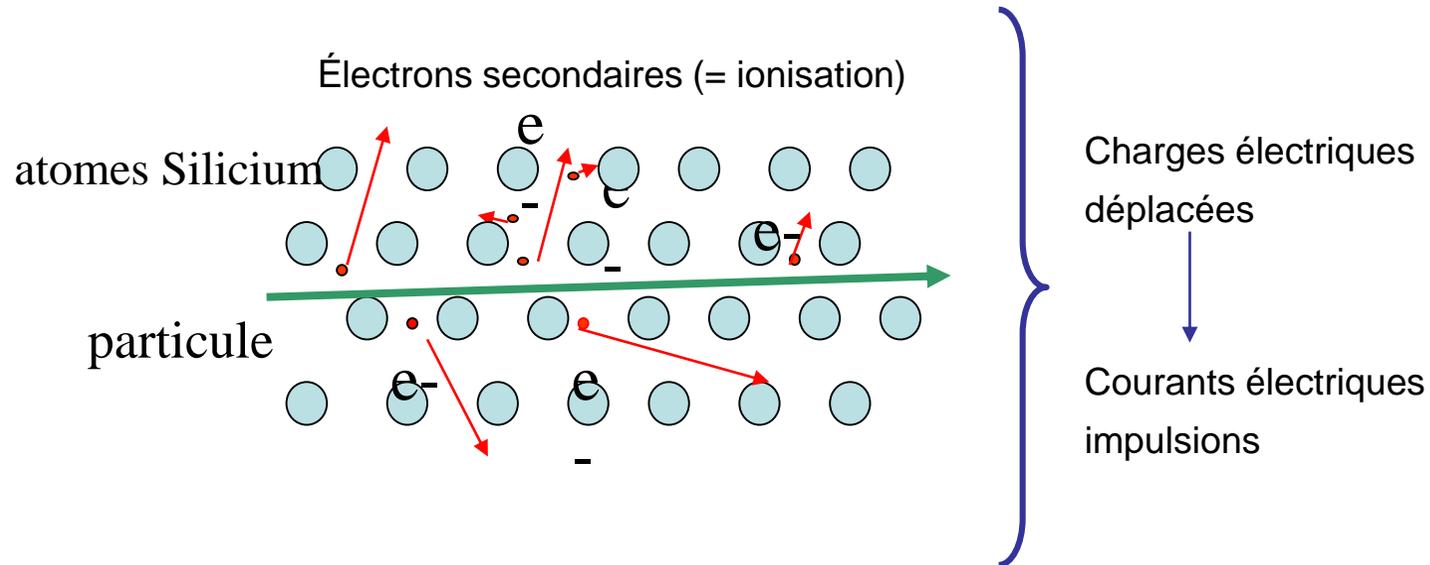


**FACT™ 54ACxx 2 μm CMOS**



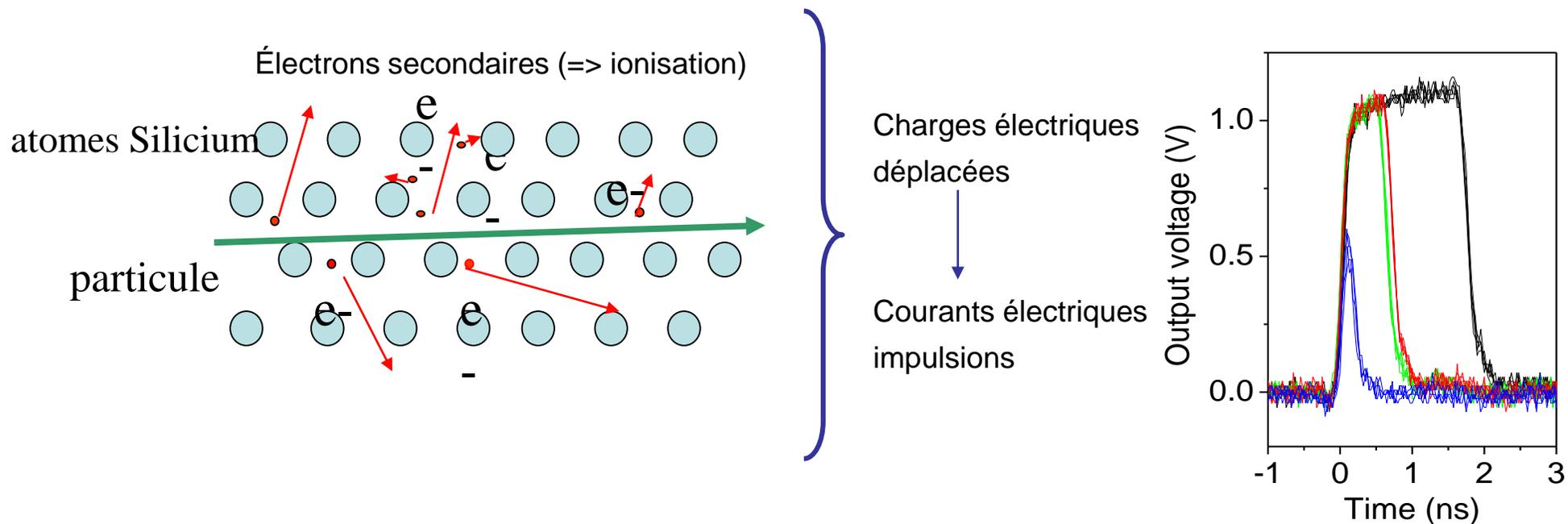
# Le bonheur des uns ne fait pas le bonheur des autres !

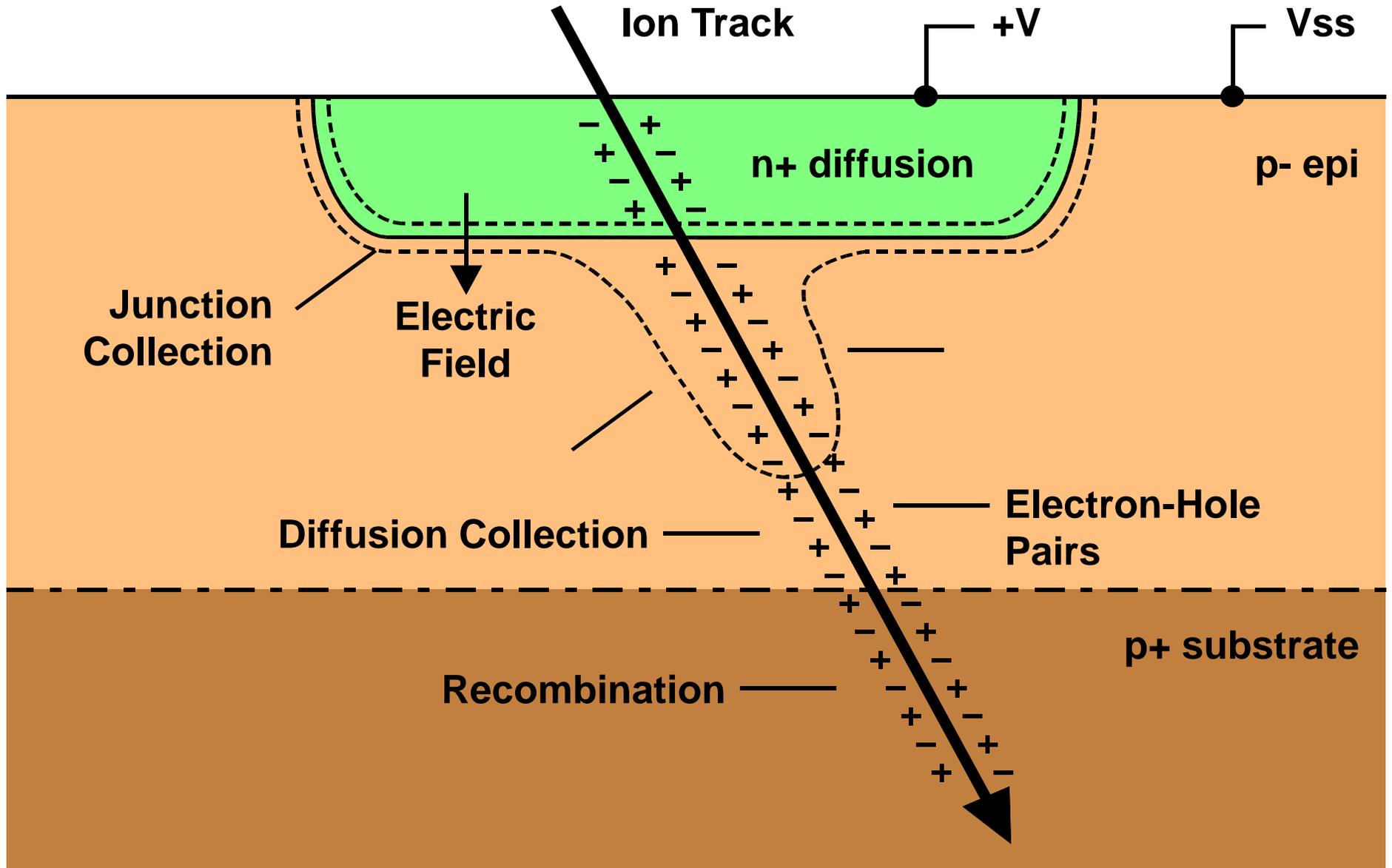
- « Le silicium est un des meilleurs détecteurs de radiations qui soit ». Cf : photopiles solaires, détecteurs nucléaires
- Mais les composants sont précisément à base de silicium à 99.xxx%...



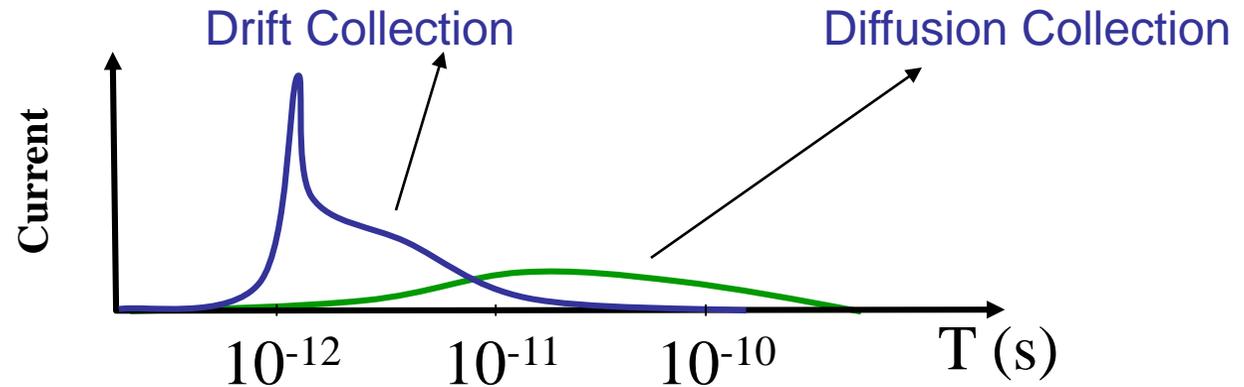
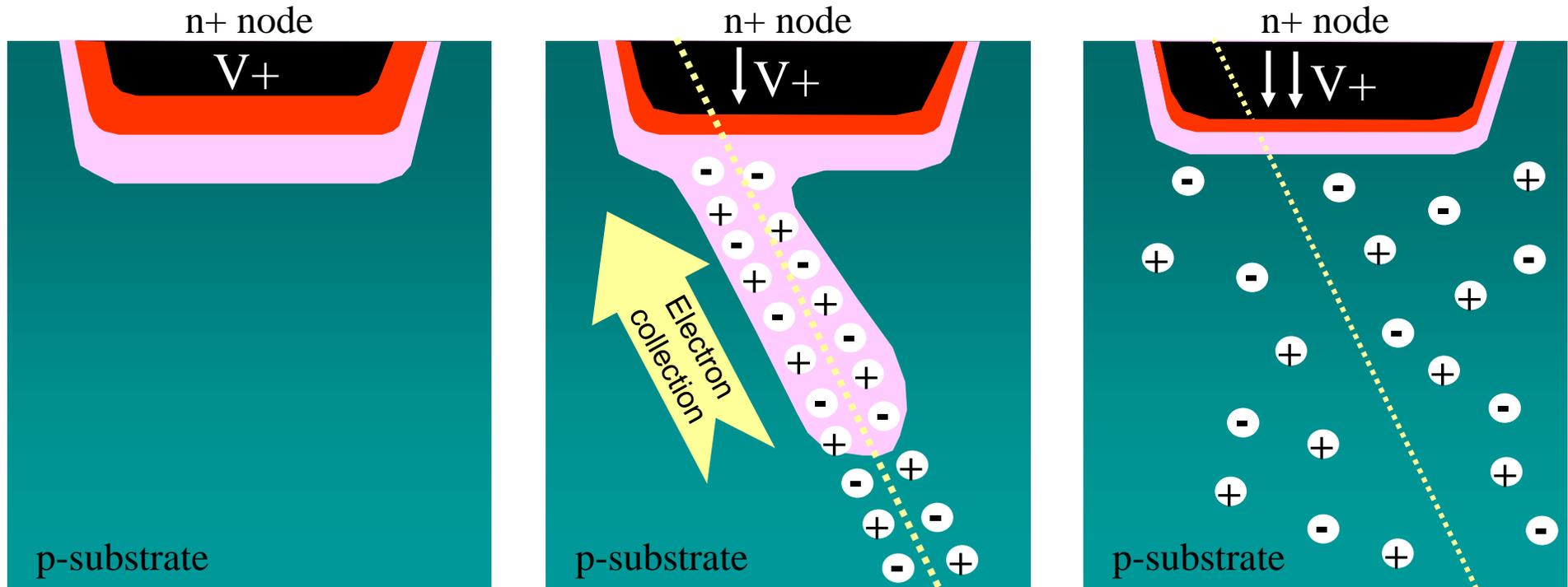
# EN ELECTRONIQUE

## Effets électriques directs du passage d'une seule particule



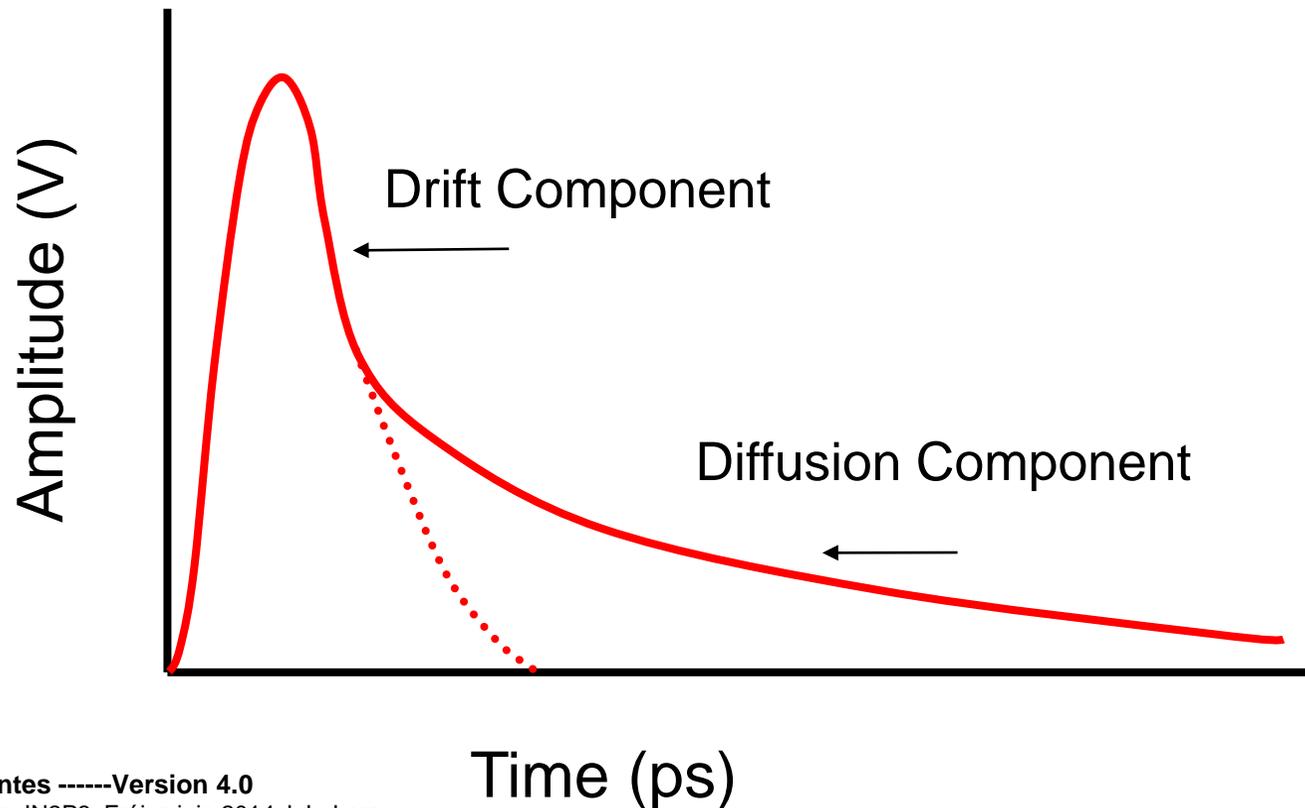


# Qcoll: charge collection in a diode



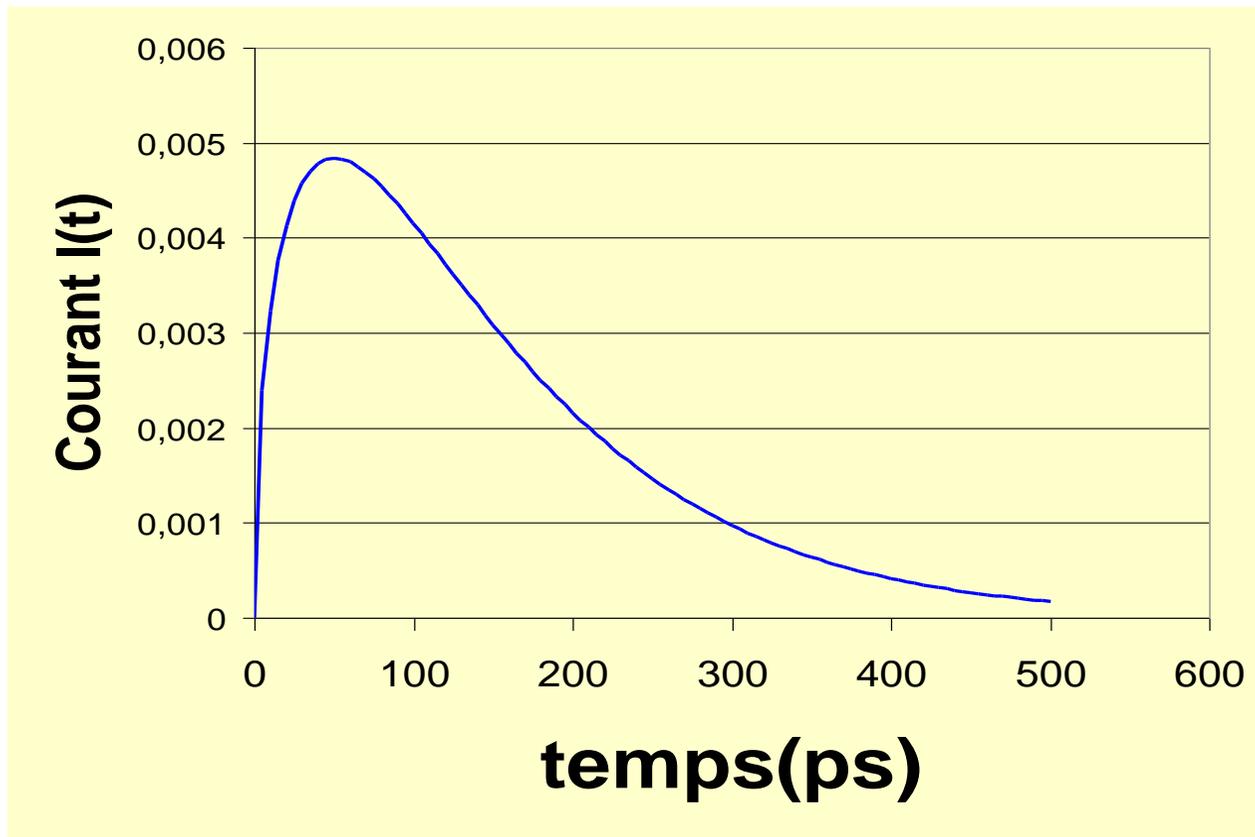
## ASET's Shapes

Fast (drift) and slow (diffusion) components.  
(Shape depends on applied bias).

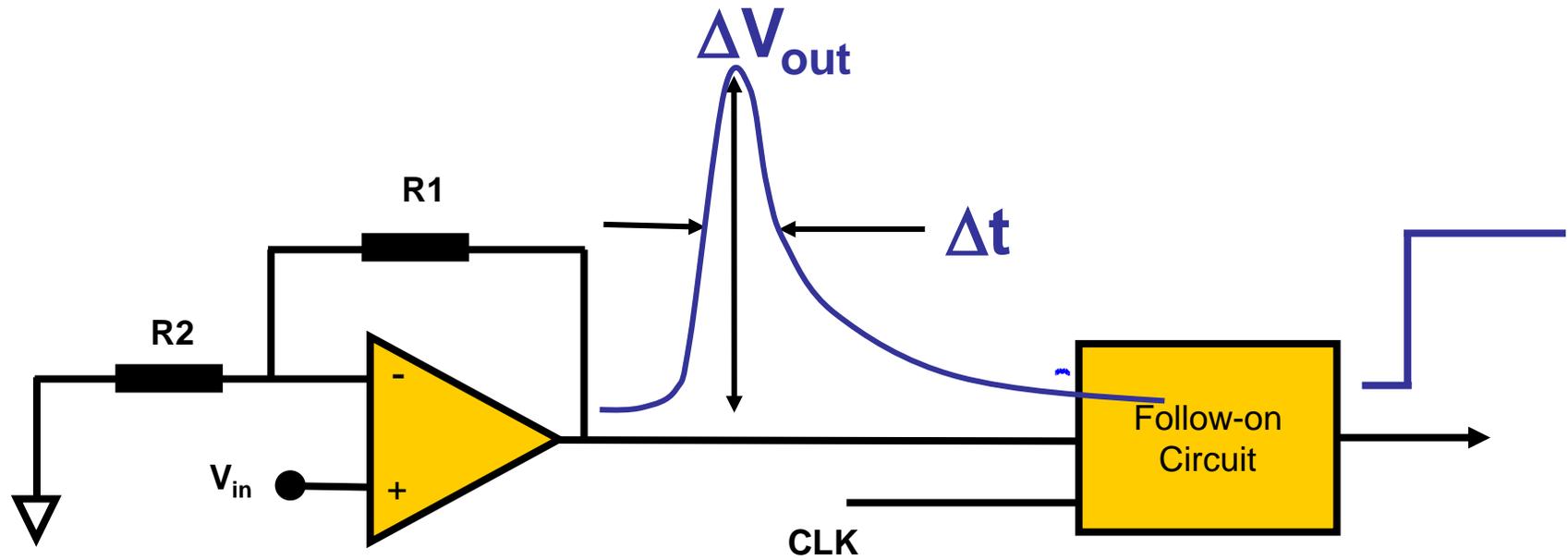


# Forme du courant

$$I(t) = \frac{2}{T\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{T}} \exp\left(-\frac{t}{T}\right)$$

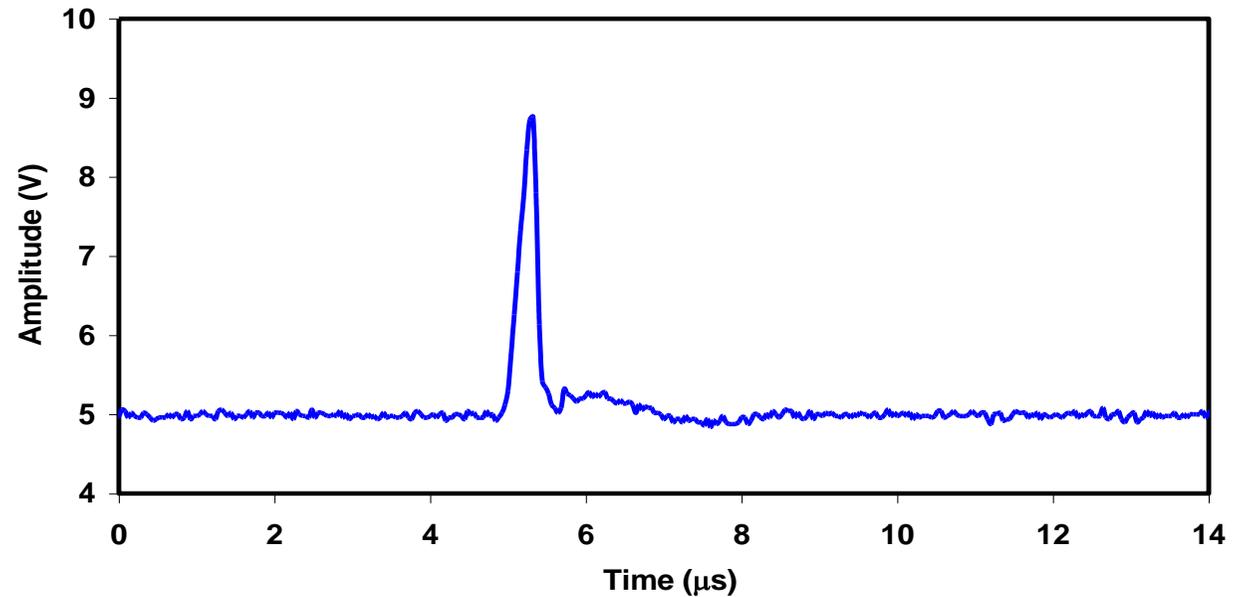
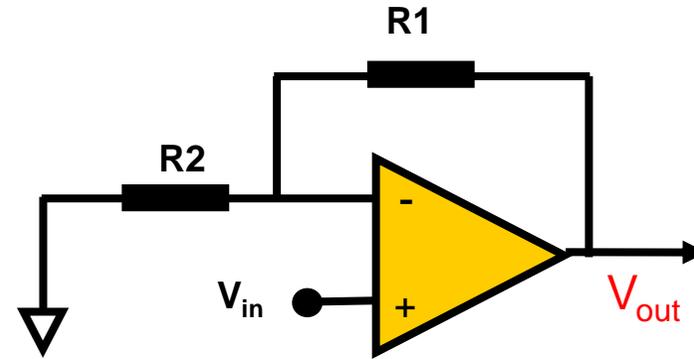


# Single Event Transients (SET)

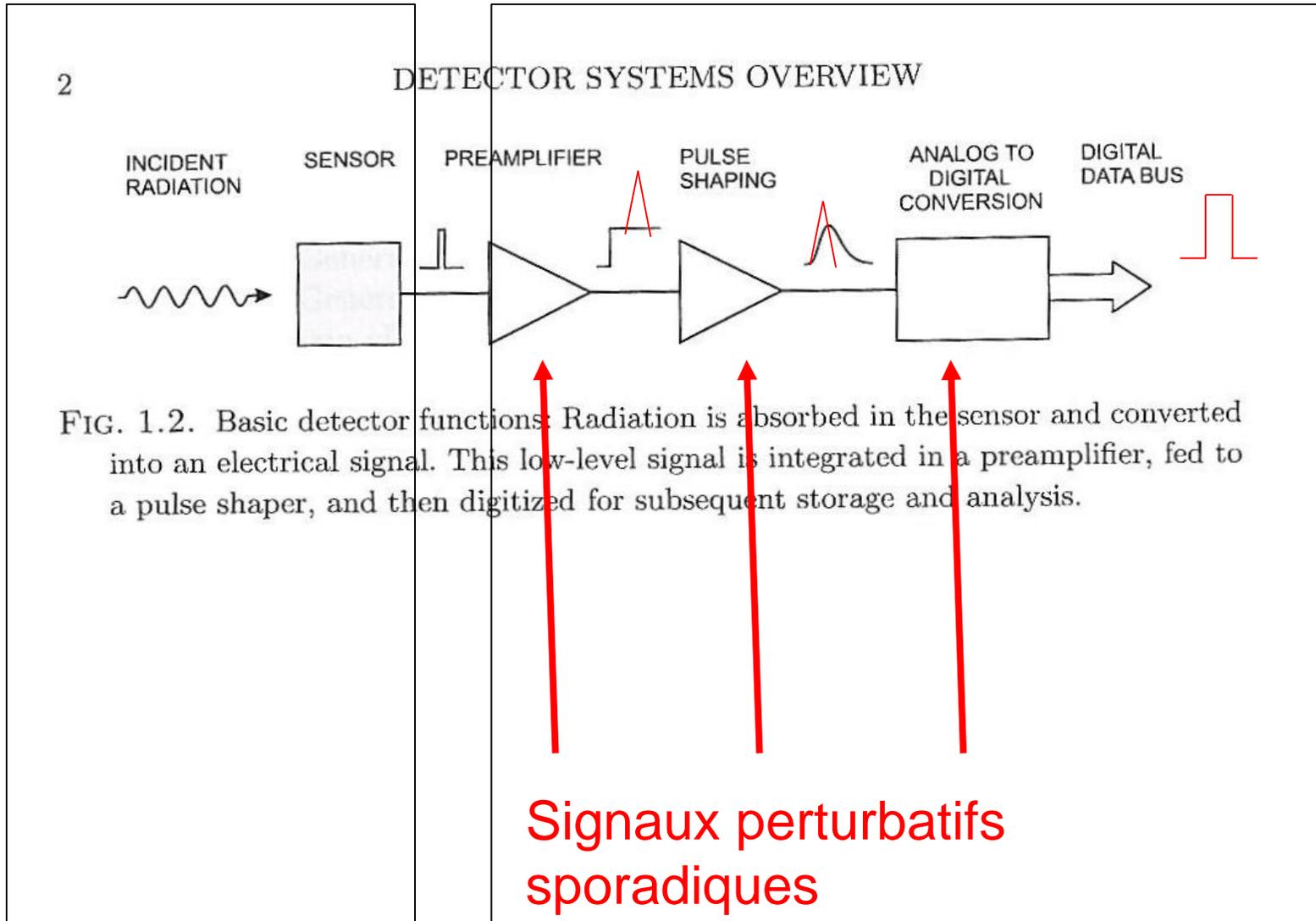


# SETs appear as voltage “glitches”

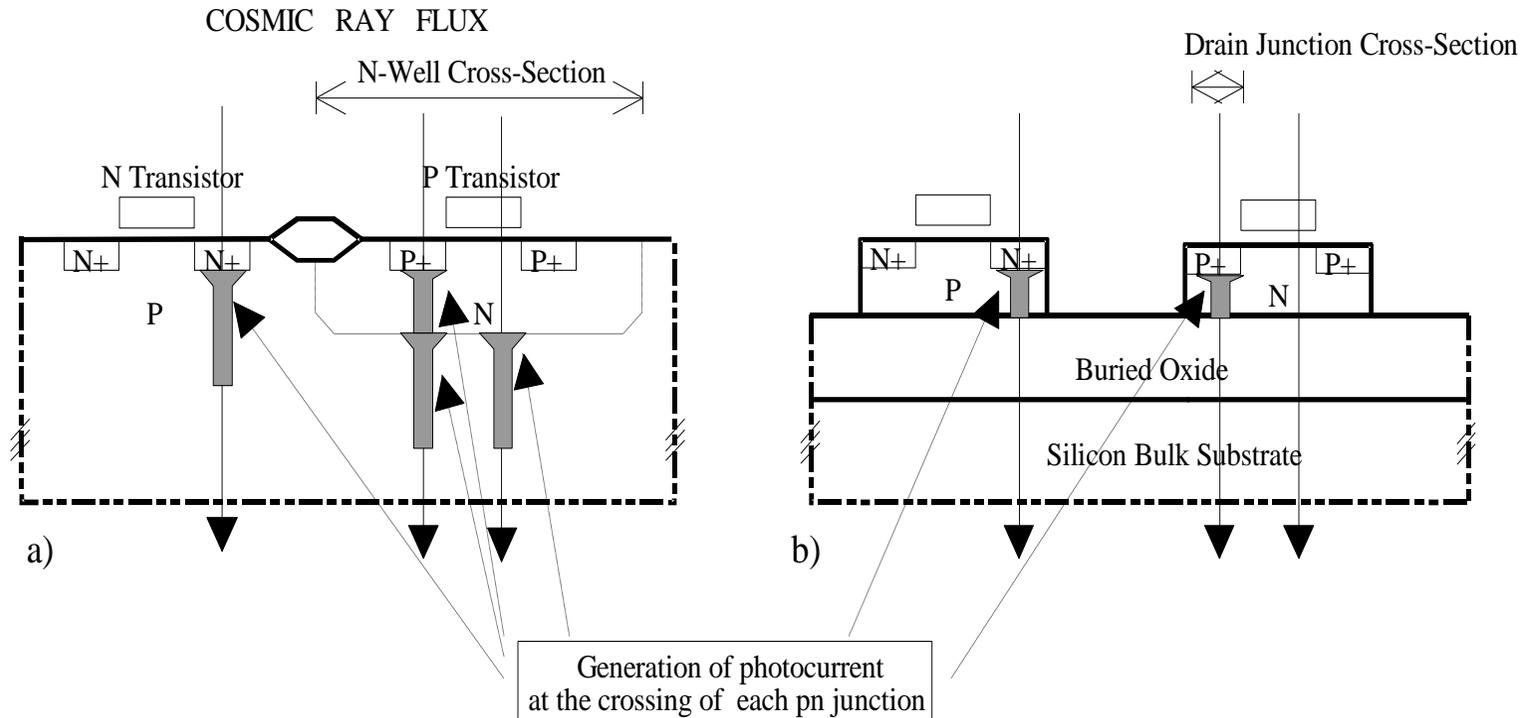
- at the outputs of:
  - Operational-amplifiers,
  - Comparators,
  - Voltage refs,
  - DACs



# Le capteur et sa chaîne de traitement électronique

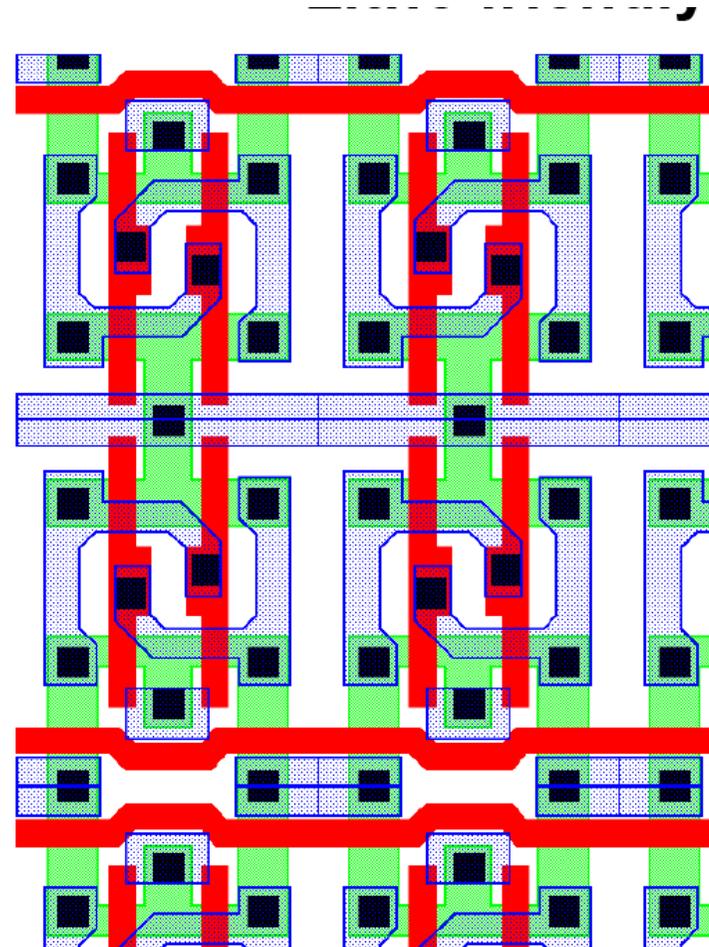
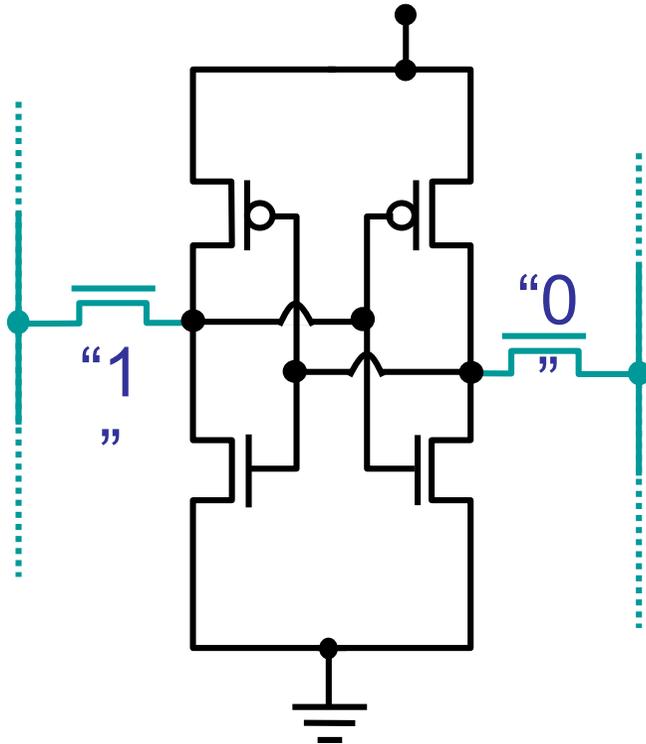


# Chaque particule traversante peut générer un courant



# Mémoires SRAM

## Static Random Access Memory



# LET et Parcours

- **Parcours-Range ( $\mu\text{m}$ )**

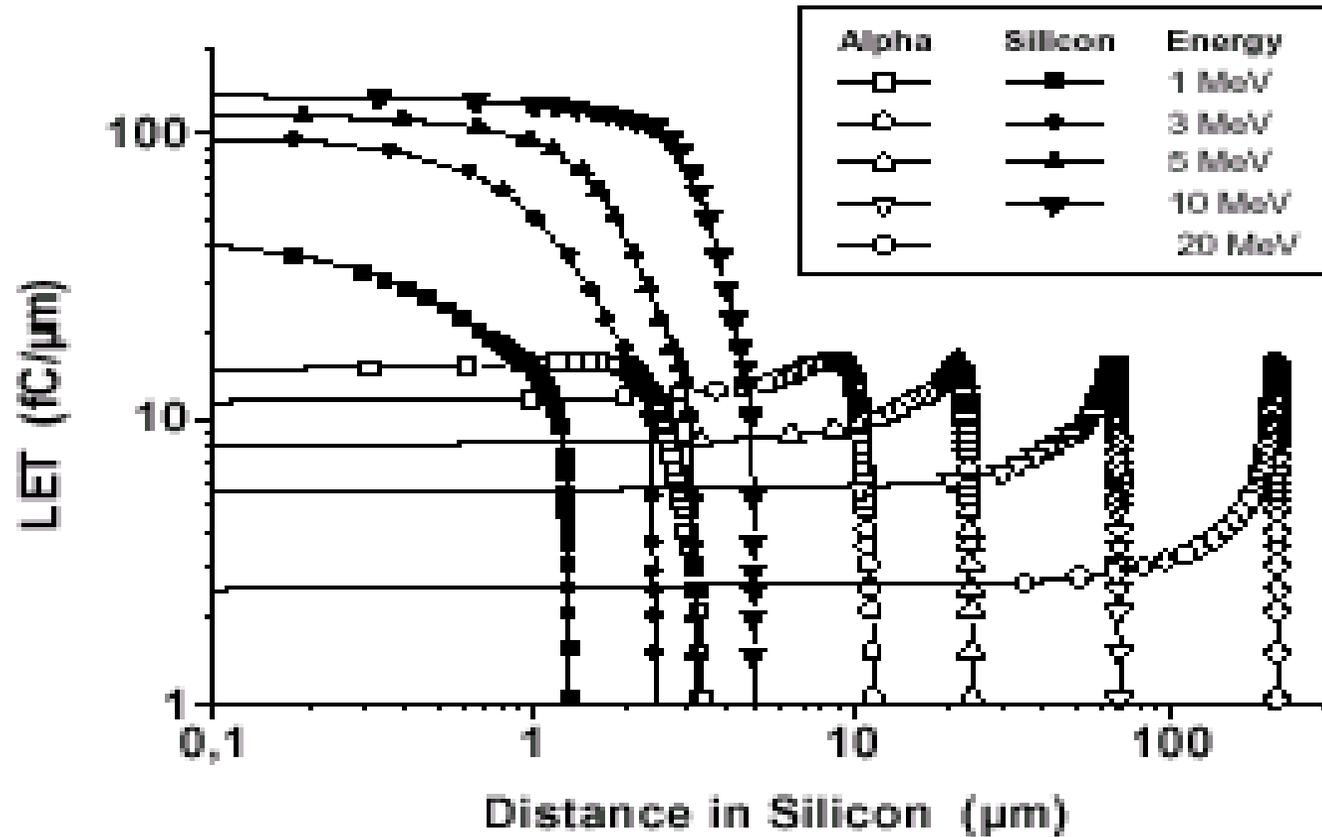
$$R(E) = \int_0^E \left( -\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

- **Une condition nécessaire à la validité du test : que les particules parcourent toutes les couches**

- si possible avec un dépôt  $dE/dx$  constant

**=> Essais aux accélérateurs de 30 MeV (Tandem au minimum, cyclotrons Upsalla, Louvain, à plusieurs GeV (Brookhaven, Triumph, Ganil))**

# Dépôt de charge (pC/μm) fonction de la profondeur pour une trace donnée



*Figure 1 : LET in silicon versus distance along the track of alpha and Si ions for different initial energies.*

# Multiplés aléas dans le « Single Event Effect »

- **Temporel côté source : on ne sait pas quand la particule va survenir par rapport à l'état dans le composant ou circuit**
  - timing, potentiels, courants
  - ⇒ Recherche du « pire cas »
  - Par exemple, durant transition logique dans une porte
- **Directionnel entre la source et le composant**
  - Incidence rasante, souvent un pire cas, on intercepte plusieurs transistors...
- **Localisation de la trace dans le composant**
  - À quel endroit de la surface
  - À quel profondeur a lieu la réaction nucléaire si la particule peut en créer (neutron, protons, muon, hadrons...) et la direction des produits (recoils) émis
- **Quels noeuds électriques seront impactés ?**
  - (source, drain, jonction PN, jonction substrat)

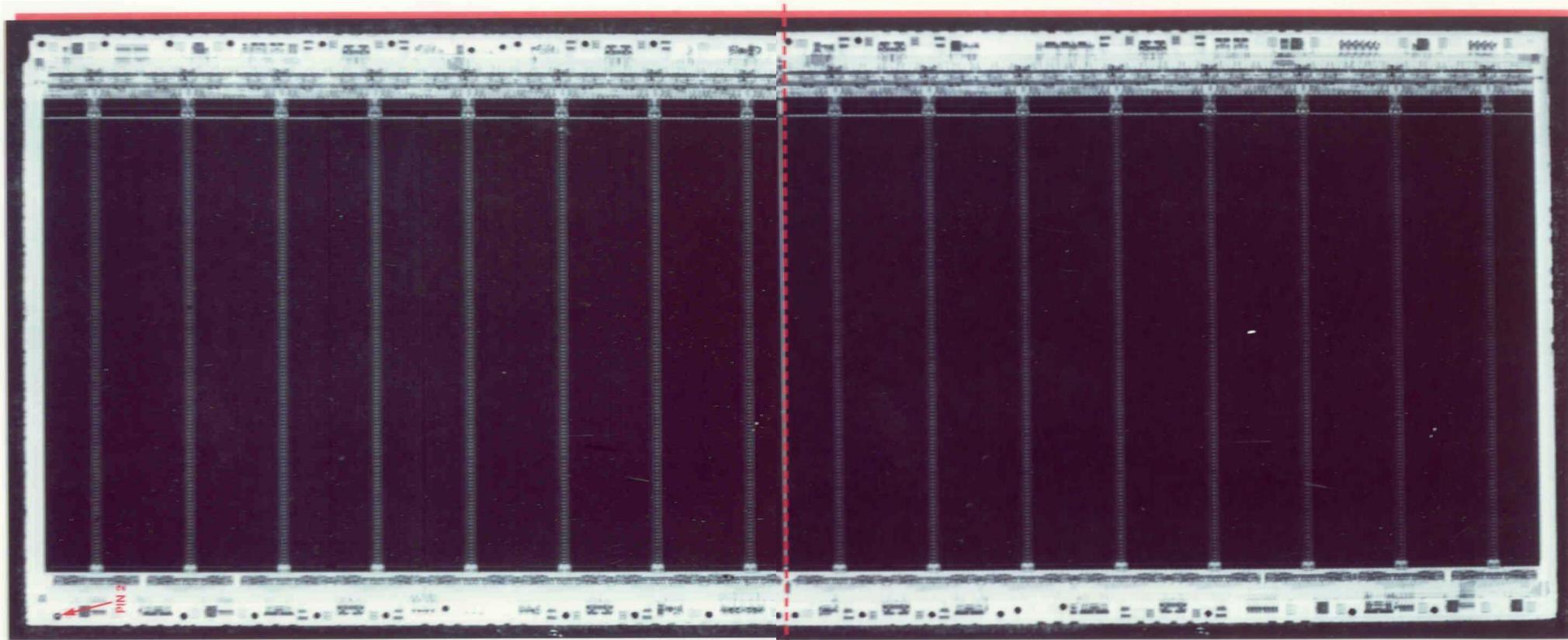
# Le « durcissement repose sur un (des) Etats de l'art

## => Démarches :

- Théoriques : modèles hiérarchisés
  - Heuristique : stratégie de test « pire cas »
- 
- **Comme le design, le test « radiations » est un métier**
    - Guidelines, standards, etc
    - On n'est jamais sûr à 100%
  - **Il repose sur de la physique, de la technologie et du pragmatisme**
  - **Commençons par la Jonction PN 😊**

# Exemple de caractérisation

## Mémoire 4 mégabits en technologie 0.65 $\mu\text{m}$



2 cm x 0.5 cm

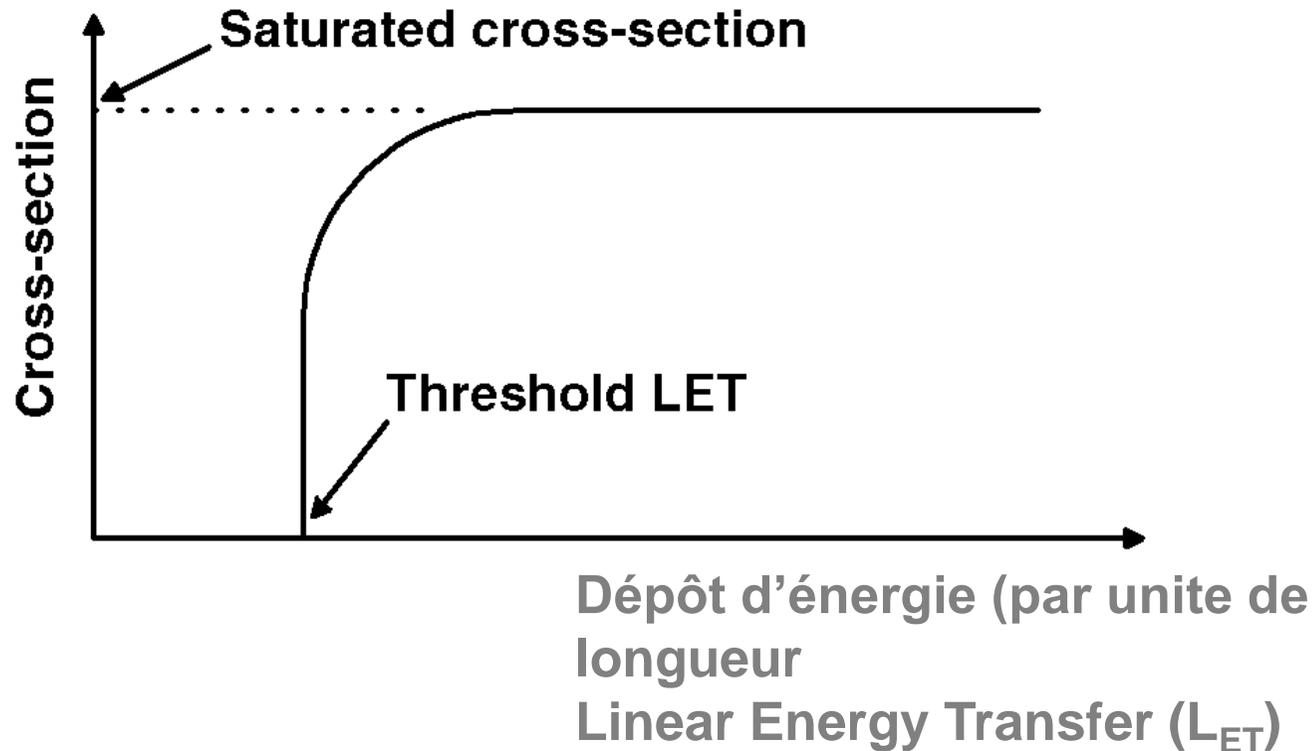
Mémoire Toshiba 4 Mégabits SRAM année 1995  
Technologie CMOS 0.65  $\mu\text{m}$   
30 millions de transistors

# Approche pragmatique : on mesure expérimentalement une probabilité

« section efficace électrique » :

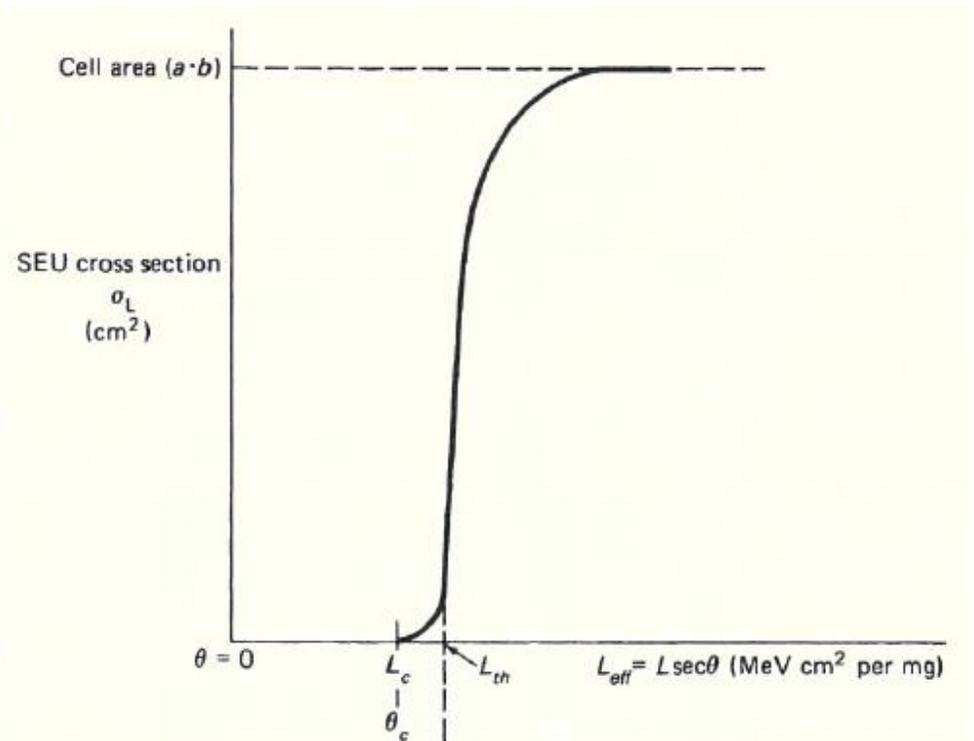
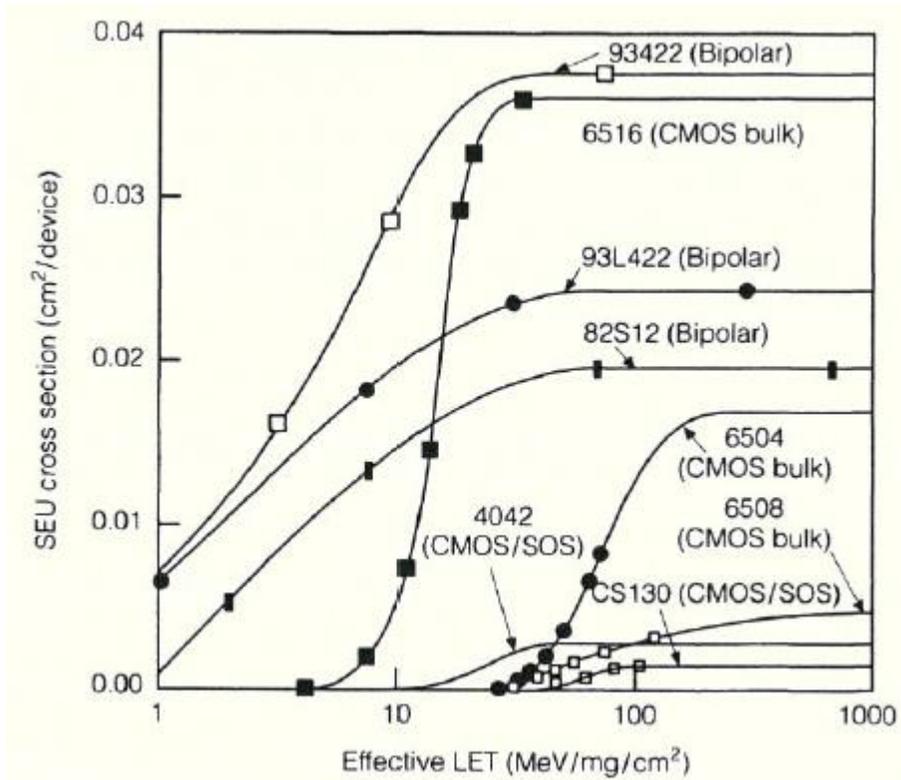
$\sigma = \text{Flux} / \text{probabilité d'évènement électrique}$

Par exemple un basculement de cellule, un glitch de valeur  $> 1$  volt, etc



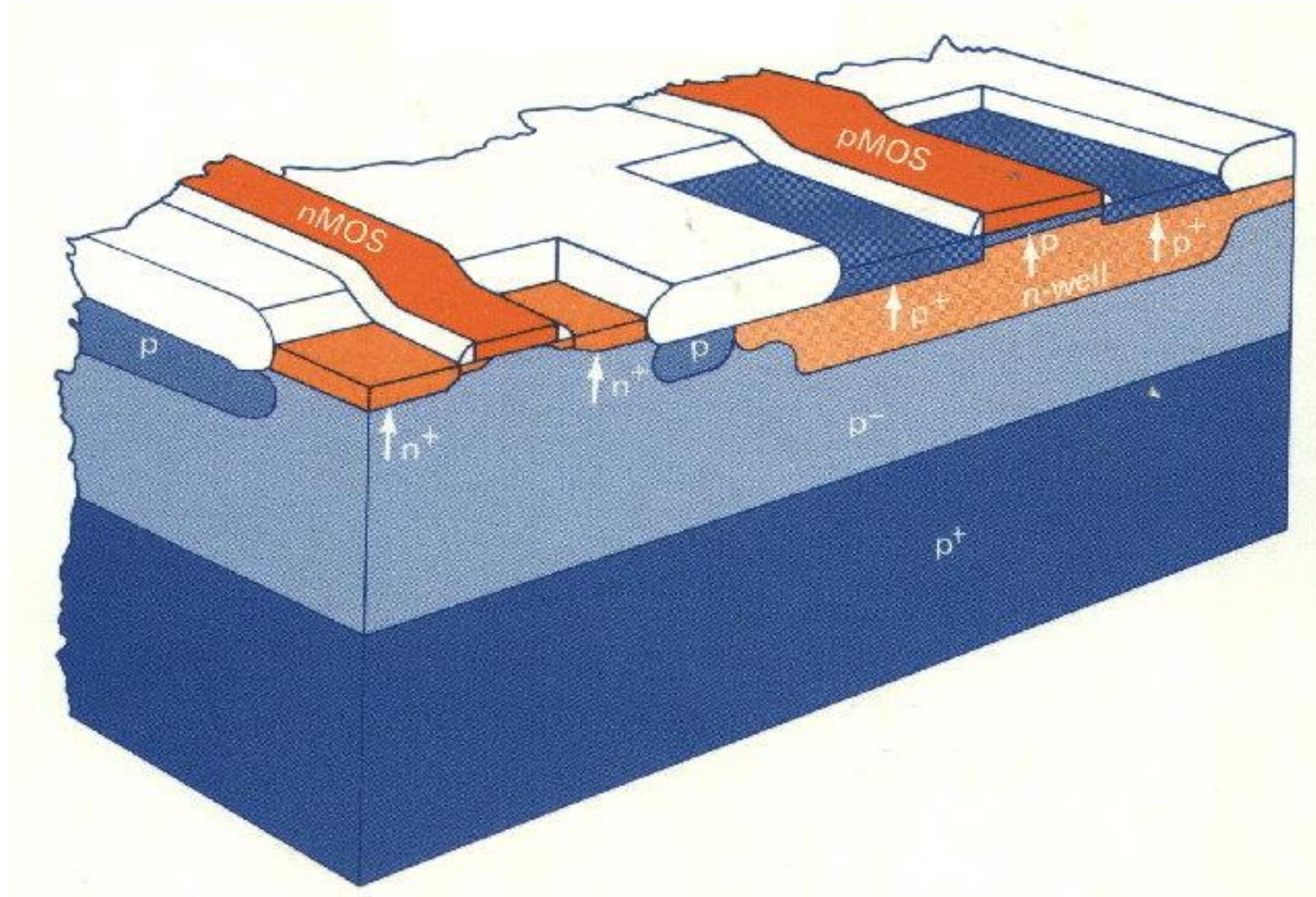
En abscisse on porte une grandeur caractéristique du faisceau

# Quelques résultats (axes lin log ou plus fréquemment log log)



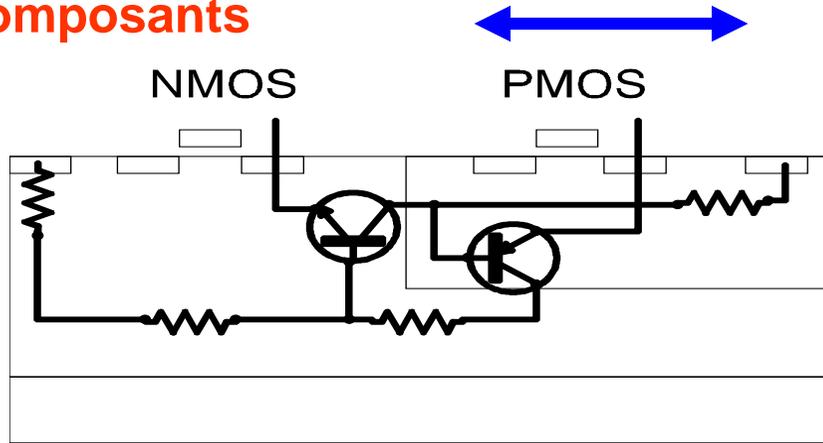
Ici exceptionnellement en lin log

# Vue en perspective

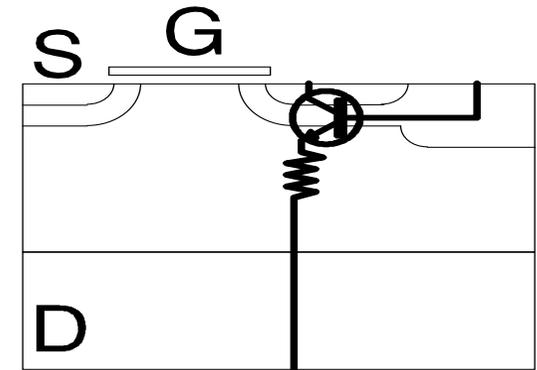


# Analyse

Les radiations "réveillent" les structures sensibles cachées dans les composants



COMPOSANT INTEGRE  
HORIZONTAL



COMPOSANT DISCRET  
VERTICAL

- => (1) structure parasite rebouclée  
Verrouillage électrique (Latch-up)
- => (2) basculement transitoire d'état logique

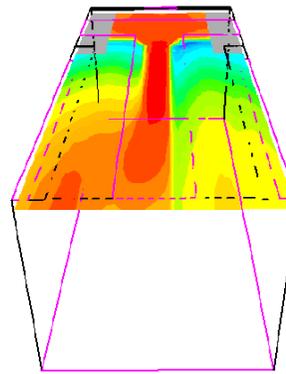
=> avalanche :  
Claquage (destruction)

# Les effets transitoires à une particule

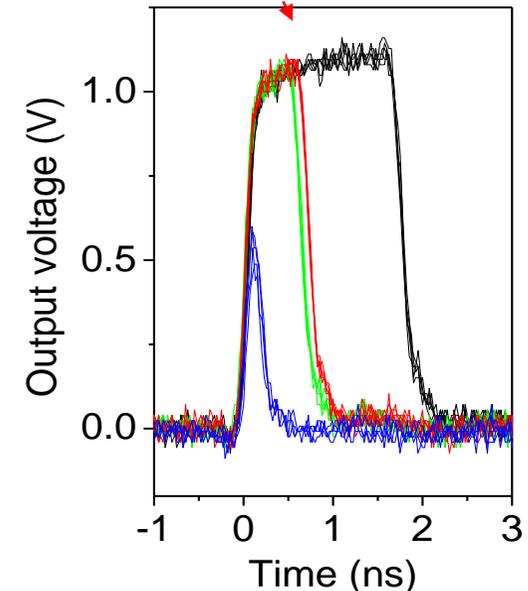
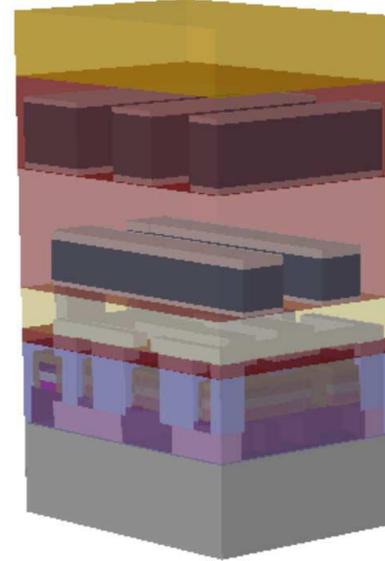
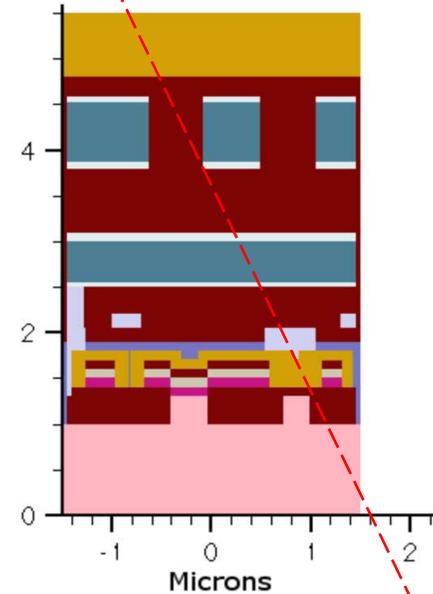
Ce sont donc des études très près de la technologie profonde

- Modélisation 3D  
Nucléaire (Geant4, Fluka...) et  
électrique (solveurs semiconducteurs, spice)

souvent indispensable pour valider les observations

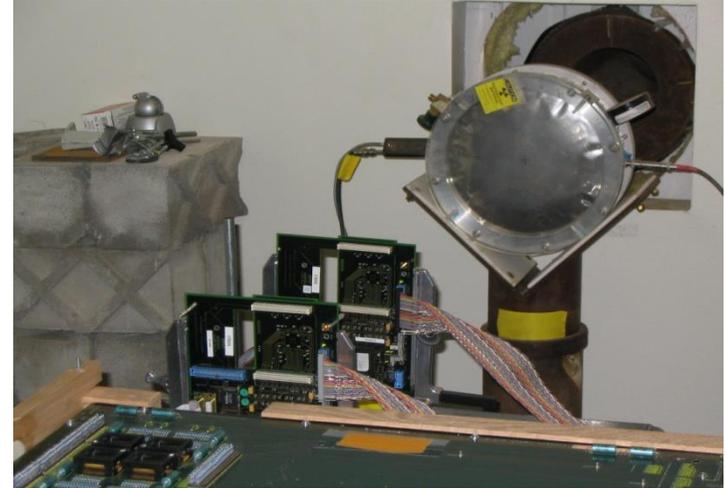


Ion, neutron, ...



Tests Accélérateurs  
Très laborieux, coûteux  
mais indispensables

La communauté internationale  
(espace, avionique)  
partage ses résultats



- Statistical interpretation of SEE tests
- Ion angle and range effects
- Packaging and sample preparation
- Calculation of upset rate in space

# **A RECOMMANDER FORTEMENT**

## **Systemes de test laser pour « déverminage »**

### **DES COMPOSANTS ANALOGIQUES, DISCRETS**

### **OU INTEGRES**

- **Un laser picoseconde focalisé vers une « tache » de 1  $\mu\text{m}$  éclaire le composant en fonctionnement. Par scan x-y et t on enregistre la réponse analogique ou digitale et on fait varier l'intensité du faisceau**
- **=> construction d'une statistique et d'une pseudo courbe de section efficace.**

**Très bien adapté aux fonctions analogiques**

**=> Identification des faiblesses, déverminage, redesigns, contournements, etc...**

**Equipes et Labos en France :**

- **Université de Bordeaux – UMR CNRS IMS (Dean Lewis)**
- **Université de Montpellier – UMR CNRS IES ( Vincent Pouget)**
- **EADS (Airbus) Innovation Works - Suresnes (Florent Miller)**
- **CEA DIF (Arpajon, sud de Paris) – Philippe Paillet et Marc Gaillardin)**

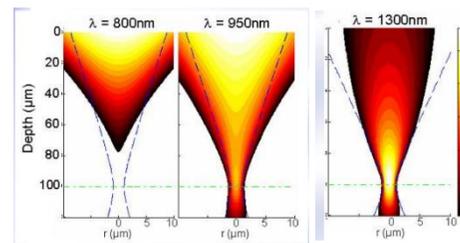
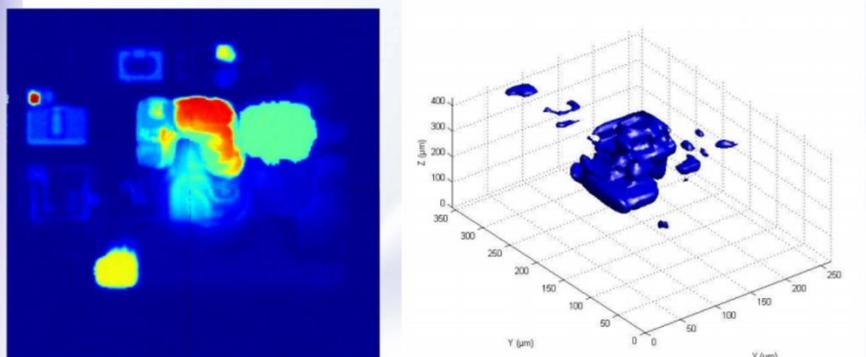
# Banc de test laser acanné

## Frederic Darracq, Vincent Pouget

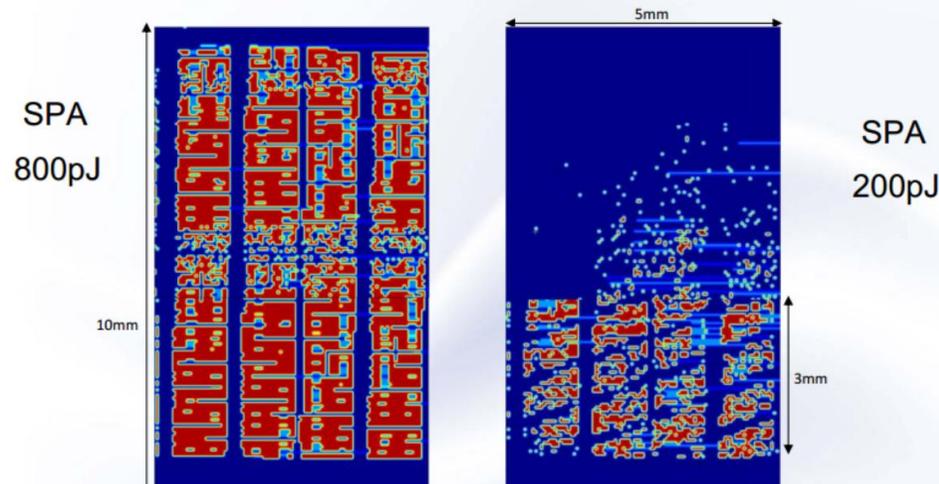
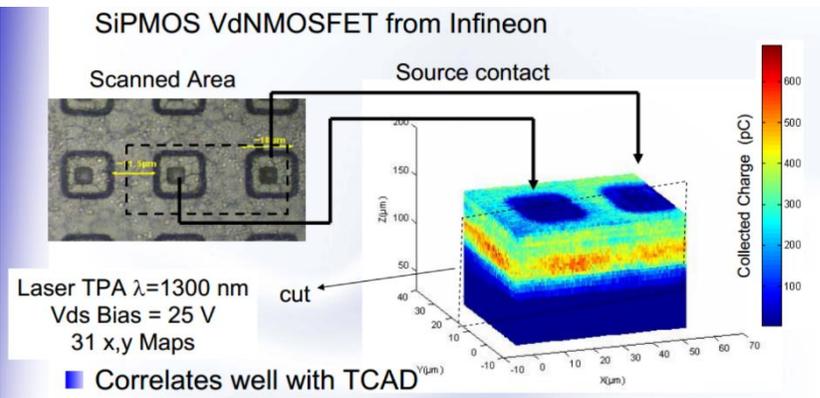
(maintenant à IES, UMR CNRS Univ. Montpellier)

• [www.theses.fr/2003BOR12681](http://www.theses.fr/2003BOR12681)

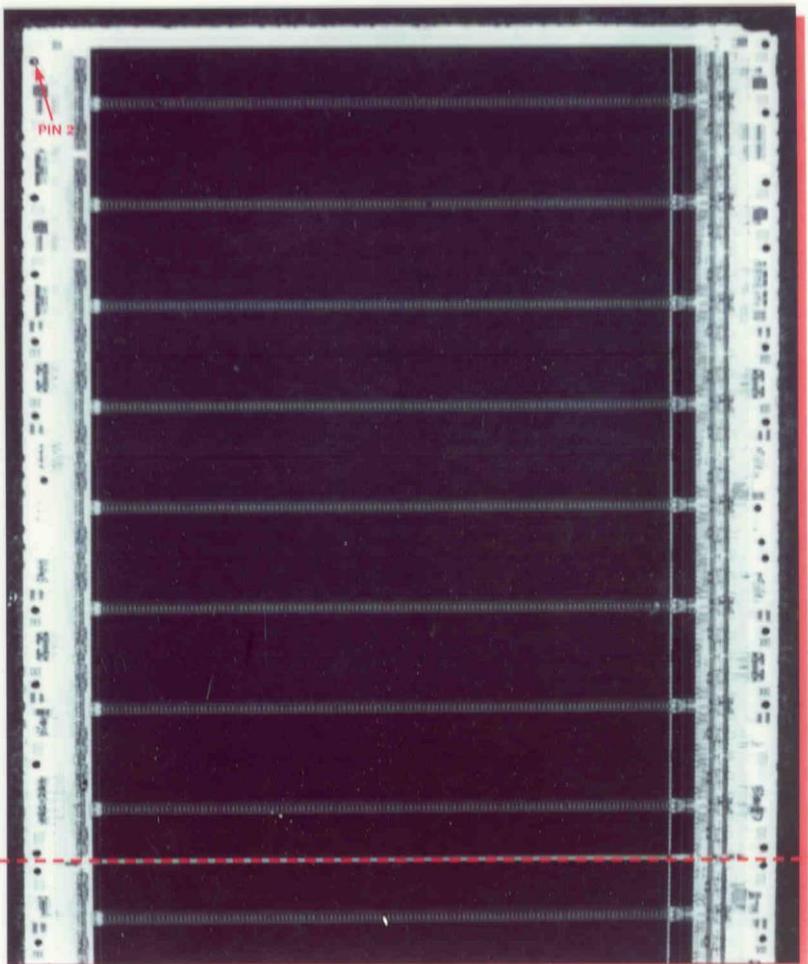
### ■ SET sensity Mapping of an LM324 AN



### ■ SRAM CYPRESS CY7C1069AV33

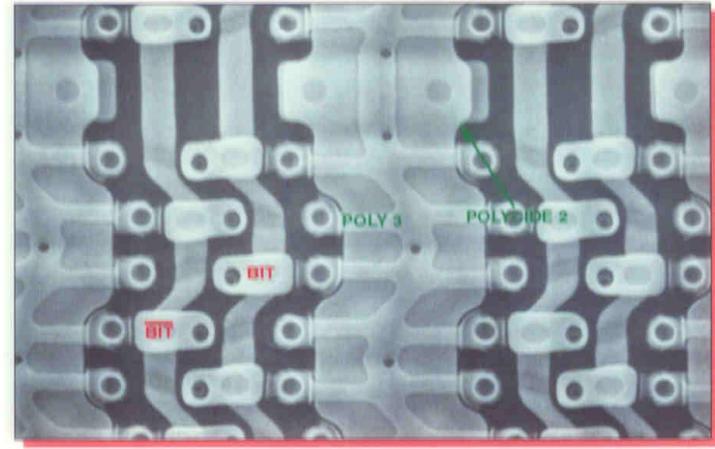


**Mais attention, les métallisation font écran au pulse laser !  
Éclairage face arrière**



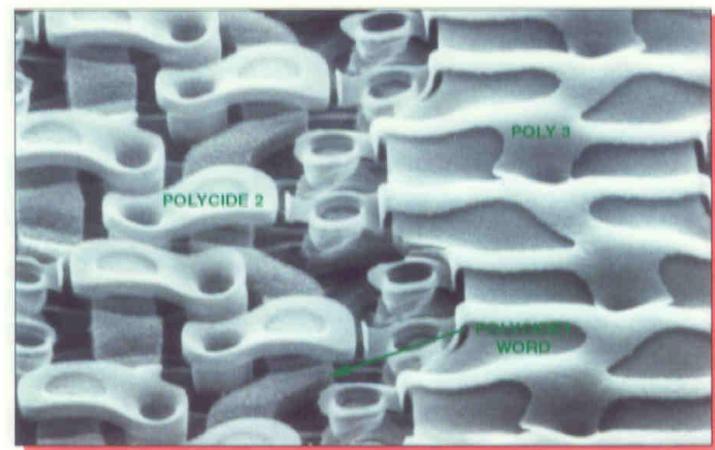
x19 5 mm

Vue de dessus



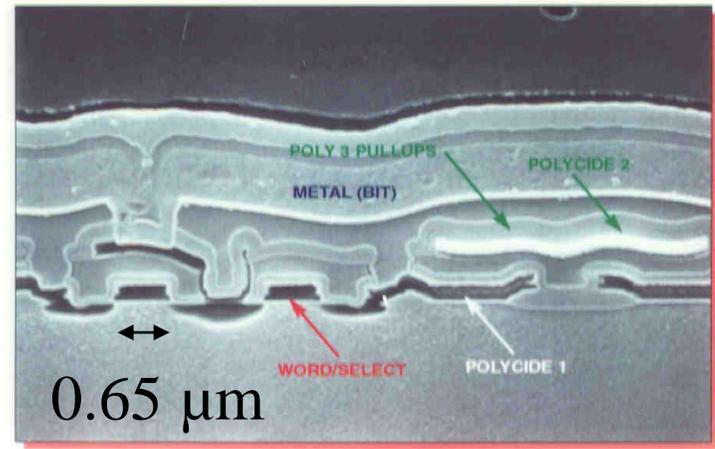
Mag. 5500x, 0°

Vue de profil



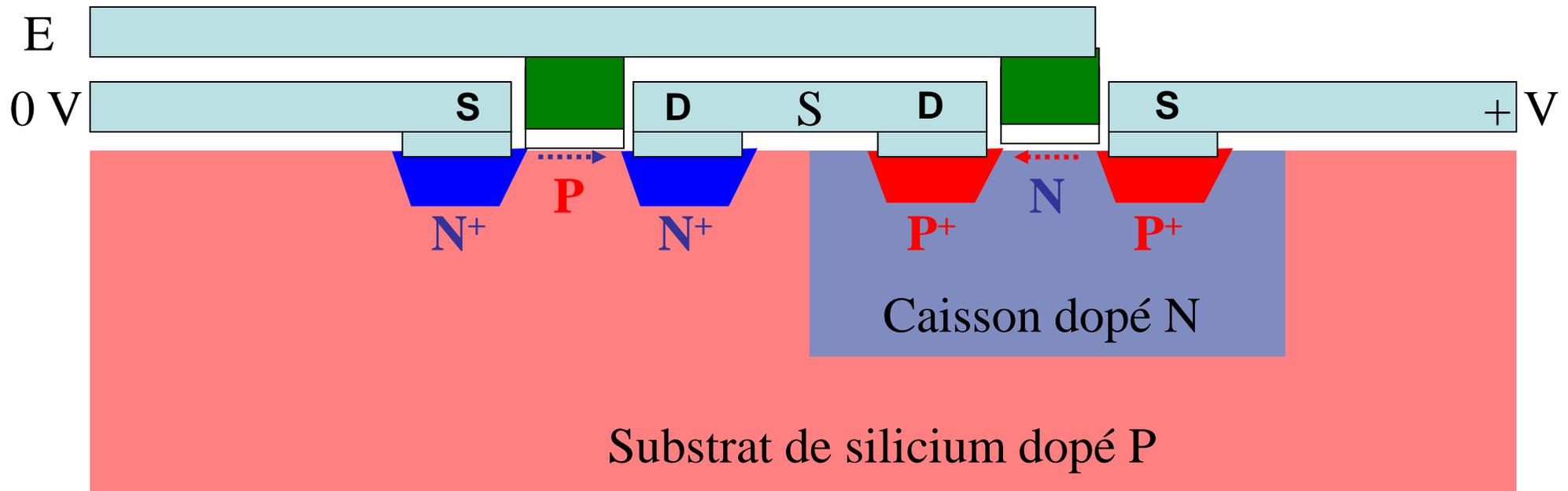
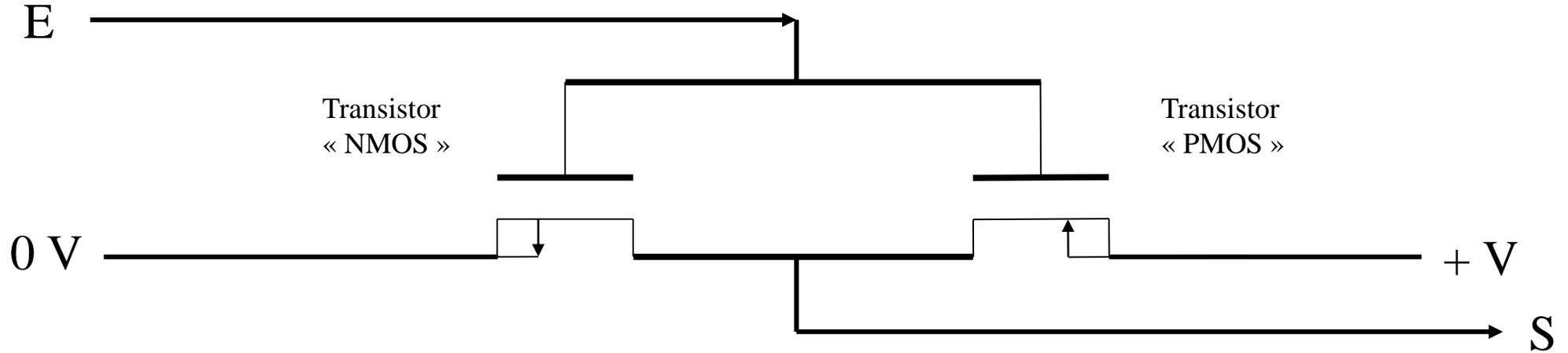
Mag. 12,000x

coupe

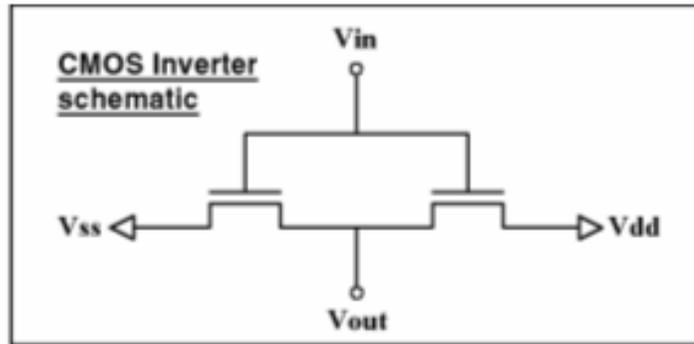


Mag. 10,000x

# Single Event Latch-Up



# Single Event Latch-Up



SEL: A highly ionizing particle trigger the parasitic thyristor contained in a bulk CMOS inverter.

=> Vdd-to-Vss short circuit.

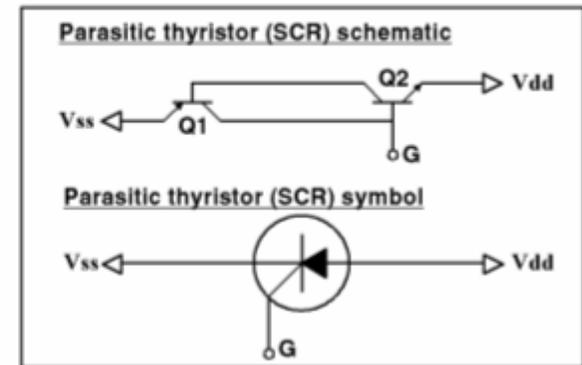
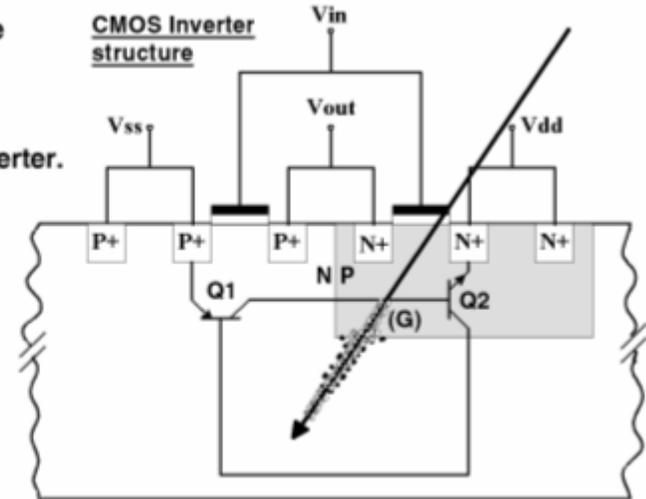
Destructive mechanism

if no current limitation.

Possible recovery by bias

switch-off if the circuit is

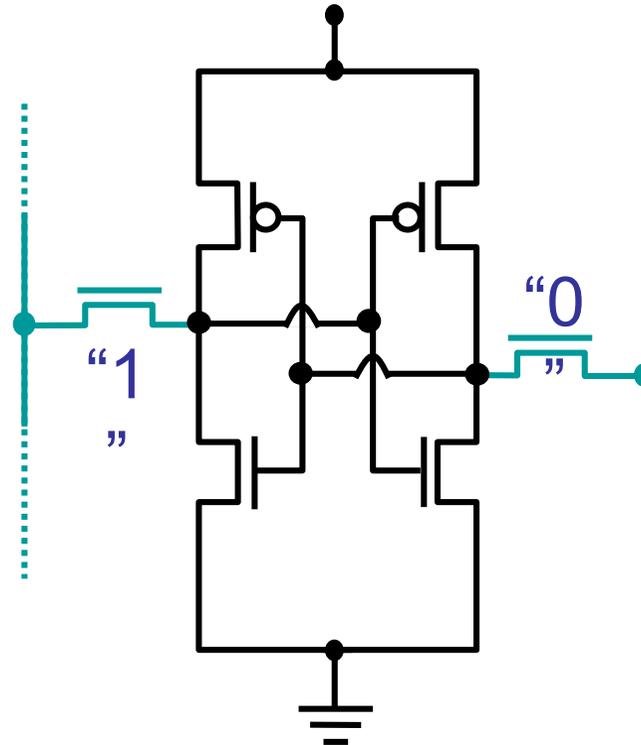
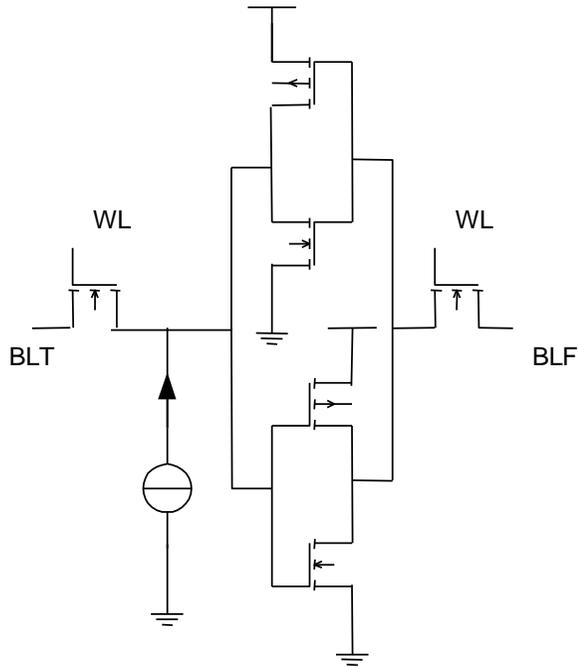
protected by a current limiter.





# Mémoire : basculement – Single Event Upset

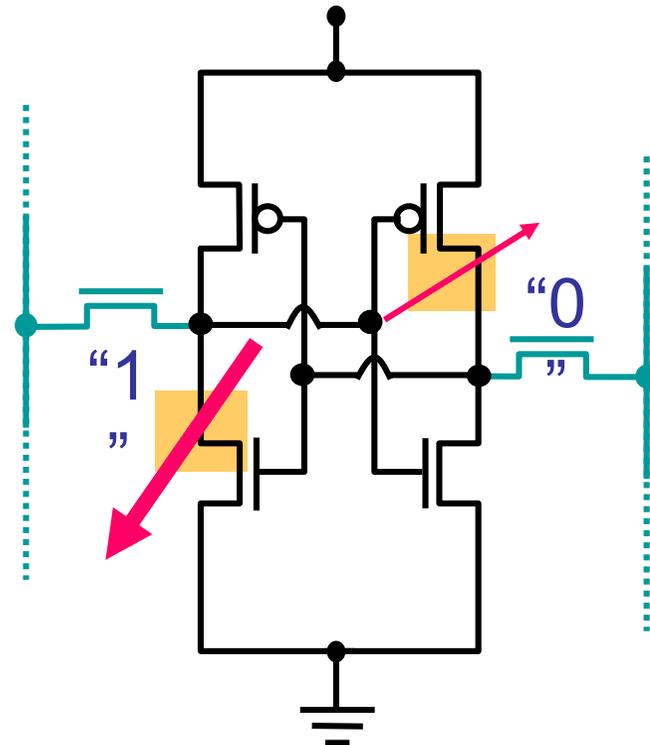
- Une mémoire élémentaire (1 bit) est constitué par deux inverseurs

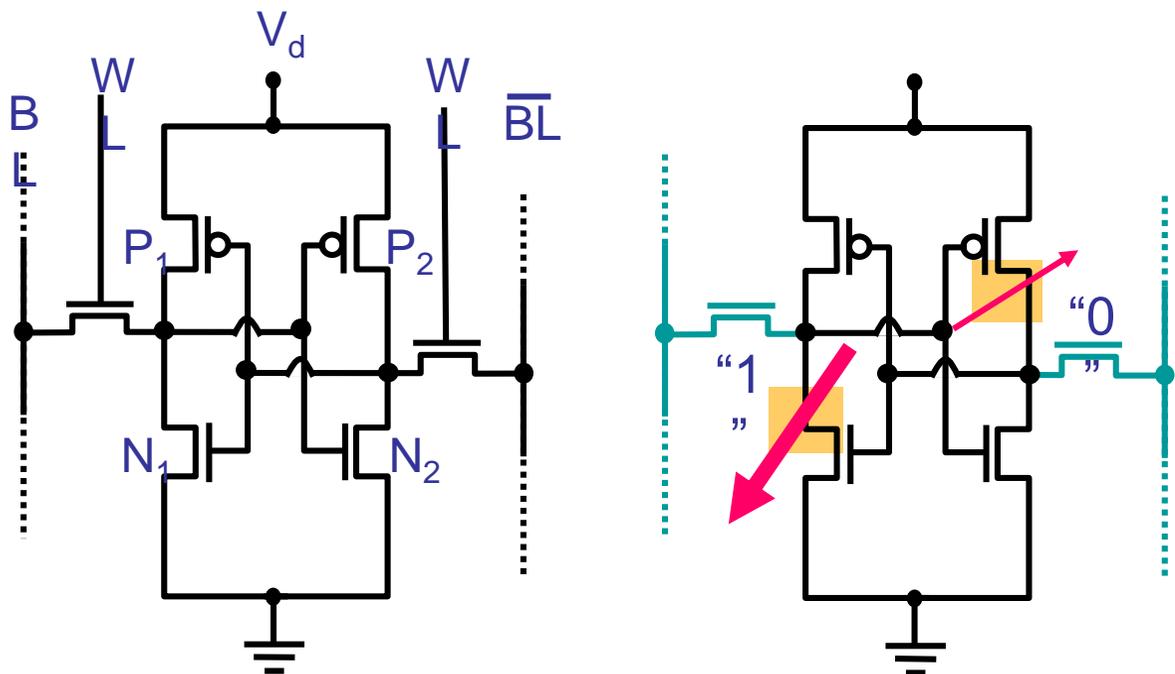


# Changement d'état

- En Français : Basculement Causé par 1 Particule
- En Anglais : Single Event Upset  
(upset : forçage)

1 -> 0 et 0 -> 1





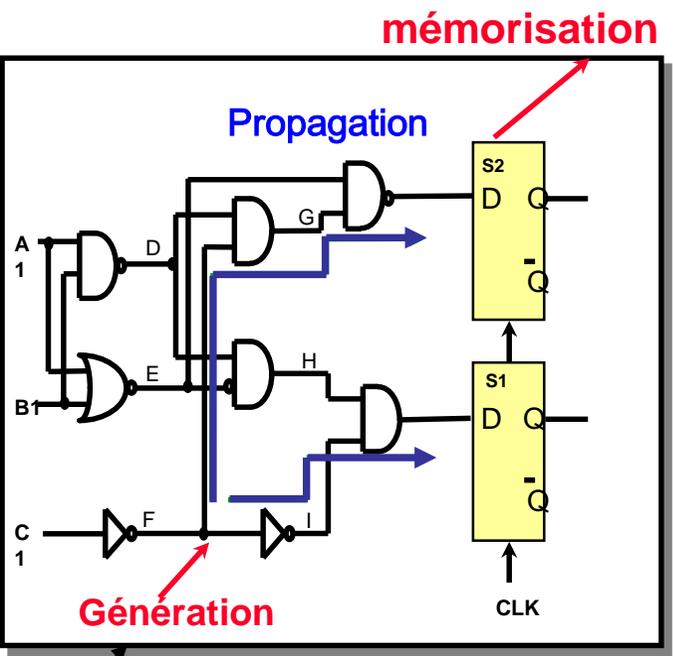
6T SRAM Cell

$$Q_{crit} = C_{node} V_{node} + I_{restore} \tau_{flip}$$

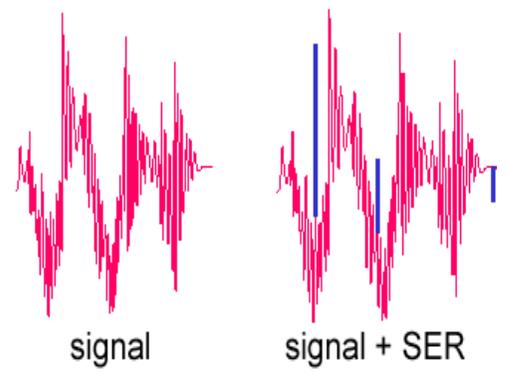
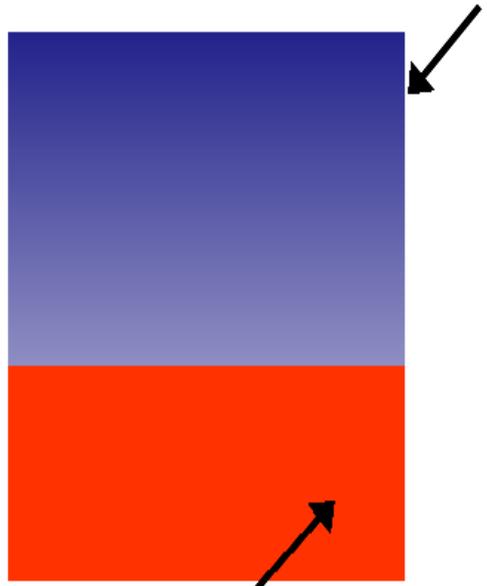
Sera abordé dans le 3eme cours

# Dans un circuit CPU, DSP, ADC, SERDES...

« SER : Single Event Rate »



ZONE MEMOIRE



program data

Typical CPU



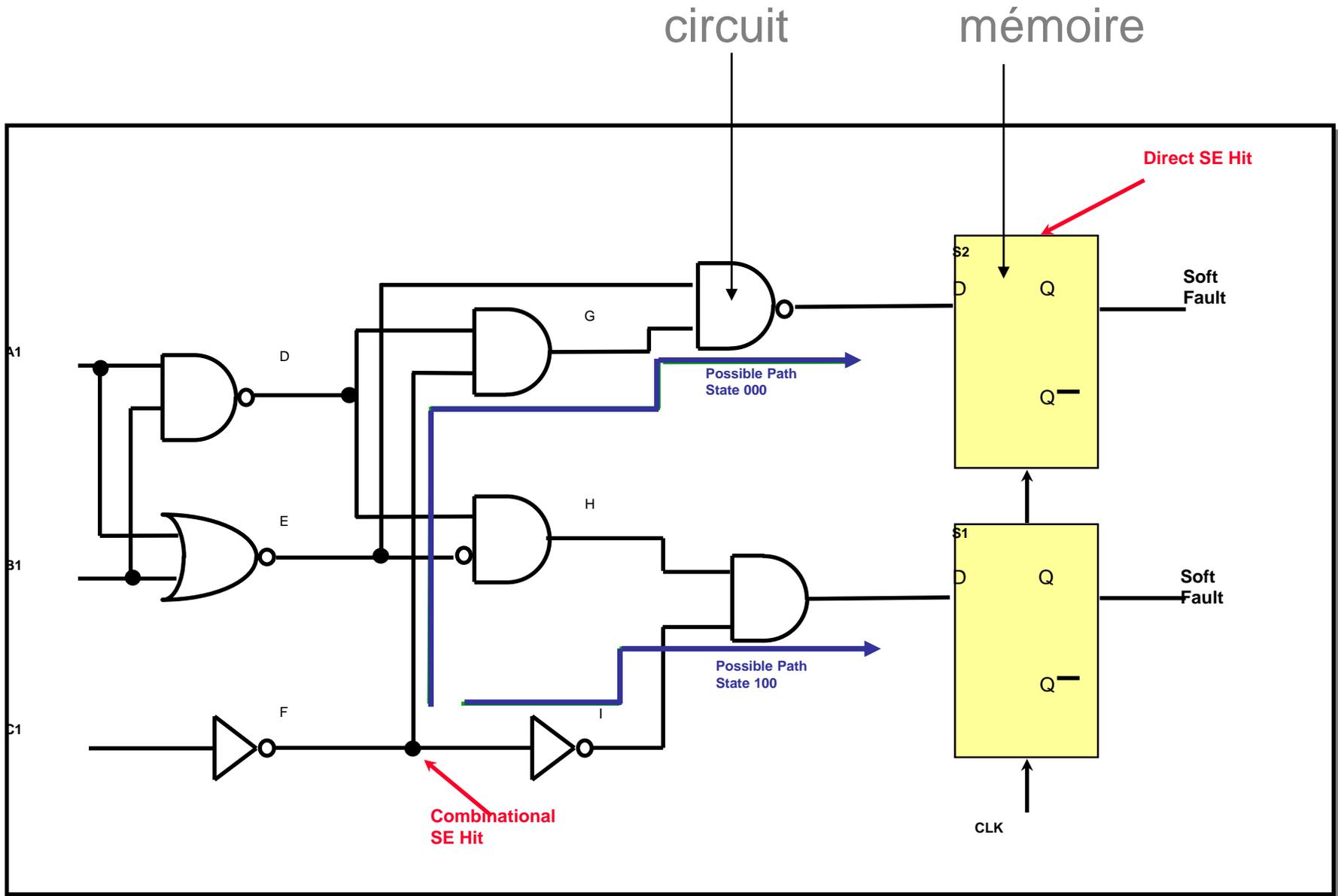
Typical DSP

Mémoires, processeurs (CPU) ----- Traitement du signal (Digital Signal Processor)

Plutôt Statique

Plutôt Dynamique

# Circuit : Single Event Transient, puis sans un registre



# Dimensions latérale des traces par rapport à la dimension des composants modernes

- **Distribution radiale de l'ionisation:**

- Fonction gaussienne
- Diffusion latérale de la trace

$$f(r) = A \exp\left(-r / \sigma_r\right)^2$$

Hypothèse:  $\alpha$  1MeV Dans silicium N faiblement dopé

- 50fs  $\sigma = 28\text{nm}$   $n_{\text{max}} = 3\text{E}19 \text{ cm}^{-3}$
- 500fs  $\sigma = 70\text{nm}$   $n_{\text{max}} = 4 \text{ E}18 \text{ cm}^{-3}$
- Coefficient de diffusion:  $4Dt = \sigma^2$   $D = 20 \text{ cm}^2/\text{s}$

**Pour les technologie < 100 nm, LA DIMENSION DES TRACES PEUT ENGLOBER PLUSIEURS PORTES**

**Multiple bit Upset : ~10% au moins des SEU dans les mémoires modernes**

# Sommaire

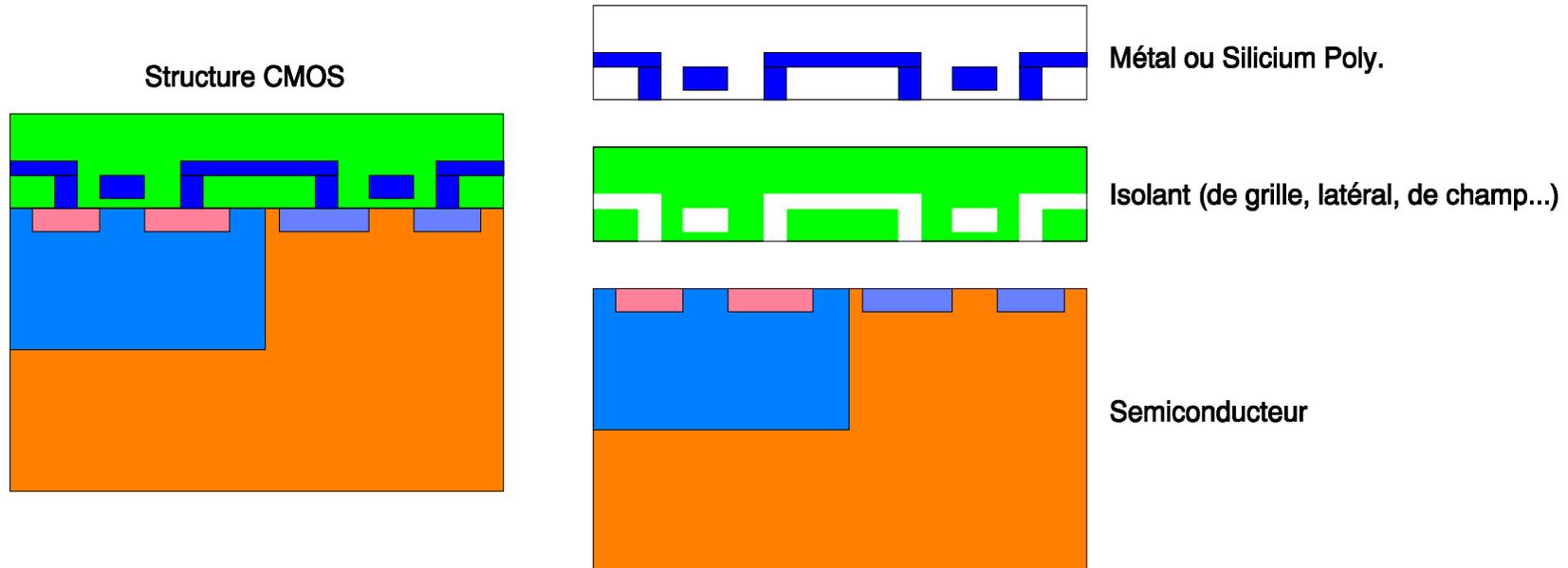
- 1. Les radiations sont partout ! Flux vs. Fluence
- 2. Effets « singuliers » à une particule et Effects « cumulatifs » à plus grandes fluences.
- 3. Effets électriques « singuliers ».  
Courbe de la probabilité fonction du LET de la particule
- 4. Effets cumulatifs « de la dose »  
Relation dose-fluence-energie
- 5. Cas des particules massives (hadrons et leptons) chargées ou non  
Effets ionisants et d'endommagement des électrons, neutrons et protons
- 6. Comment faire ?  
Référentiels de connaissance issus d'autres communautés  
(spatial, avionique, informatique, médical, etc)

# Les zones sensibles d'un composant électronique

## (2) les isolants

Rappel : trois types de constituants :

- le volume semiconducteur avec sa surface active,
- les couches isolantes (oxyde de grille des transistors, isolants latéraux, oxydes dits de champ, isolants interniveaux),
- Les couches métalliques ou en silicium polycristallin servant aux interconnexions.



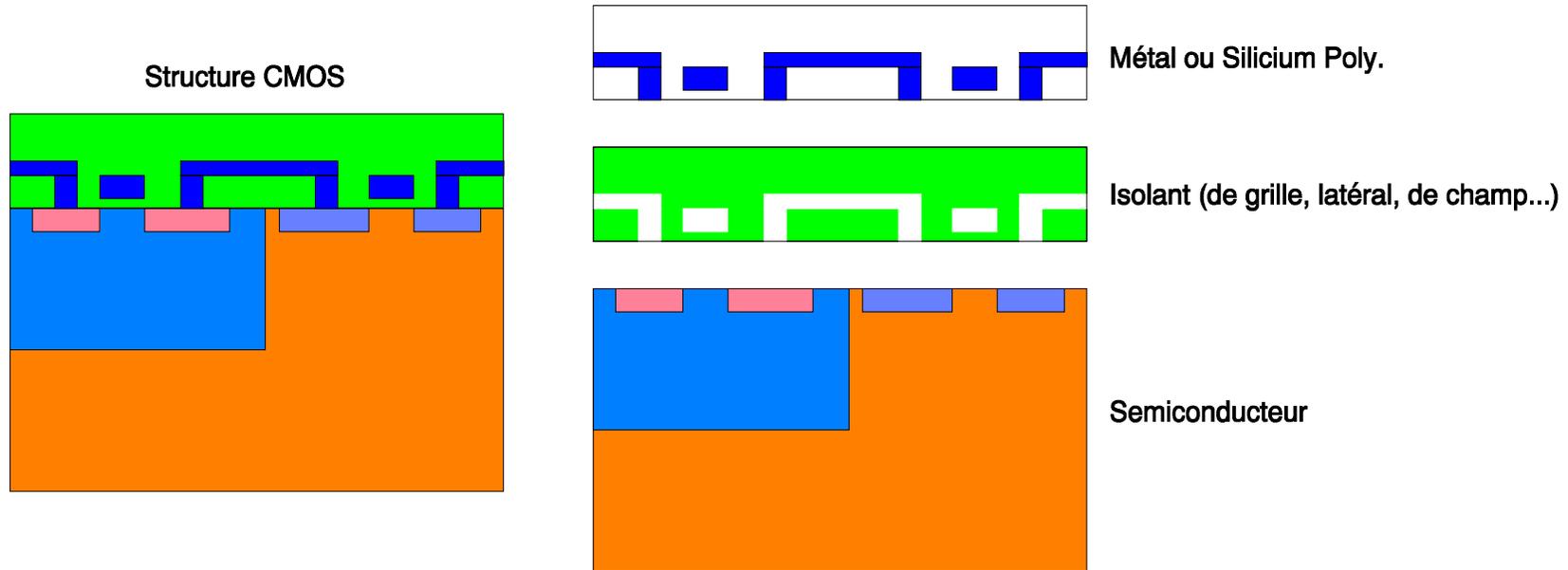
Les trois zones sensibles d'un composant ou circuit intégré typique

# Les zones sensibles d'un composant électronique :

## (2) les isolants

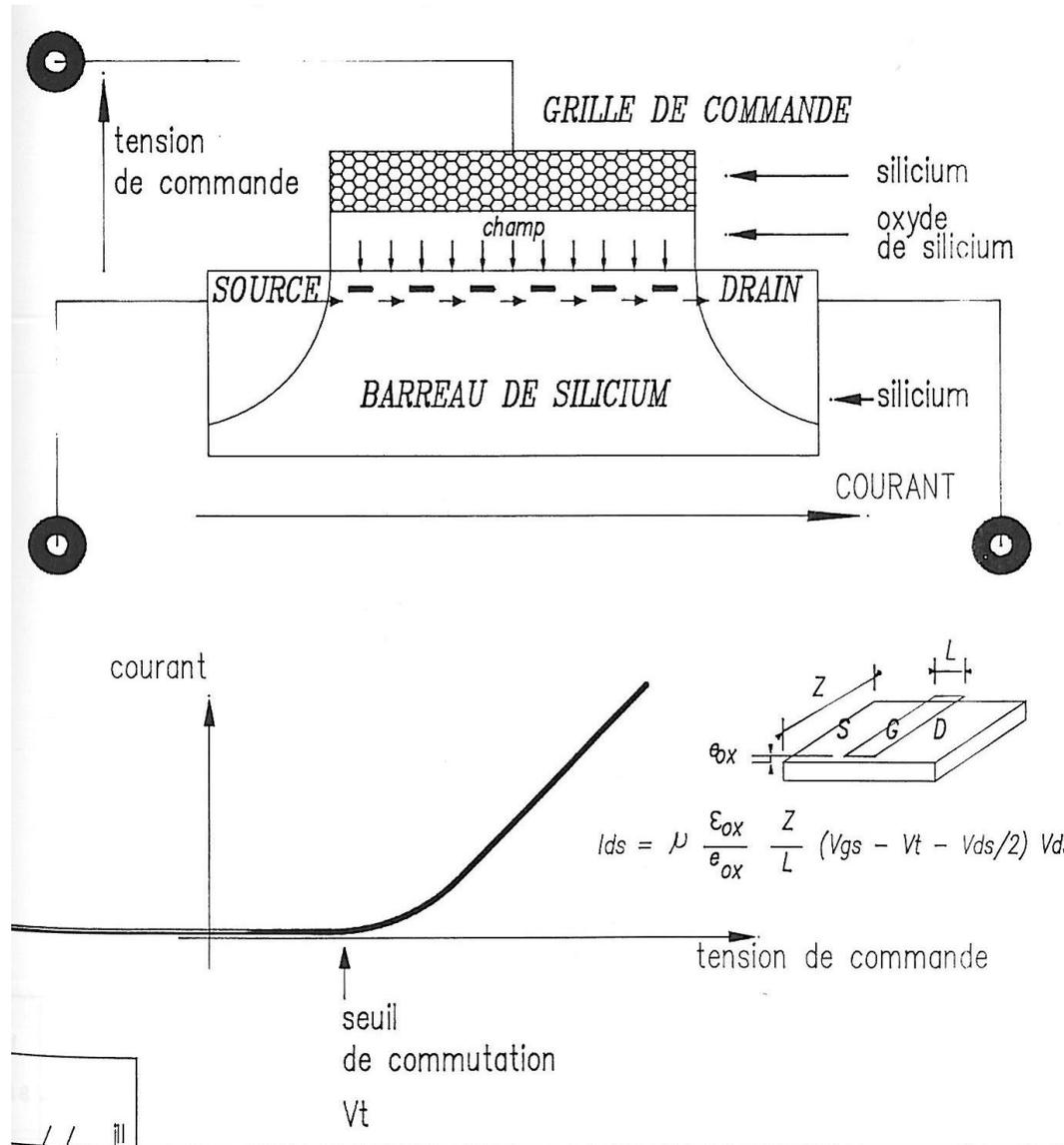
Un composant, par exemple un circuit intégré CMOS au silicium, peut être décomposé en trois types de constituants :

le volume semiconducteur avec sa surface active, les couches isolantes (oxyde de grille des transistors, isolants latéraux, oxydes dits de champ, isolants interniveaux), et couches métalliques ou en silicium polycristallin servant aux interconnexions.



Les trois zones sensibles d'un composant ou circuit intégré typique

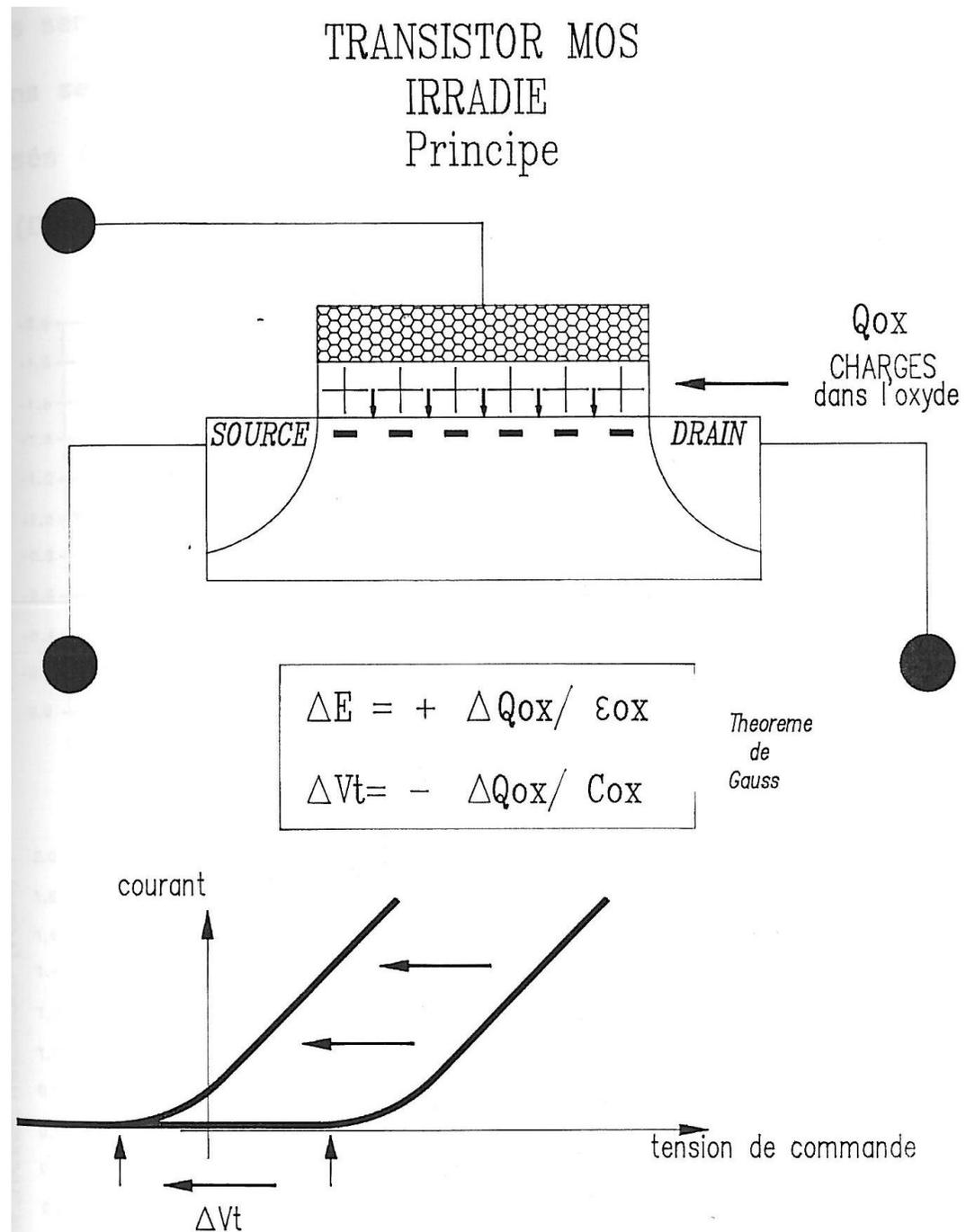
# Le transistor MOS, élément de base de la microélectronique



# DANS LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP

En s'accumulant sur  
toutes les lacunes,  
la charge totale piégée  
augmente.

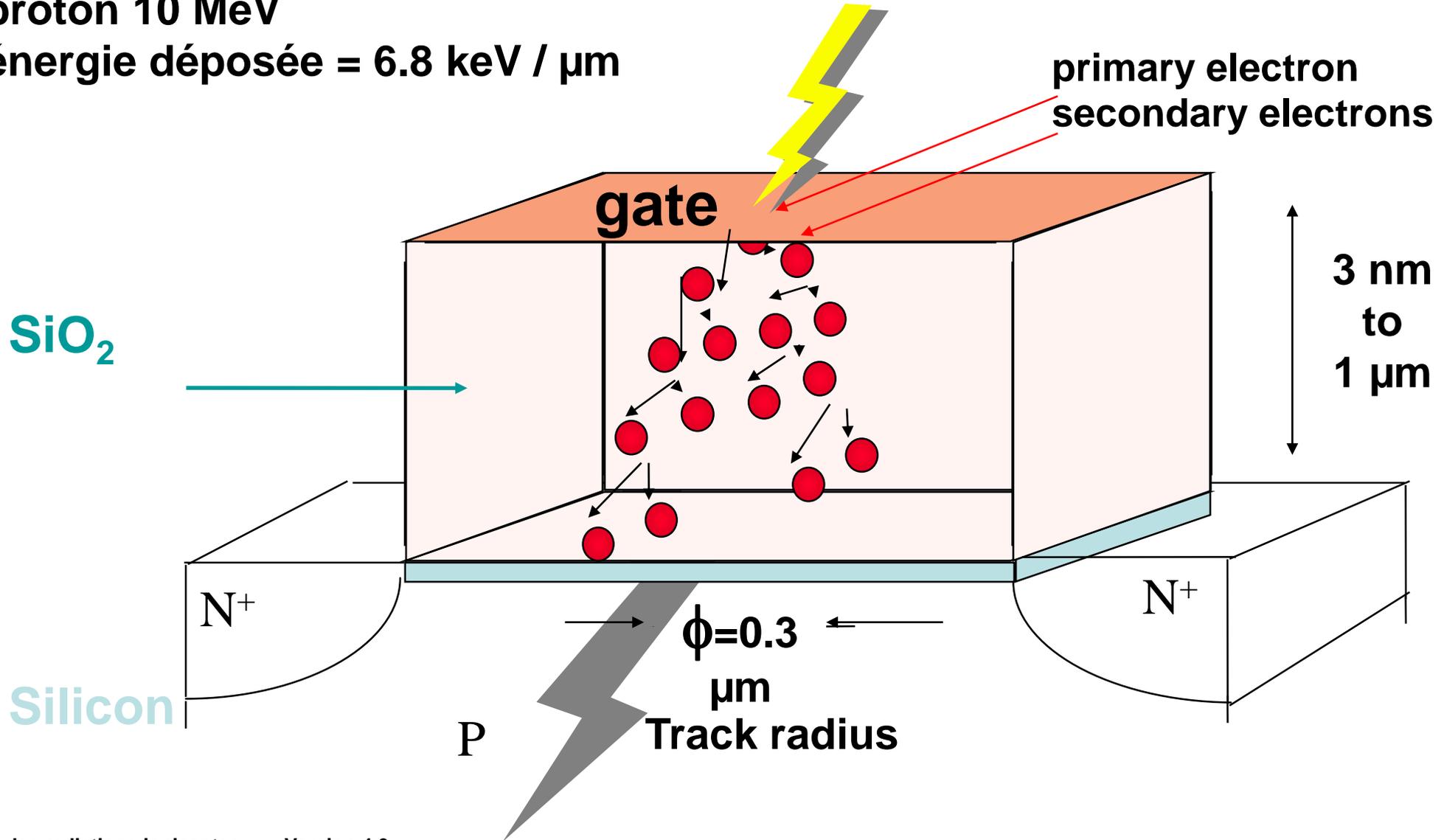
C'est l'effet  
de la « dose accumulée »



# Effet d'une particule

$\sim 10^{-15}\text{s} - \sim 10^{-14}\text{s}$

proton 10 MeV  
énergie déposée = 6.8 keV /  $\mu\text{m}$



# Charge Generation

$10^{-15} \sim 10^{-14}$  s

One 10 MeV proton

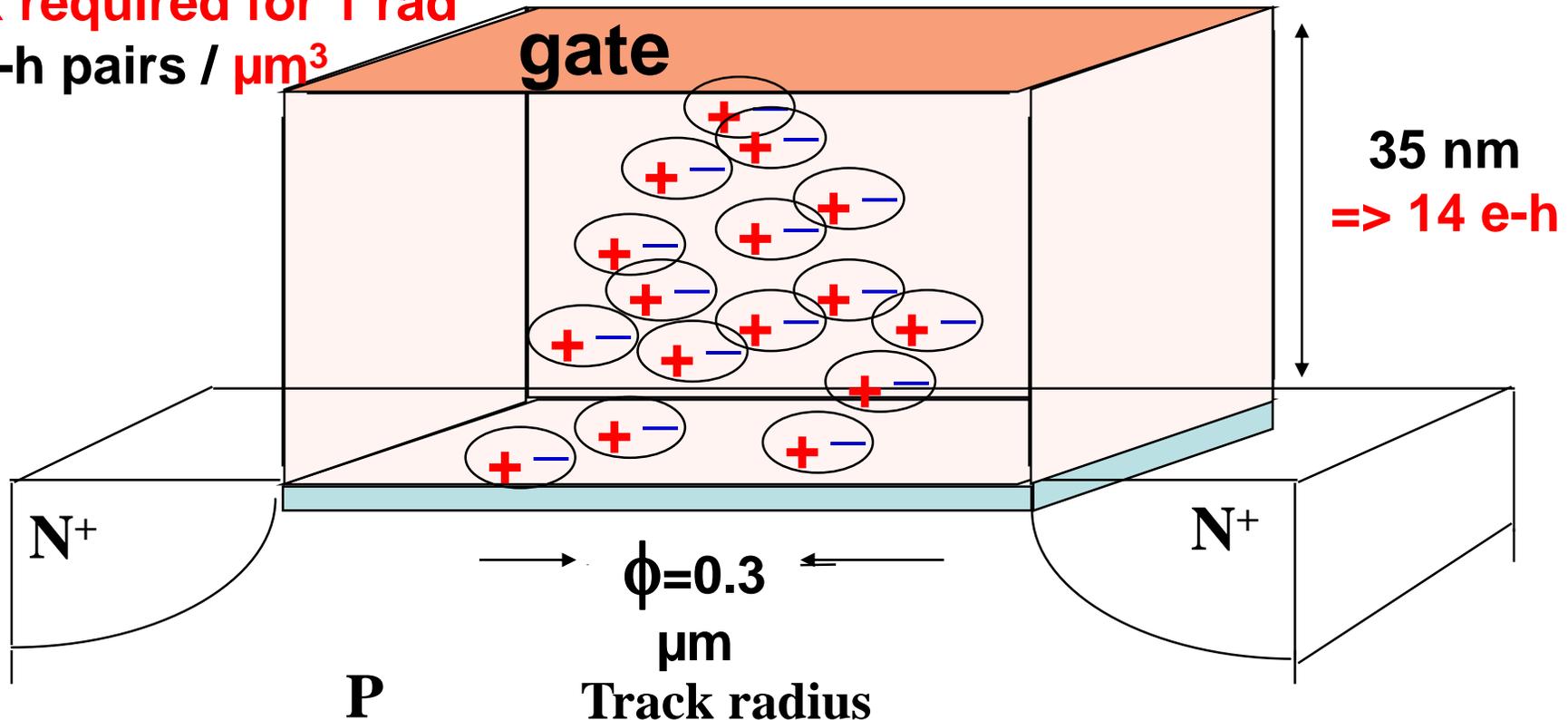
=> 378 electron-hole pairs generated /  $\mu\text{m}$  of track

The flux required for 1 rad

=> 7.8 e-h pairs /  $\mu\text{m}^3$

$\text{SiO}_2$

Silicon

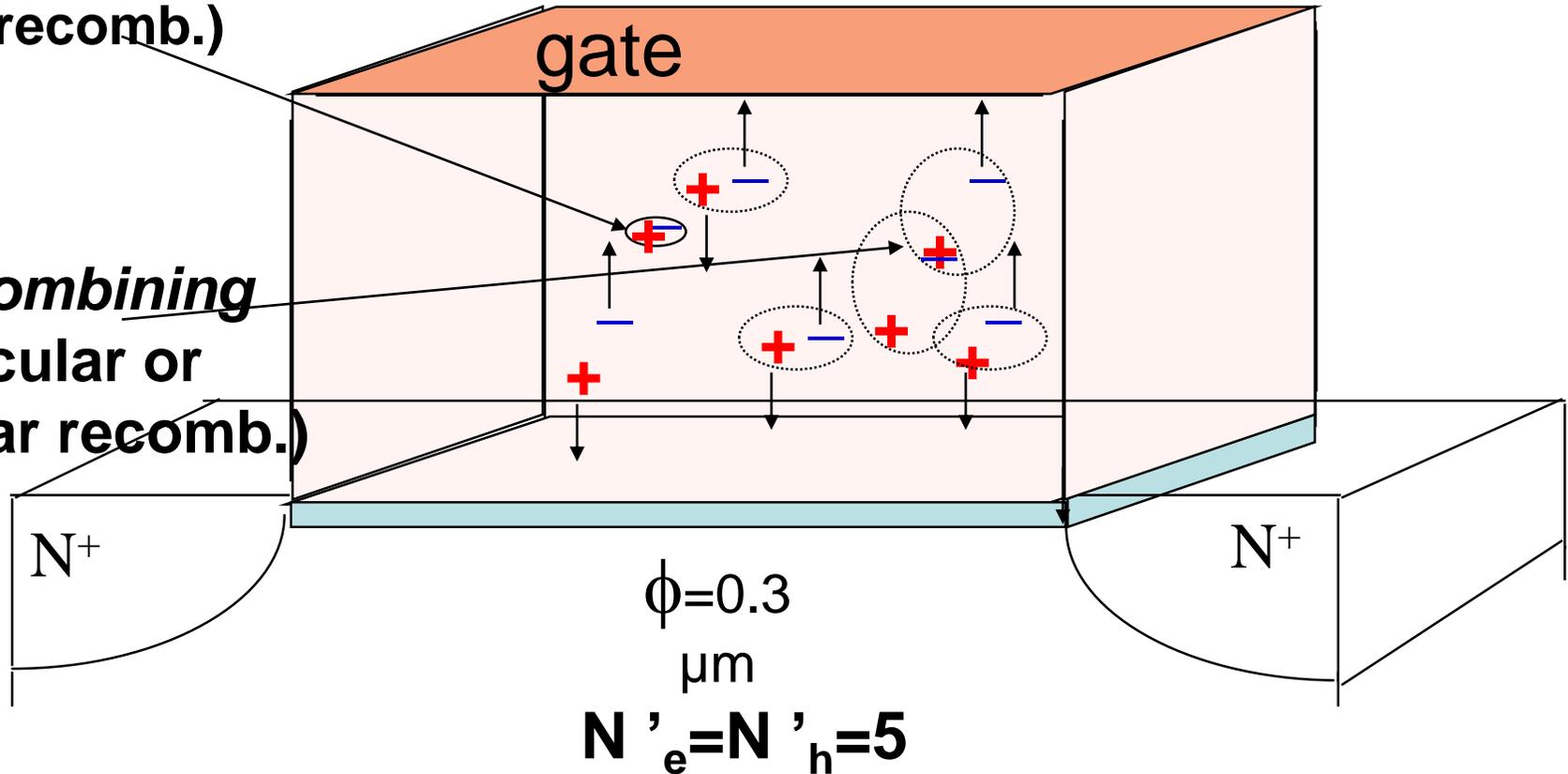


# Initial Recombination

$\sim 10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ s}$

*e-h pair  
collapsing*  
(geminate recomb.)

*e and h  
drifting  
and recombining*  
(bimolecular or  
columnar recomb.)



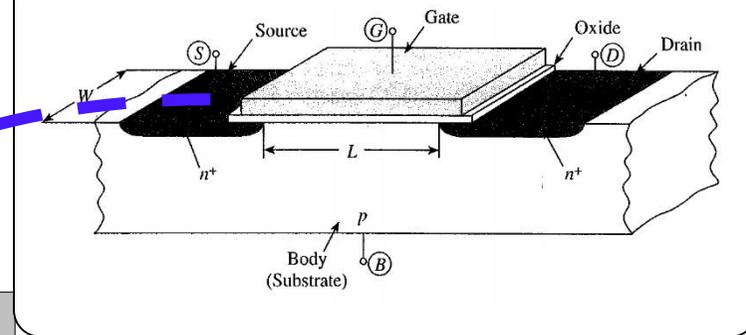
Yield  $N^\circ 1$

$$Y(E) = \frac{\text{Number of pairs escaping}}{\text{Number of pairs generated}} = \frac{5}{14}$$

# TRANSISTOR

## Revenons à la physico-chimie

## Description d'un oxyde de grille



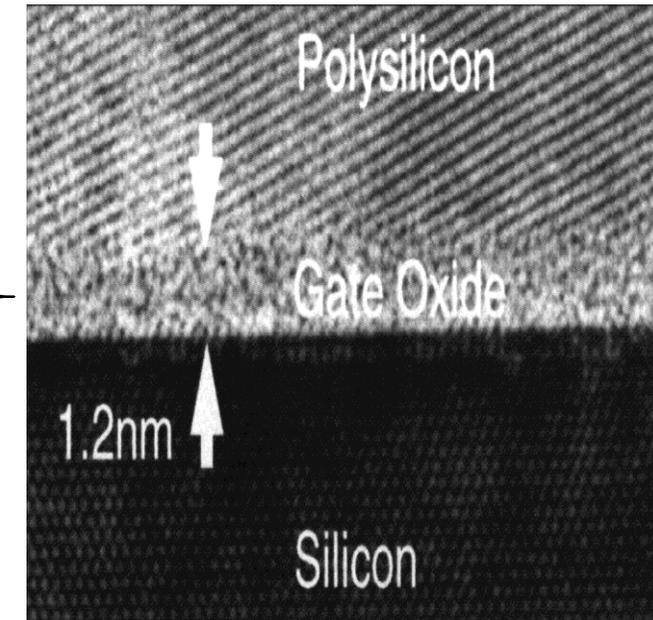
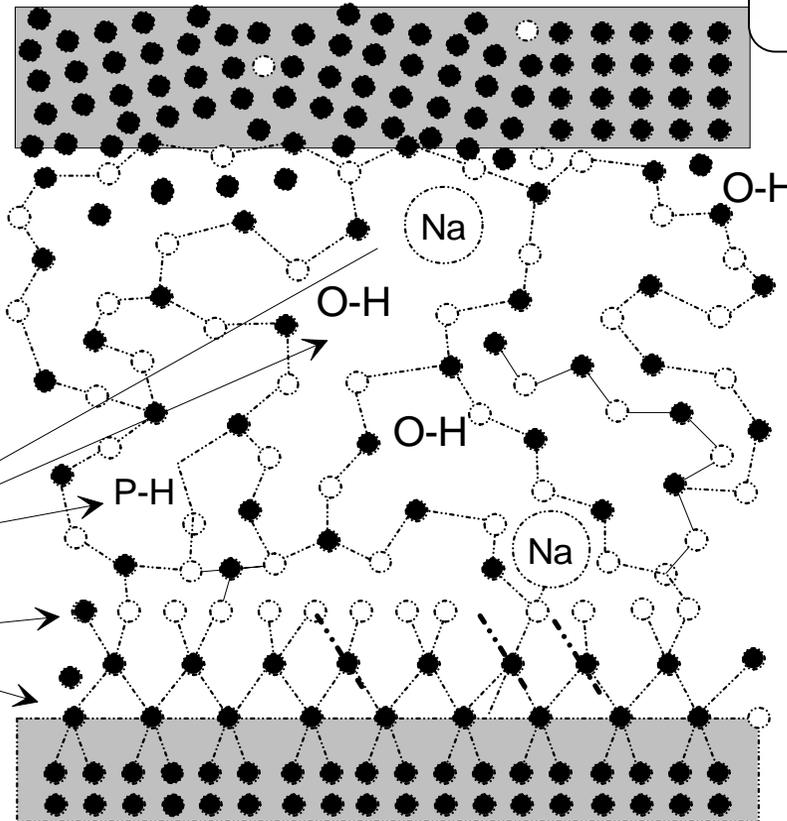
Grille en silicium polycristallin

Oxyde de grille

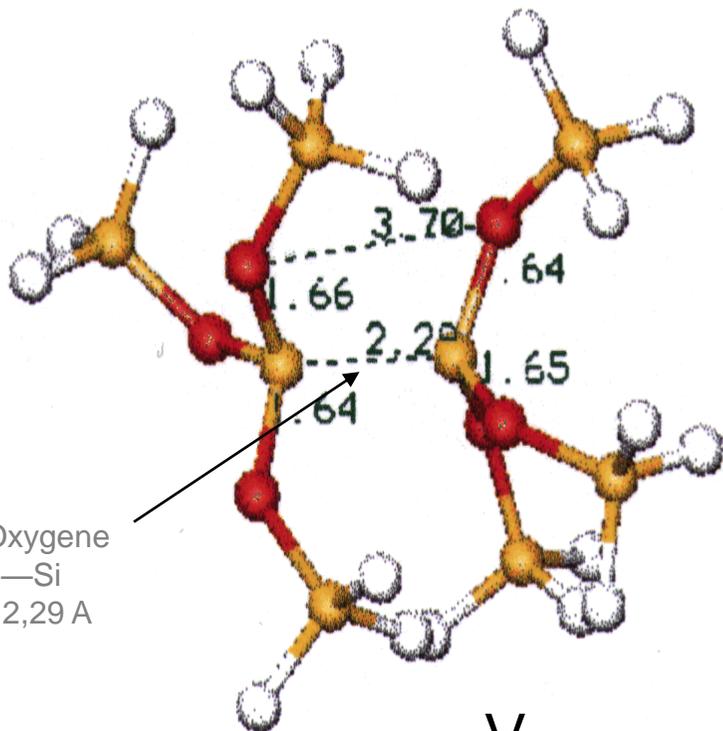
30 à 70 Å

contaminant

Liaison non-satisfaite  
-> centre de piégeage  
-> défaut électrique

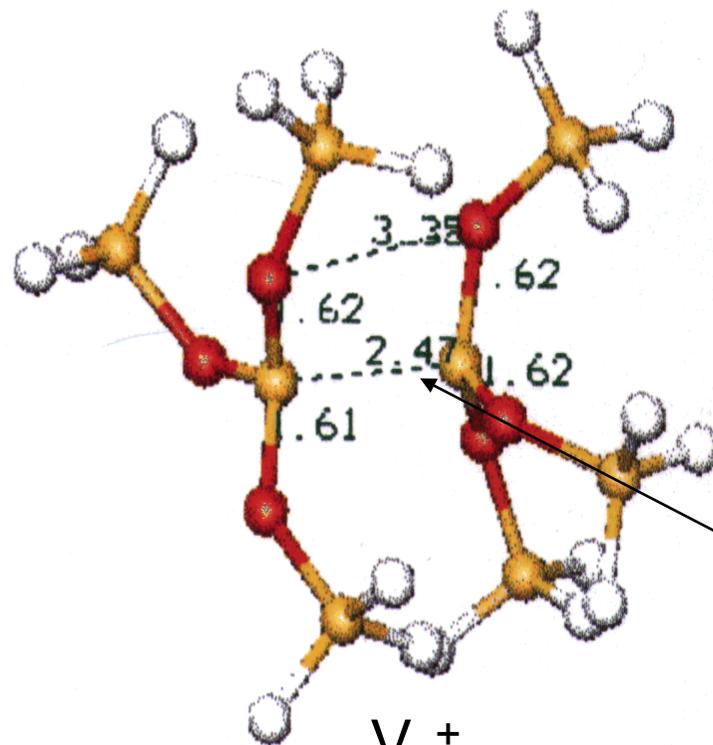


# Le défaut neutre passe à l'état de charge +1



Lacune Oxygene  
Défaut Si—Si  
Distance 2,29 Å  
neutre

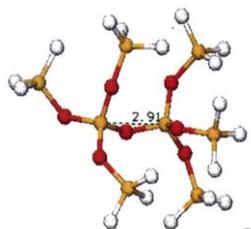
$V_0$   
neutral  
Oxygen  
Vacancy



Lacune Oxygene  
Défaut Si—Si  
Distance 2,47 Å  
Chargé +1

$V_0^+$   
positively  
charged  
Oxygen  
Vacancy

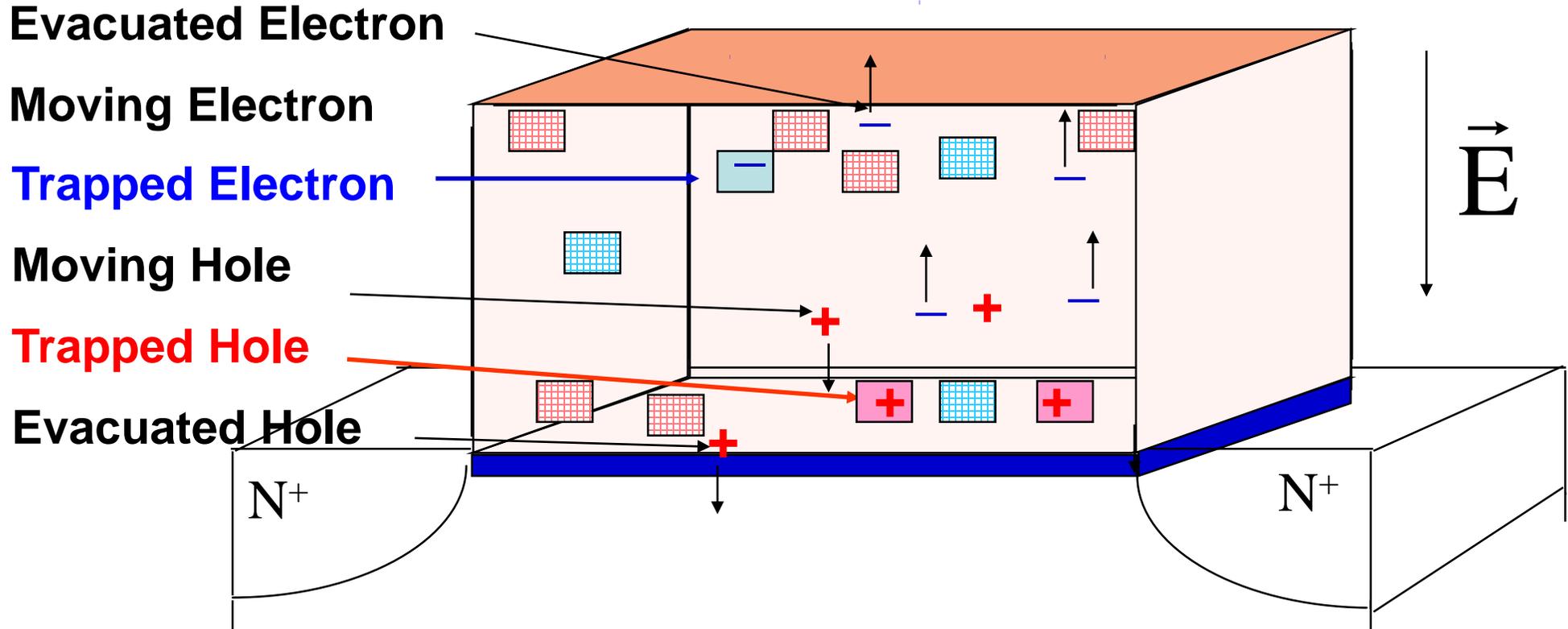
**La distance  
Si-Si  
augmente ce  
qui stabilise  
encore plus le  
défaut chargé**



Rappel : liaison Si-O-Si  
Normale 2,9 Å

# Final State: the « Permanent Trapping »

$\sim 10^{-12} \sim 10^3 \text{ s}$



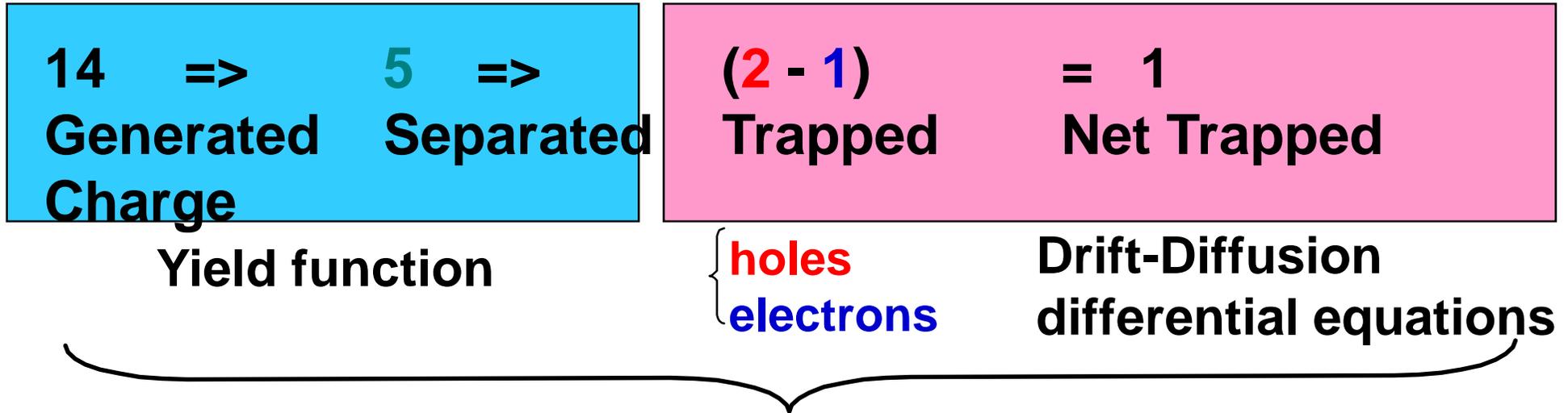
Yield  $N^{\circ}2$

$$f(E) = \frac{\text{Number of carrier trapped}}{\text{Number of carrier separated}}$$

$= 1/5$  (electr.)

$= 2/5$  (holes)

# Bilan : succession de rendements (Yield)



The Total Yield is  $1/14 = 7\%$

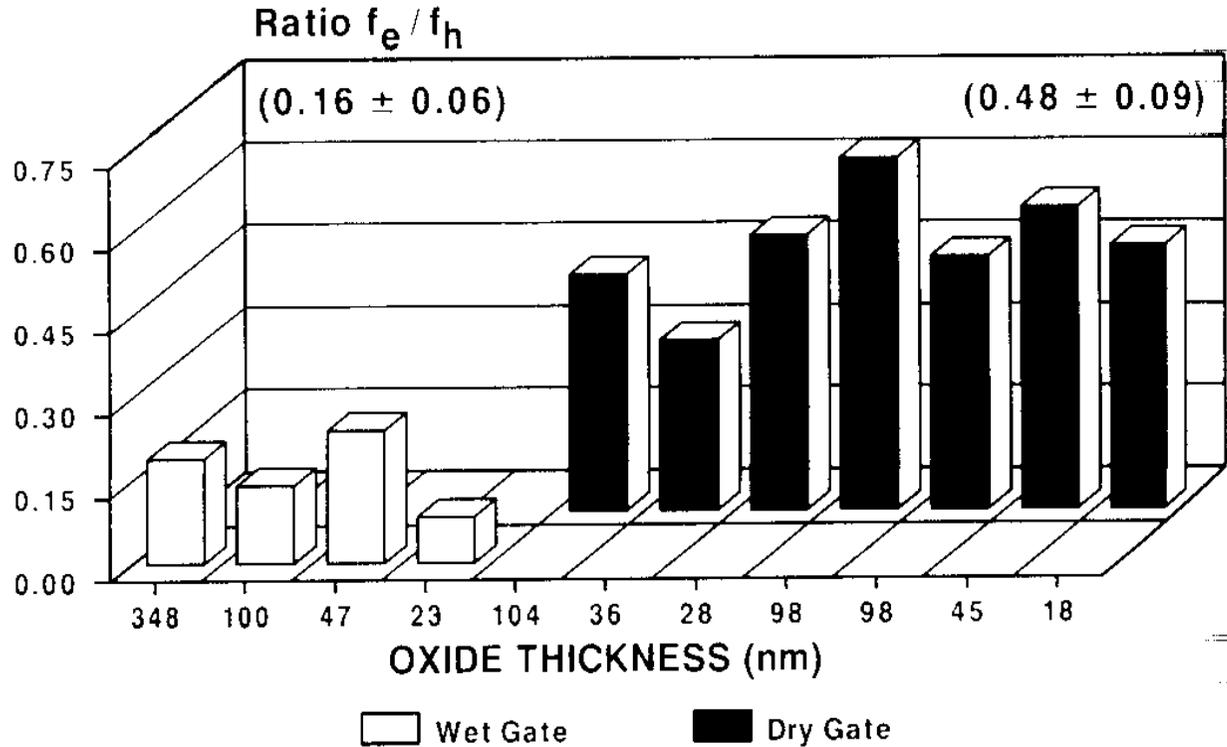
*Cet exemple est généralisable en calcul 3D à l'aide d'équations différentielles comportant les courants d'etrous et d'électrons et les coefficients de recombinaison et de capture par les pièges.*

# Comment: Sign of Trapped Charges

Under normal conditions, the trapped electron charge is only a fraction of the trapped hole charge

At first-order, trapped holes are only considered

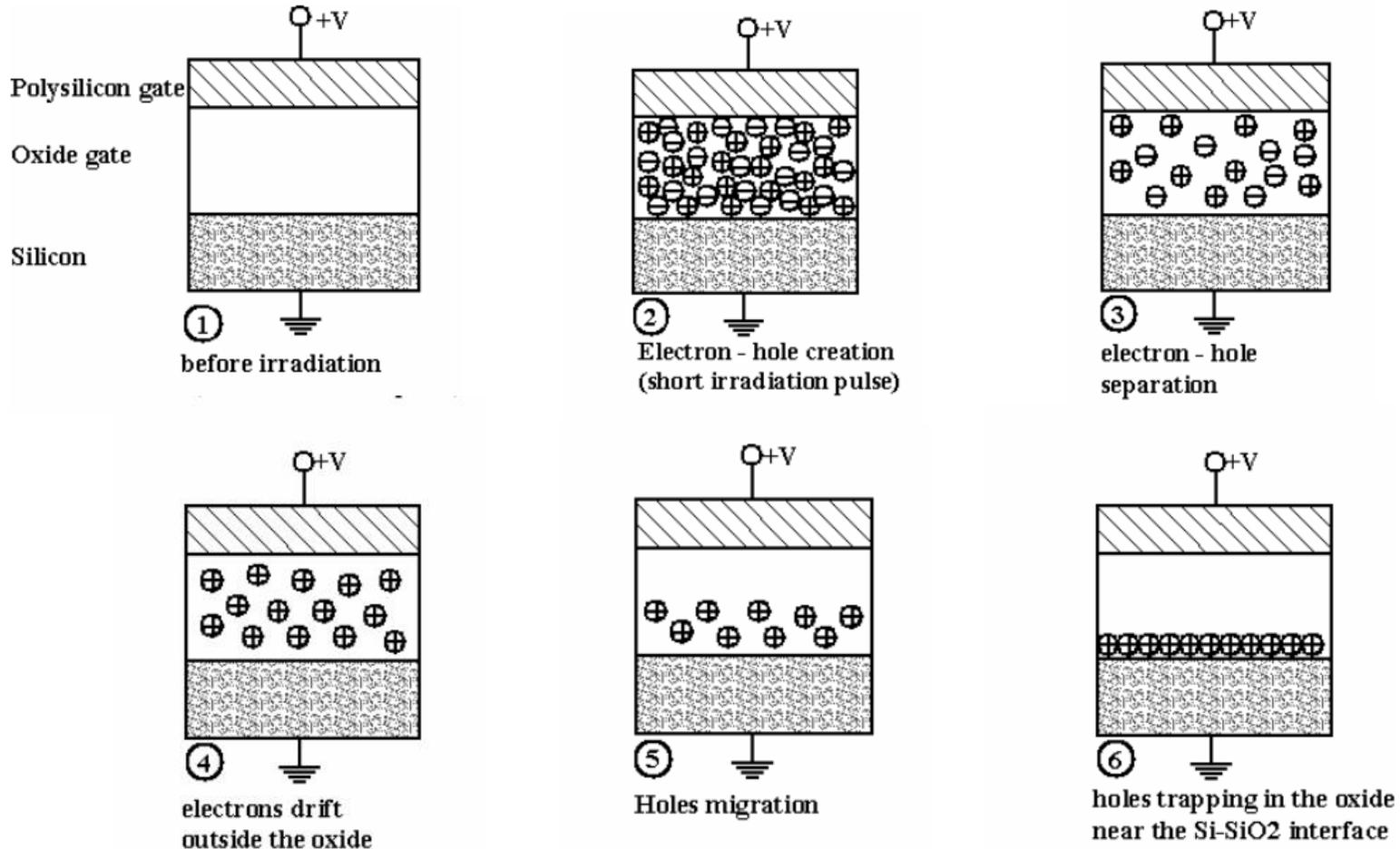
$$\frac{N_e}{N_h}$$



[Fleetwood-92]

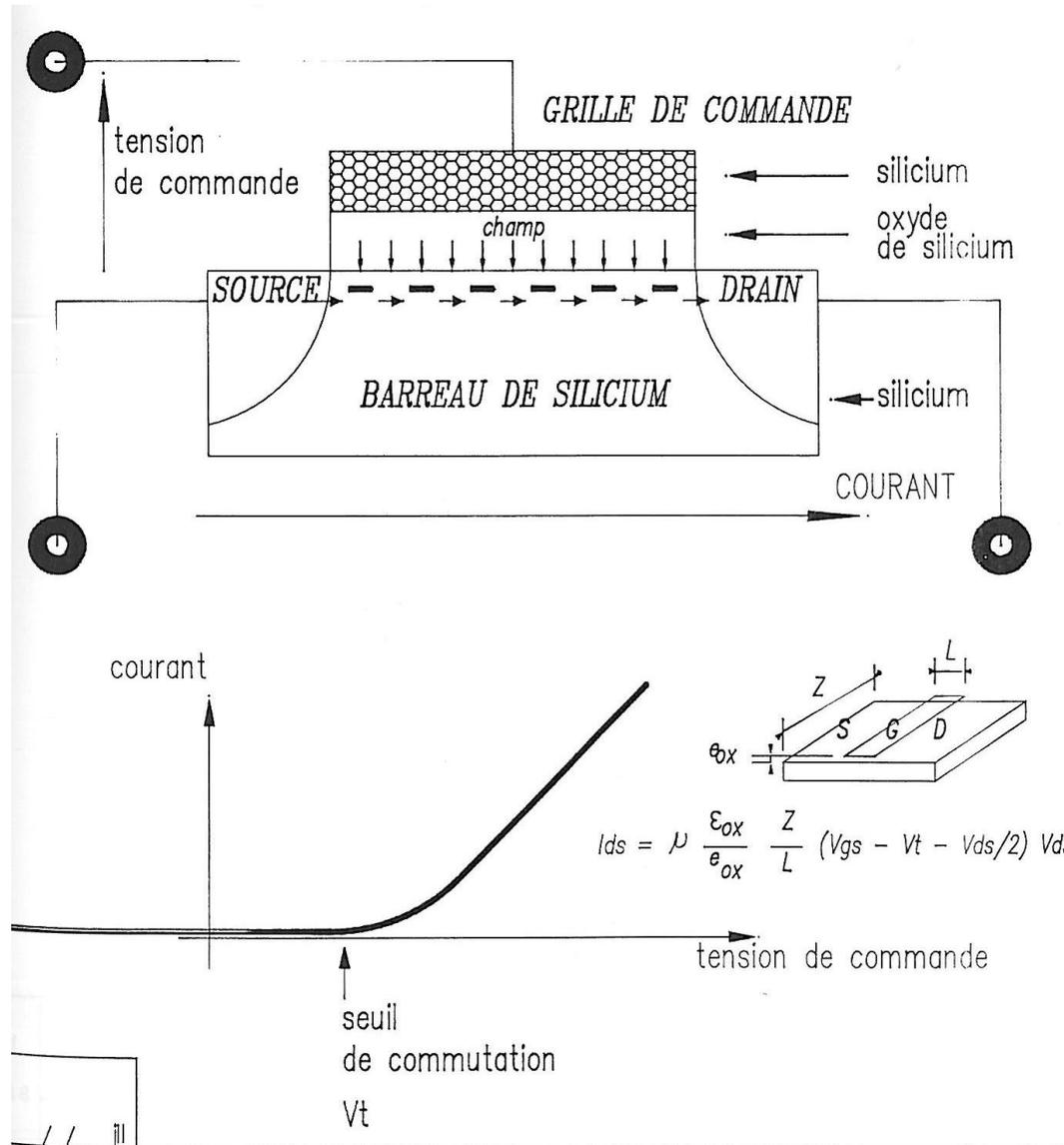
# Récapitulation : Effet de piégeage des charges

## Cumulated ionization in a MOS oxide. Example: NMOS

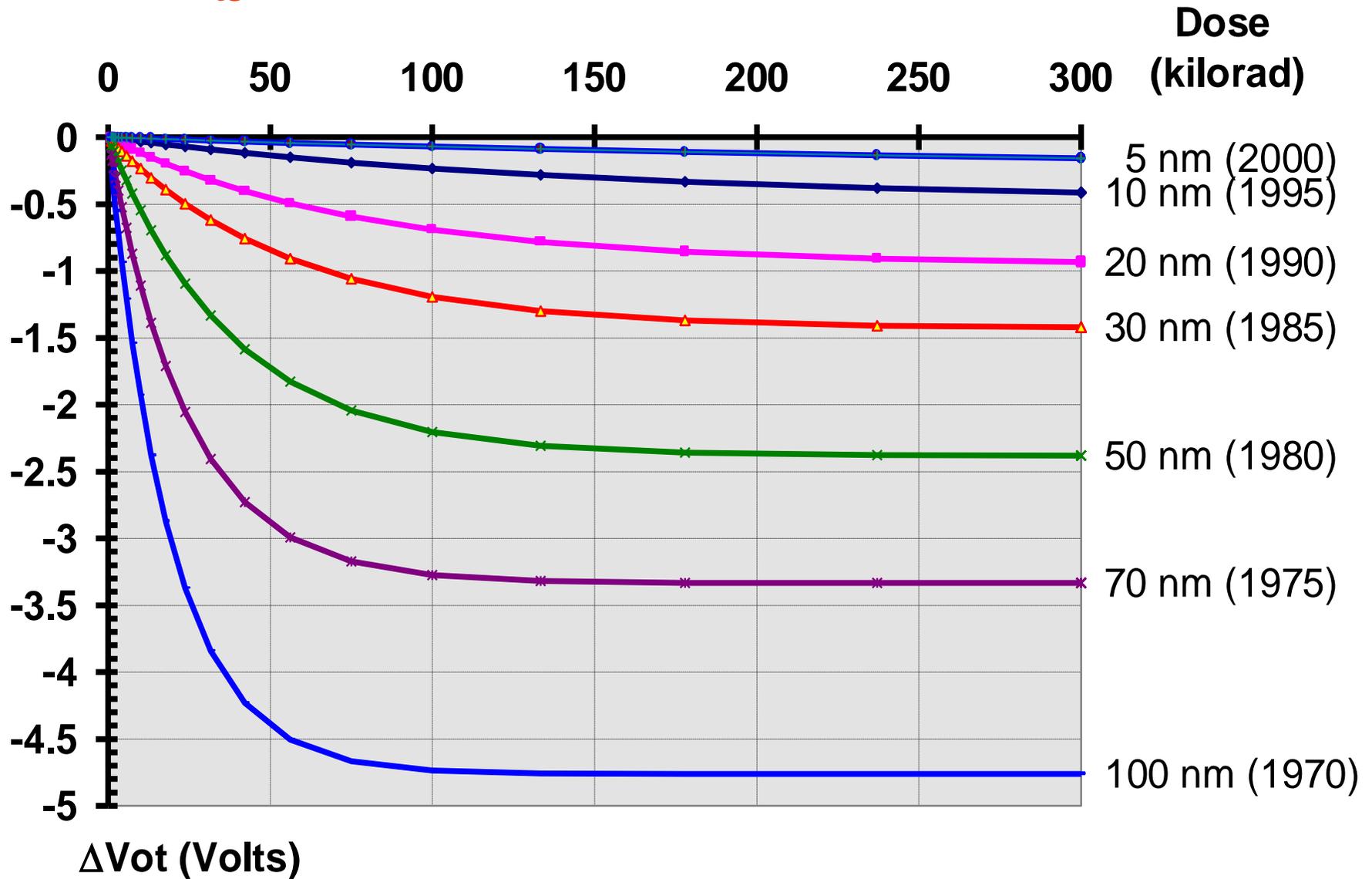


**Autre composante de défauts : les états d'interface (on n'en parlera pas ici, mais le raisonnement est proche de celui-ci)**

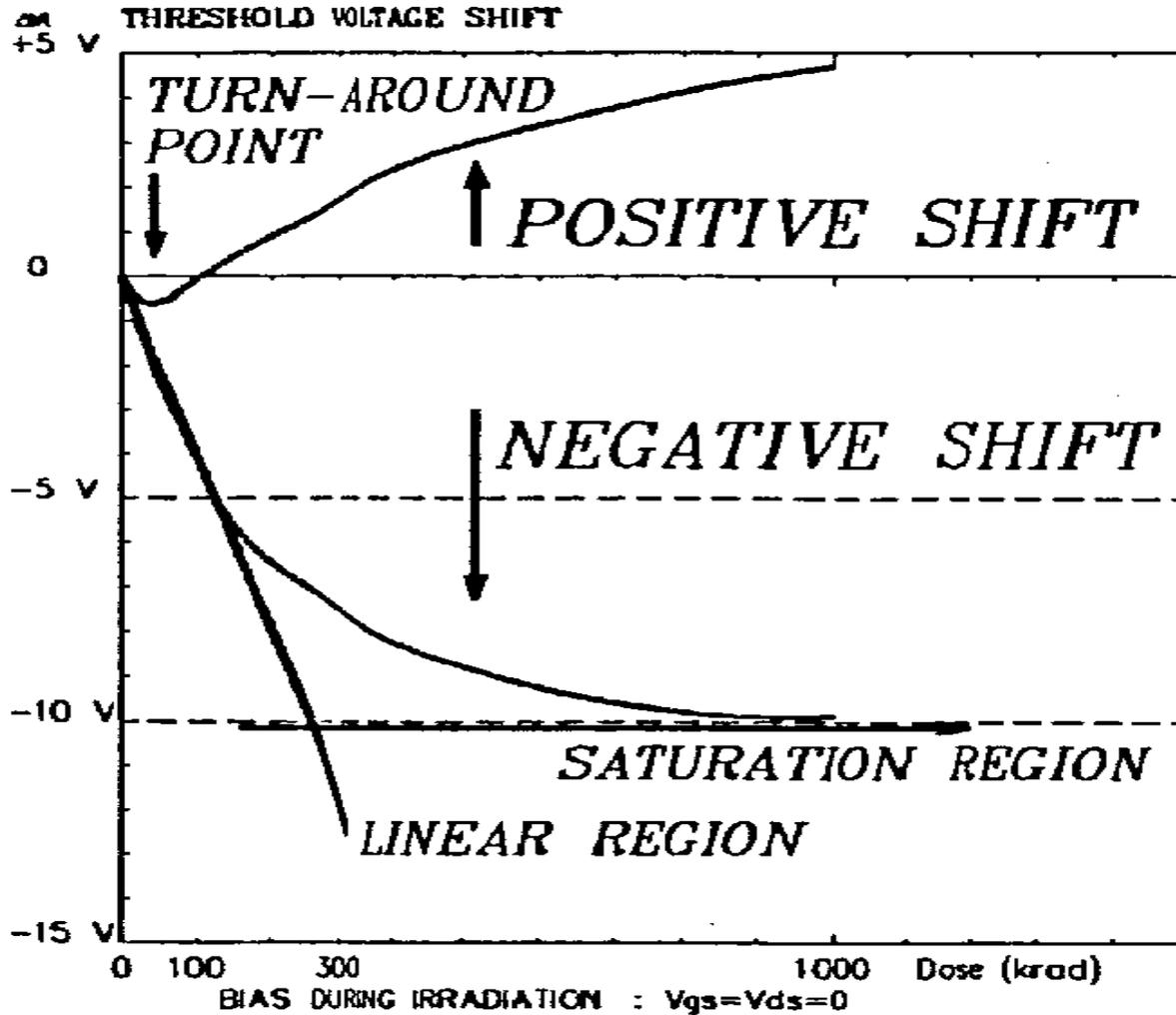
# Le transistor MOS, élément de base de la microélectronique



# Effet de l'épaisseur d'oxyde (pour $\sigma \cdot N_{ts} = 1$ )



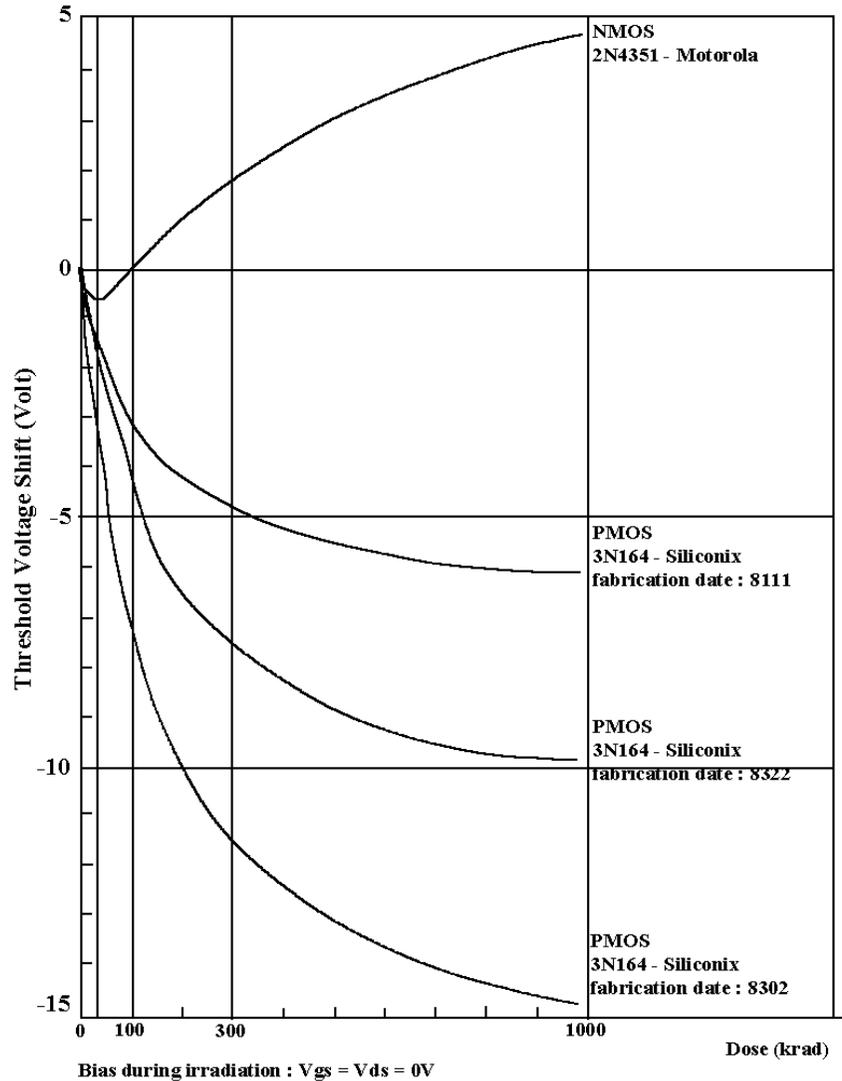
# DERIVE DES TENSIONS DE SEUIL DES TRANSISTORS MOS



**TRANSISTORS N**

**TRANSISTORS P**

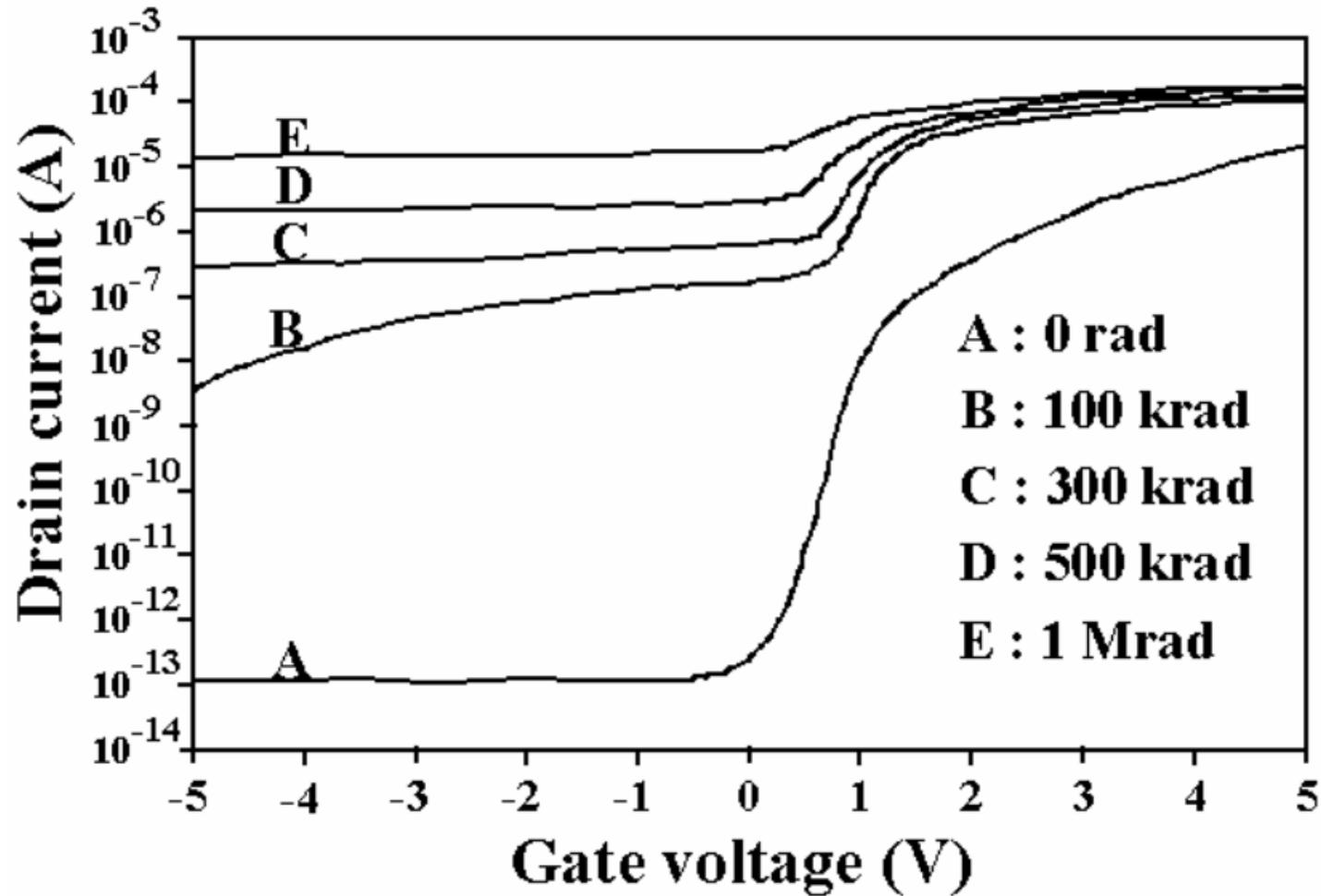
**$\Delta V_t$  of commercial MOS depends on the fabrication date. Example:**



*⇒ Don't forget the variation of radiation tolerance within a batch or from batch to batch when testing COTS components*

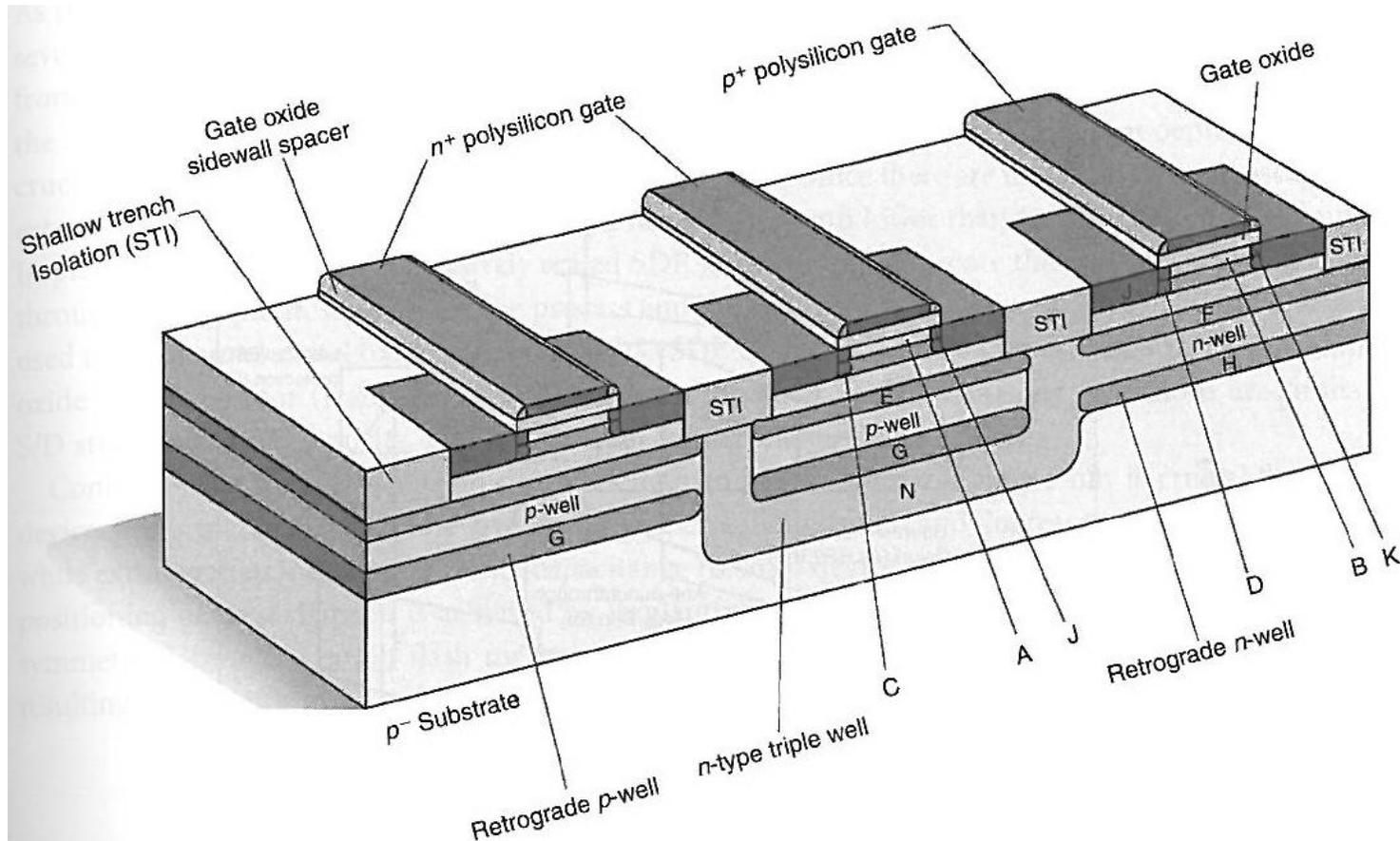
# TRES IMPORTANT ! LE COURANT DE FUITE

Leakage current induced in N-MOS by total dose (example)



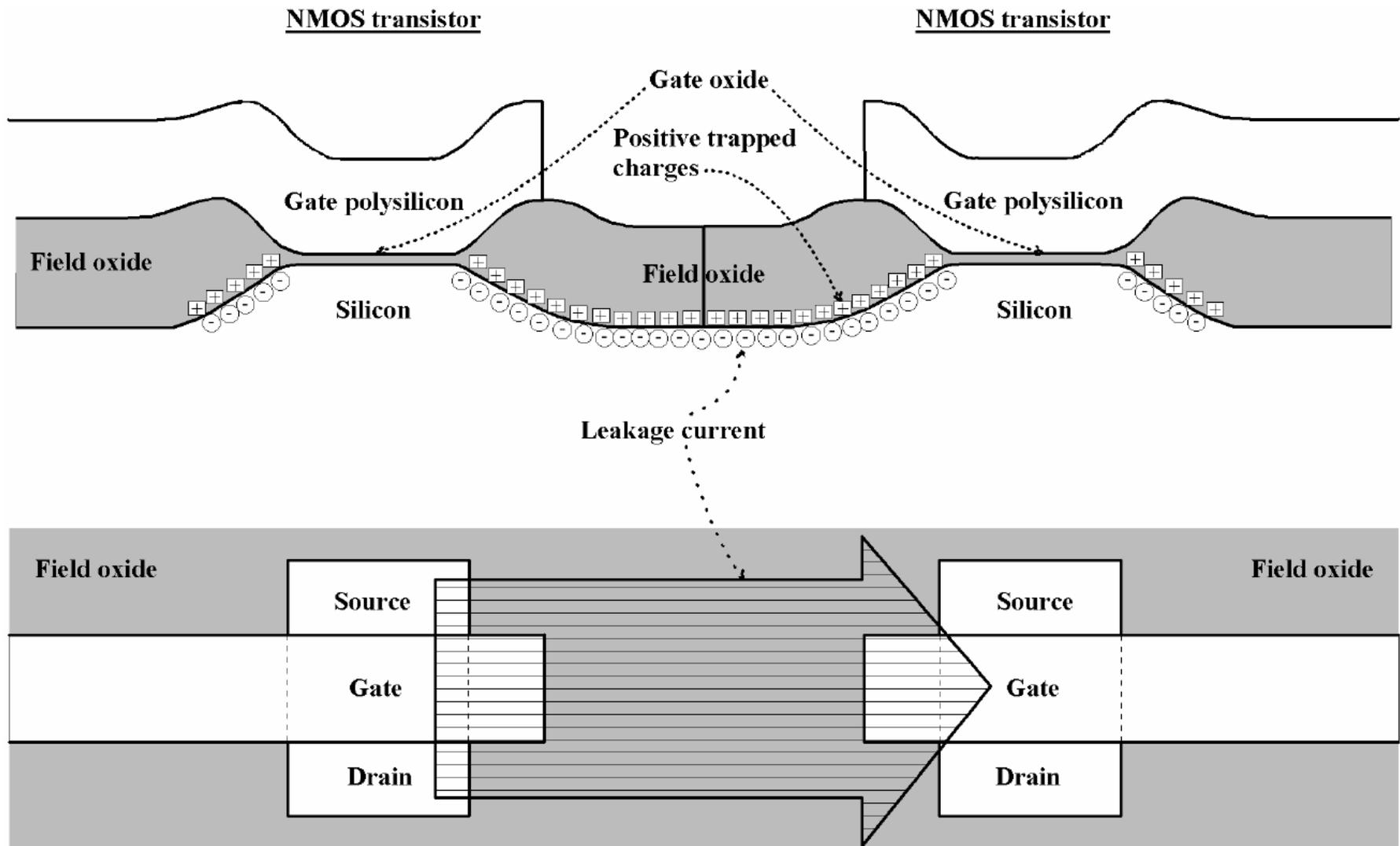
# Les circuits de traitement sont assez complexes

## Exemple de trois transistors élémentaires

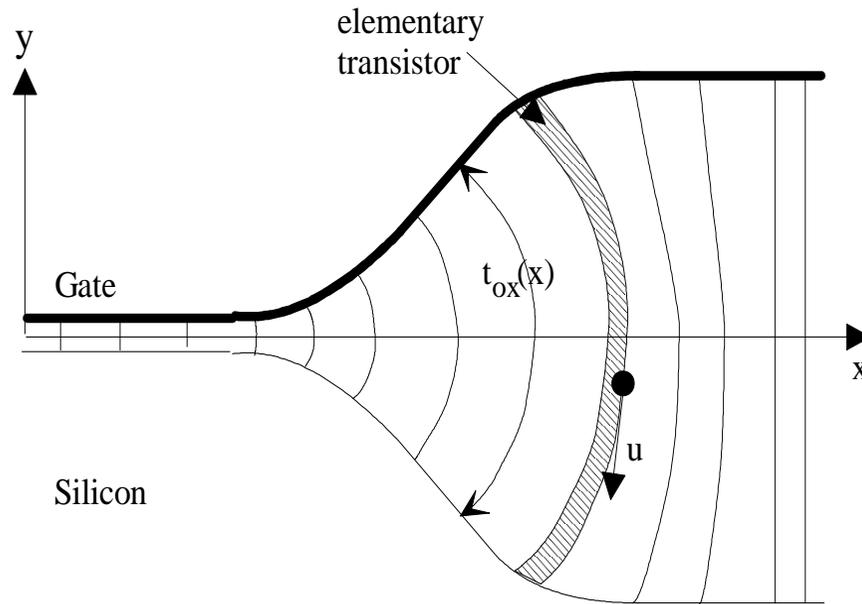


**FIGURE 7.23** Implanted regions in advanced devices. A,  $n$ -channel metal oxide silicon (NMOS) channel threshold voltage adjust ( $p$ -type); B, PMOS channel threshold voltage adjust ( $n$ -type); C, NMOS punchthrough stop ( $p$ -type); D, PMOS punchthrough stop ( $n$ -type); E, NMOS channel stop ( $p$ -type); F, PMOS channel stop ( $n$ -type); G, Retrograde  $p$ -well; H, Retrograde  $n$ -well; J, NMOS source/drain extension ( $n$ -type); K, PMOS source/drain extension ( $p$ -type); L, NMOS source/drain ( $n$ -type); M, PMOS source/drain ( $p$ -type); N, Triple well ( $n$ -type).

**Leakage current induced between adjacent N-MOS** by total dose



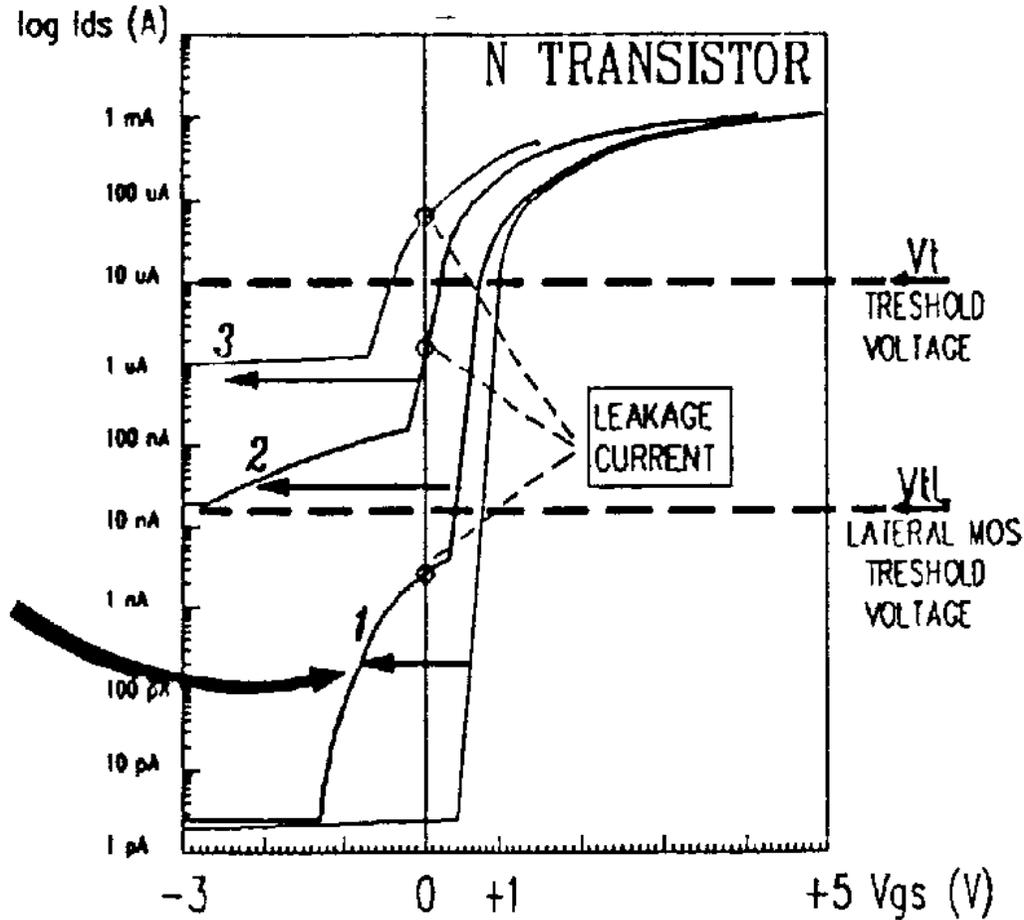
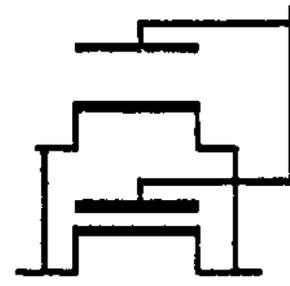
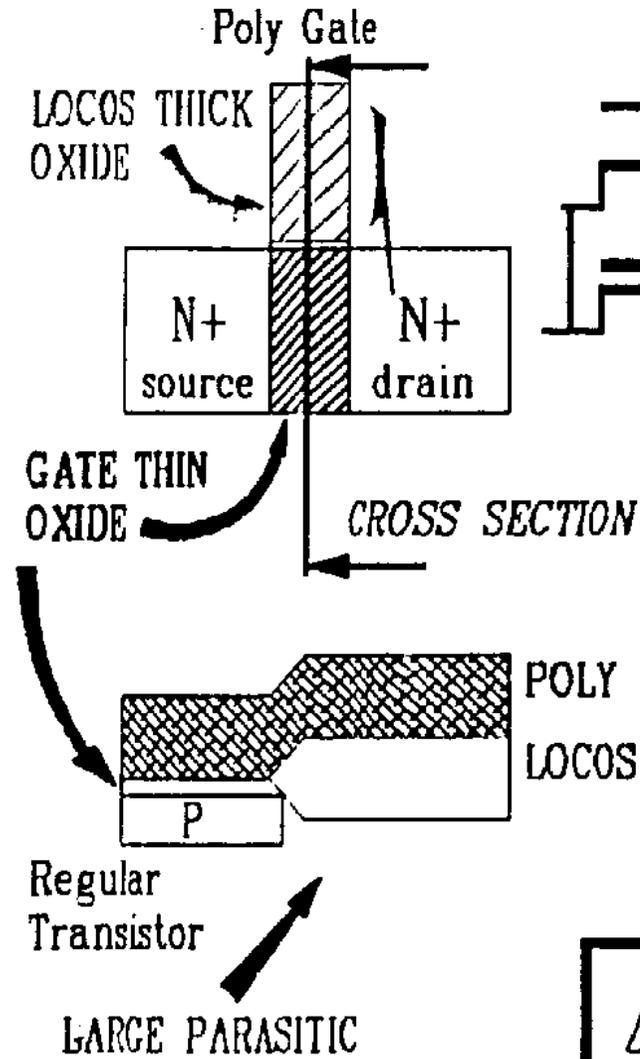
# L'oxyde latéral est d'épaisseur non constante



# Role de l'épaisseur de l'oxyde latéral (tox)

## (1) Vue de dessus

## Transistor latéral

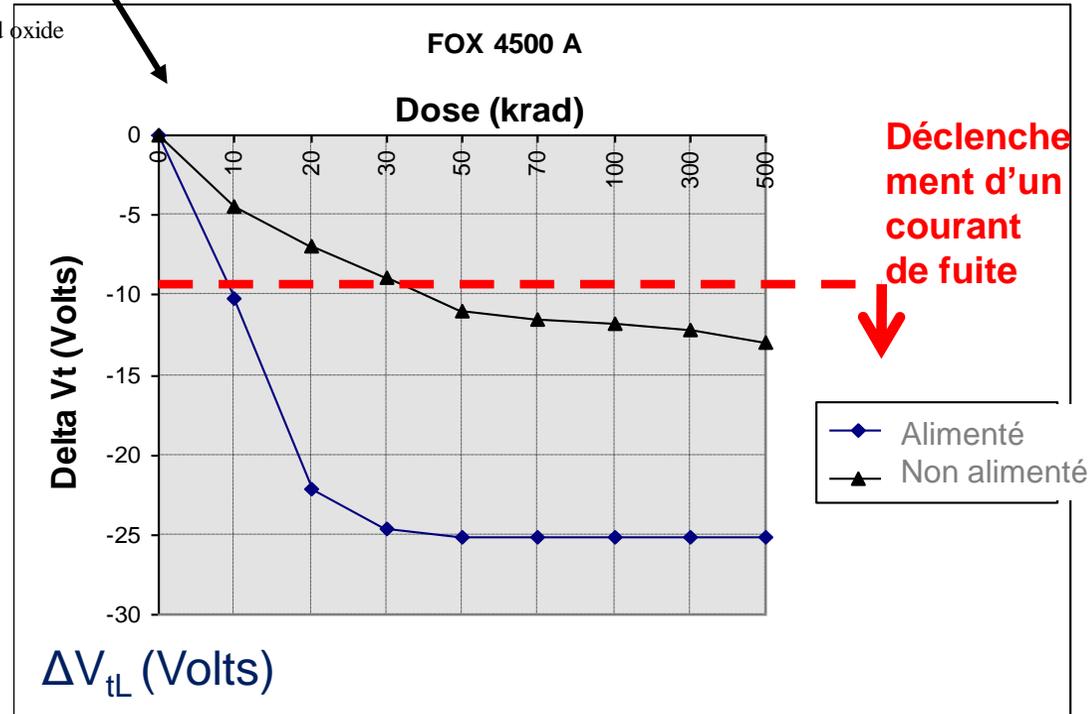
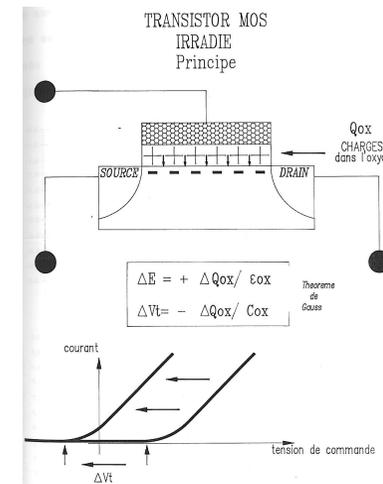
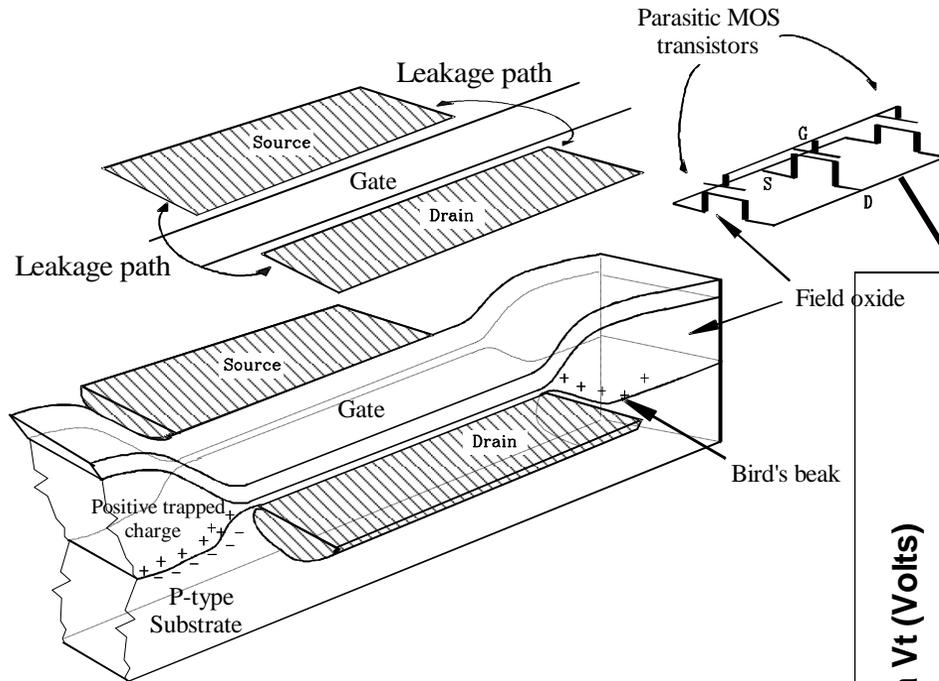


$$\Delta V_t \propto t_{ox}^{1 \text{ to } 2}$$

## (2) Vue en coupe

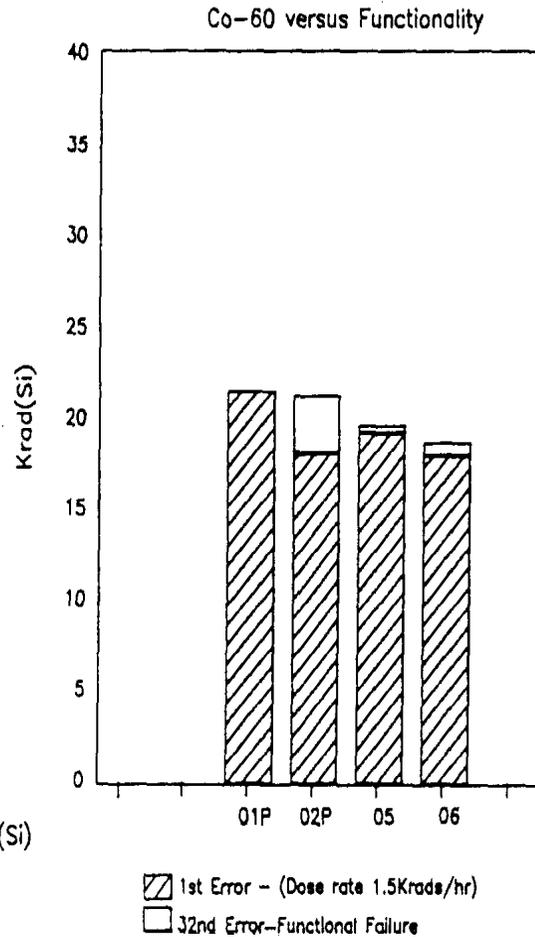
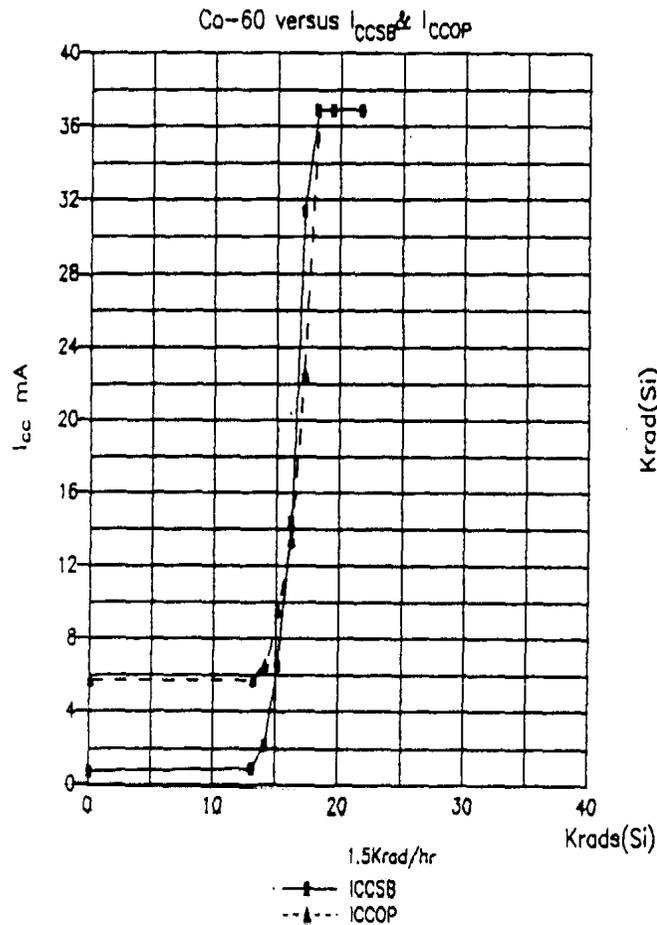
# Dérive de tension de seuil du Transistor Lateral

$\Delta V_{tL}$



# Effects in complex components

## Leakage Currents



ESA/ESTEC-

## 4 Mbit TMS44100DM DRAM

L. Adam, R. Harboe-Sorensen et al.,  
ESA group, radiation Summary  
Sheet 5 and 9, 1991

# Exemple de données publiées (NASA/JPL website)

TABLE I. SUMMARY OF RECENT TID/DD TEST RESULTS AT THE JET PROPULSION LABORATORY (CONT'D.)

Part Type	Description	Tech.	Mfr.*	Date Code	Sample Size	Dose Rate (rad/s)	Bias During Exposure	Failure Parameter	Spec. Limit	Pre-Rad Value	Av. Dose/Fluence to Parm. Failure	Av. Dose/Fluence to Func. Failure	Comments
IRFMG40	MOSFET, 1000V	N-channel	Int. Rect.	0032	8	25 (HDR)	Gate or drain biased	BVds, IDSS, & VG(th)	various		~14 krad	>16 krad	Usable to ~16 krad with some parameter derating @ high/low temperatures
LF2802A	MOSFET, RF	N-channel	M/A-Com	01F15	6	50 (HDR)	Various biases	VG(th)	various		5 krad	5-10 krad	Usable to >5 krad with VG(th) derating
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	50 (HDR)	Biased	VOS	2 mV		5 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	50 (HDR)	Unbiased	VOS	2 mV		5 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	0.01 (LDR)	Biased	IB+	50 nA		3-4 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	0.01 (LDR)	Unbiased	IB+	50 nA		3-4 krad	>30 krad	Scotland foundry
LT1006A	Op Amp	Bipolar	Lin. Tech.	9626A	5 per group	HDR & LDR	Biased & Unbiased	VOS	180 μV	<50 μV	12 krad (LDR, biased)	10-15 krad (HDR, biased)	Generally OK to 10 krad; RLAT recommended
LTC1157CS8	MOSFET driver	CMOS	Lin. Tech.	819	5	25 (HDR)	Biased	Voh, Icel	--	--	3 krad		OK to 2.5 krad
LTC1604AIG	A/D converter, 16-bit	CMOS	Lin. Tech.		4	25 (HDR)	Biased	Bipolar Gain Error					Bipolar gain error slightly out of specification at 100 krad
MAX306EW1	Multiplexer, 16-channel	CMOS	Maxim	0143	3	25 (HDR)	Biased	Functional	--	--	--	<1 krad	Address lines high
MAX306EW1	Multiplexer, 16-channel	CMOS	Maxim	0143	4	0.01 (LDR)	Biased (see comment)	ID(on)	300 nA	20 nA	3 krad	5 krad	Address lines cycled continuously
MAX539	D/A Converter, 12-bit	CMOS	Maxim	GF008	4	25 (HDR)	Biased, clocked	Linearity, supply currents			>10 krad	<20 krad	Minor parametric changes within spec. at 10 krad
OPA687N	Op Amp, wide-band	Bipolar, very high speed, complementary	Tex. Instr. (Burr Brown)	0231	5 per group	0.01 (LDR)	Biased & Unbiased	No significant changes after 30 krad	--		>30 krad	>30 krad	
PSS-QP50-6-SM	Quadrant photo-diode (Si)	Si diode	Pacific Silicon Sensor	0123	8	Protons	Unbiased	Responsivity		1 mA	2.4E11 p/cm <sup>2</sup> [-40 krad(Si)]		Responsivity degraded ~20% @ 1 krad, & ~50% @ 15 krad.
UC1717J (5962-9474601MEA)	Stepper-motor driver	Bipolar IC	Tex. Instr. (Unitrode)	0144A	5 & 4	0.01 (LDR)	5 Biased, 4 Unbiased	Comparator threshold voltage	--	--	--	~16 krad	

# Sommaire

- 1. Les radiations sont partout ! Flux vs. Fluence
- 2. Effets « singuliers » à une particule et Effects « cumulatifs » à plus grandes fluences.
- 3. Effets électriques « singuliers ».  
Courbe de la probabilité fonction du LET de la particule
- 4. Effets cumulatifs « de la dose »  
Relation dose-fluence-energie
- 5. Cas des particules massives (hadrons et leptons) chargées ou non  
Effets ionisants et d'endommagement des électrons, neutrons et protons
- 6. Comment faire ?  
Référentiels de connaissance issus d'autres communautés  
(spatial, avionique, informatique, médical, etc)

# Collision des particules avec les noyaux

- **Basse énergie: collisions avec les noyaux**
- **Responsable des effets de déplacements**
- **Concerne les ions en fin de parcours**
  
- **Essentiellement causés par les particules ayant une masse**
- **lons > protons > électrons**

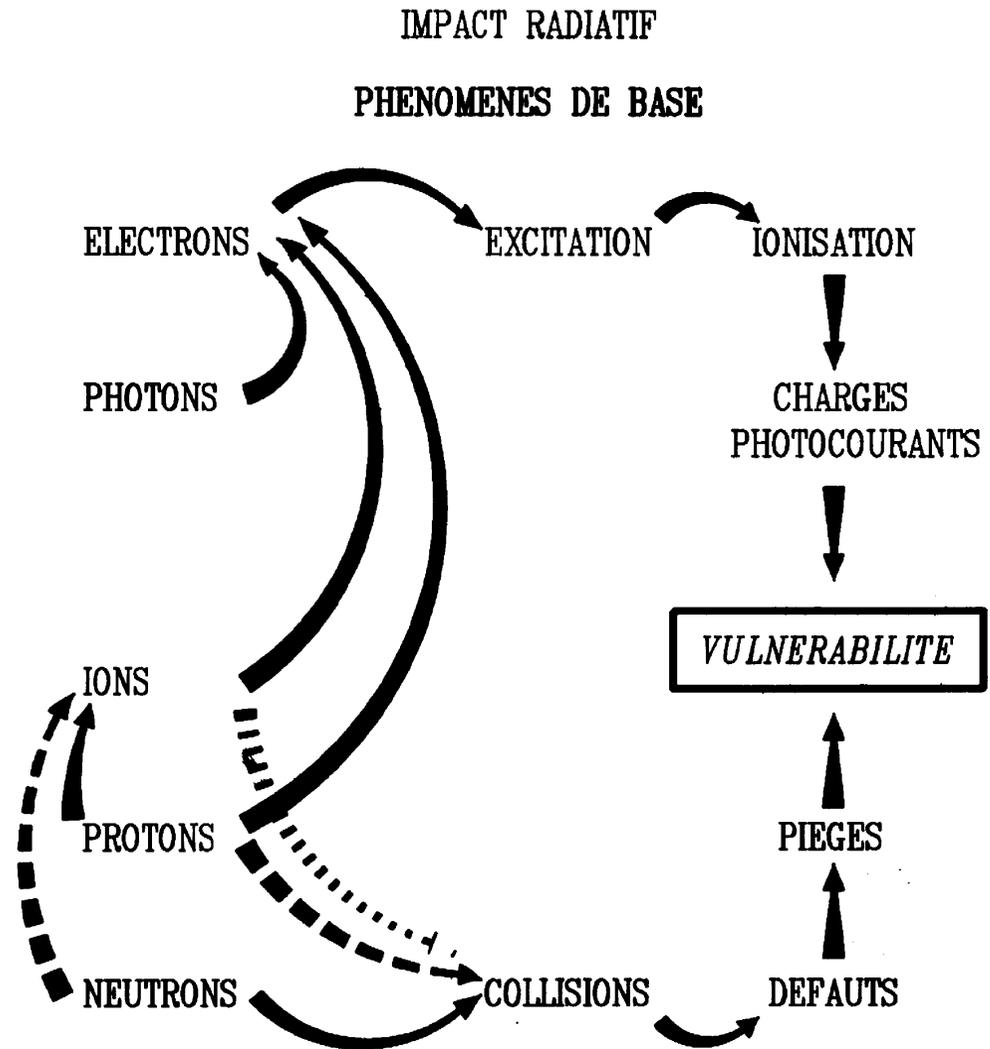
# Cascades de phénomènes

## Deux voies :

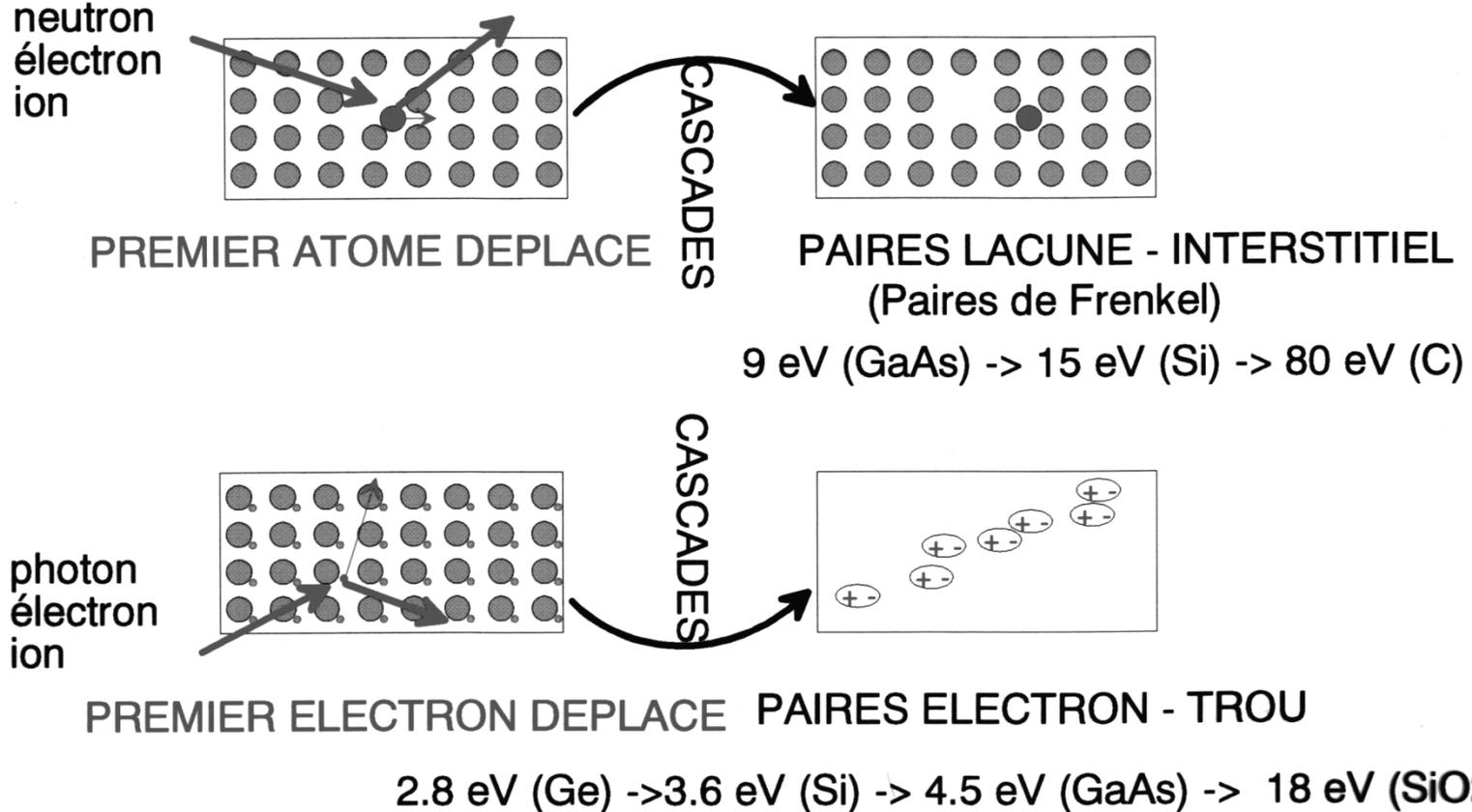
Il y a deux voies  
d'endommagement :

par les charges et courants  
(effets ionisants)

ou par les atomes déplacés  
(effets d'endommagement)



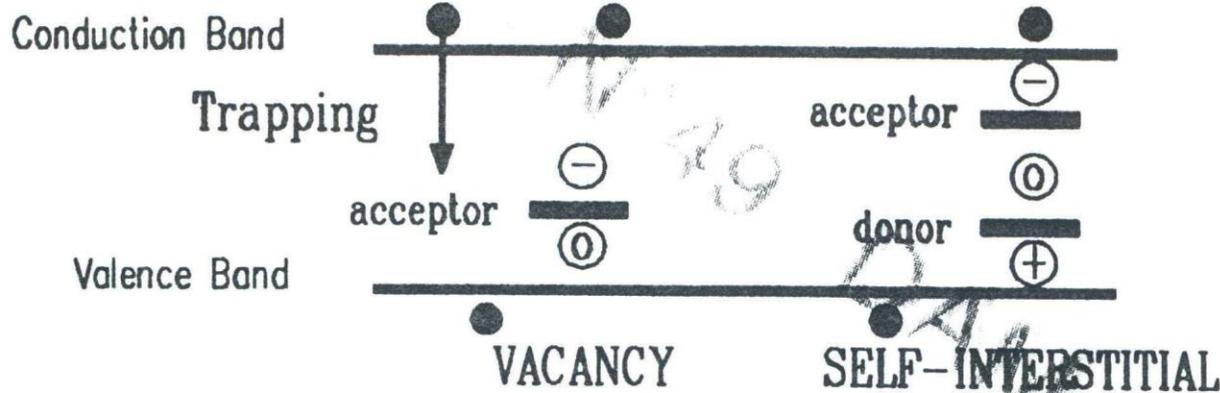
# INTERACTION RAYONNEMENT - MATIERE



**Interactions finales : ionisation (collision avec les électrons)  
et endommagement (collision avec les noyaux atomiques)**

# Autres effets : sur la mobilité $\mu$ , sur la quantité de porteurs $n$

## BASIC FORMULAS



*Trapping and Recombination Effects*

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau} \cdot \phi$$

*Fermi Level Displacement  
(Carrier Removal Rate)*

$$n(\phi) = N_d - \text{Arr} \cdot \phi$$

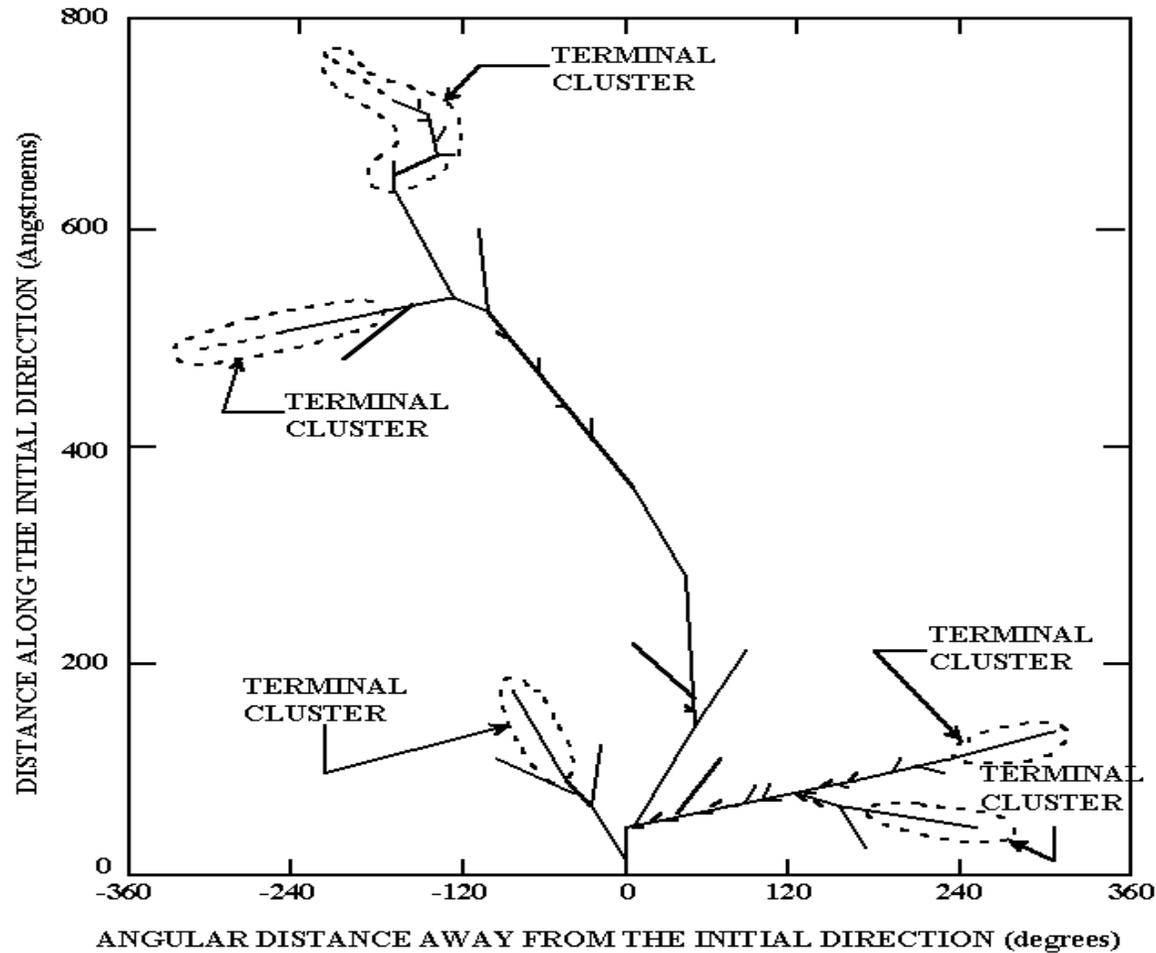
or :  $n(\phi) = n_0 \cdot \exp -\phi/k$

*Scattering Effect*

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} + K_{\mu} \cdot \phi$$

## EXAMPLE OF NEUTRON DAMAGE BY ELASTIC DIFFUSION

### Recoil atom tracks terminating in clusters



## RANGE OF INTEREST

*Trapping and Recombination Effects*      1E10–1E15 n/cm<sup>2</sup>

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau} \cdot \phi$$

*Fermi Level Displacement  
(Carrier Removal Rate)*

1E14–1E15 n/cm<sup>2</sup>

$$n(\phi) = N_d - A_{rr} \cdot \phi$$

or :  $n(\phi) = n_0 \cdot \exp -\phi/k$

*Scattering Effect*

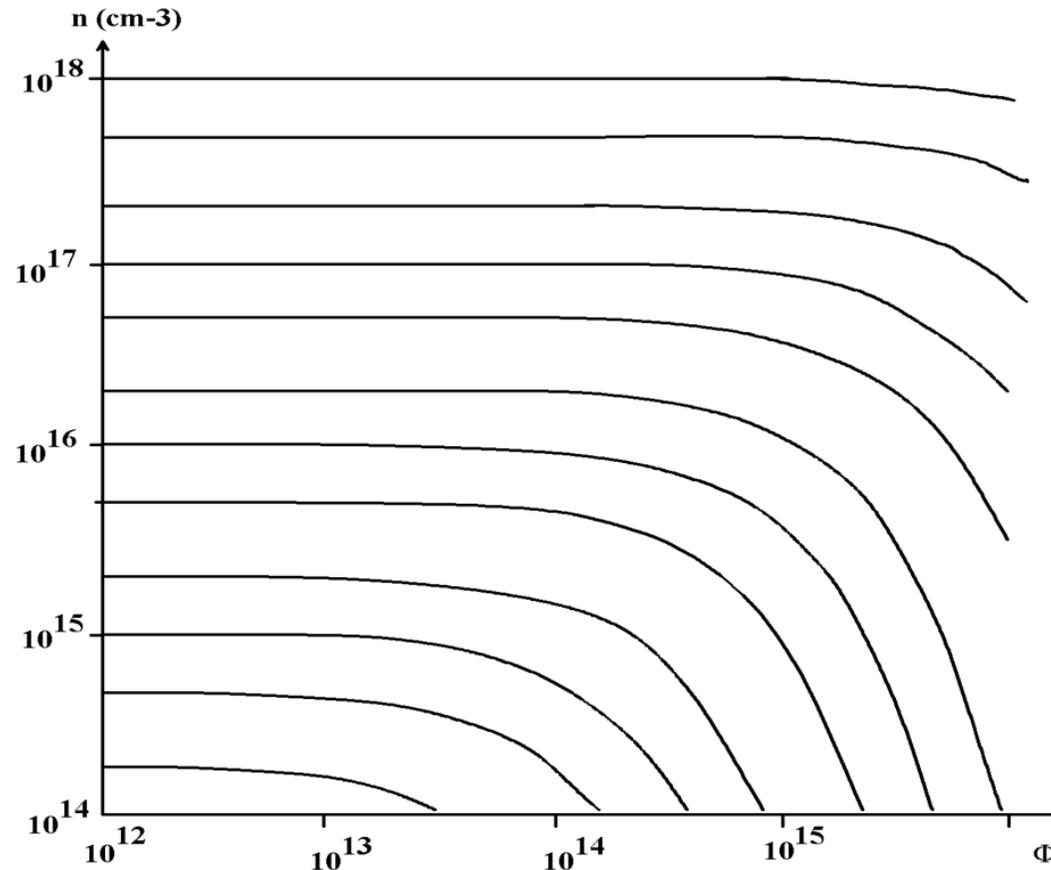
1E15–1E16 n/cm<sup>2</sup>

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} + K_{\mu} \cdot \phi$$

2<sup>nd</sup> effect: decrease of effective majority carrier's concentration:

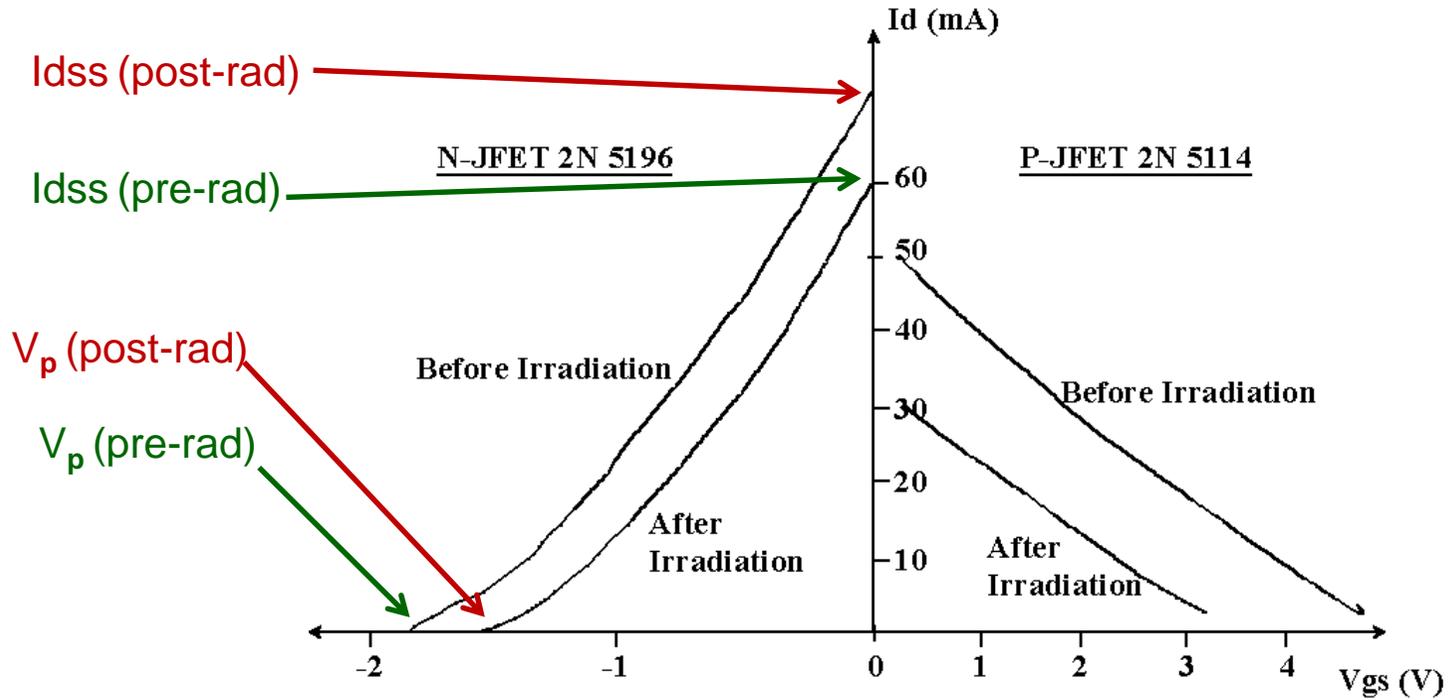
- “Carrier Removal” effect :  $n = n_0 \exp(-2\Phi/k)$

Example in N-type silicon:



$\Phi$  is the neutron fluency;  $n$  is the majority carrier's concentration

# (JFETs)



# Le transistor bipolaire PNP ou NPN

- Relation fondamentale

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = K_{\tau}\Phi$$

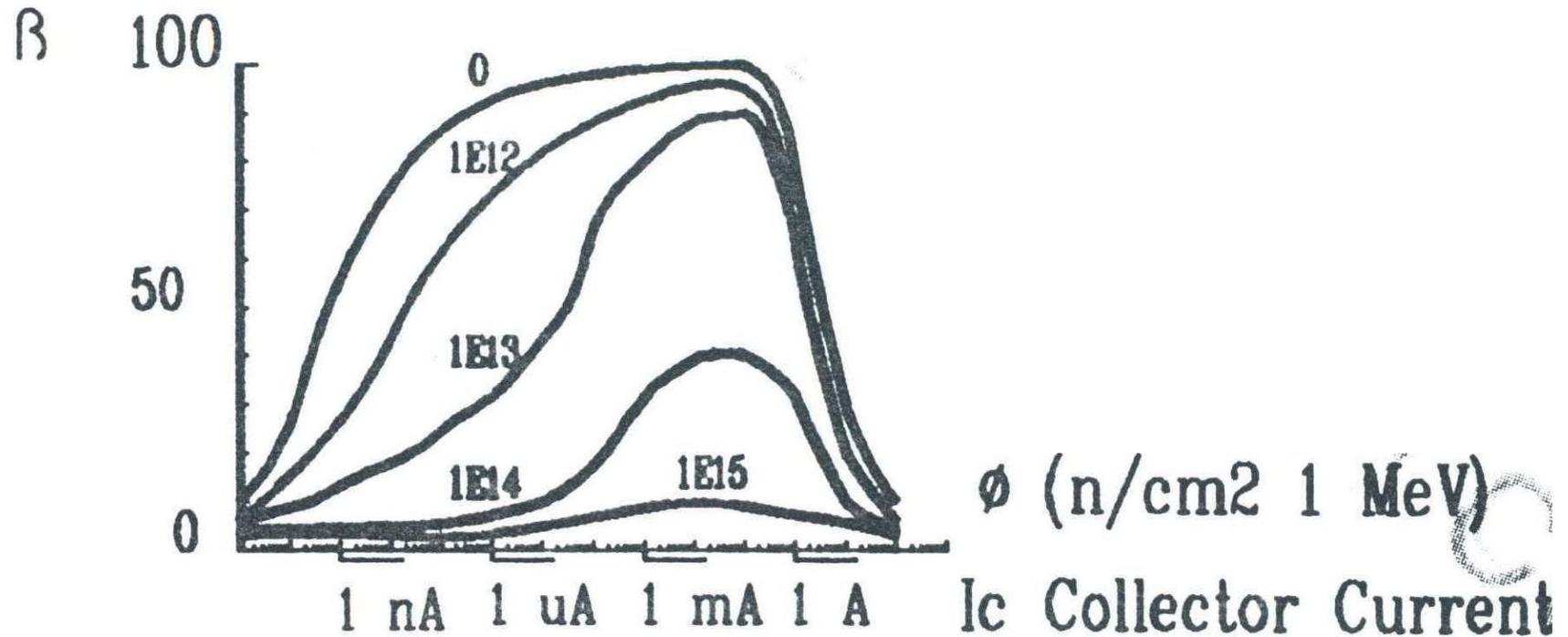
$\Phi$  = fluence neutron

$\tau$  = durée de vie des *porteurs minoritaires*

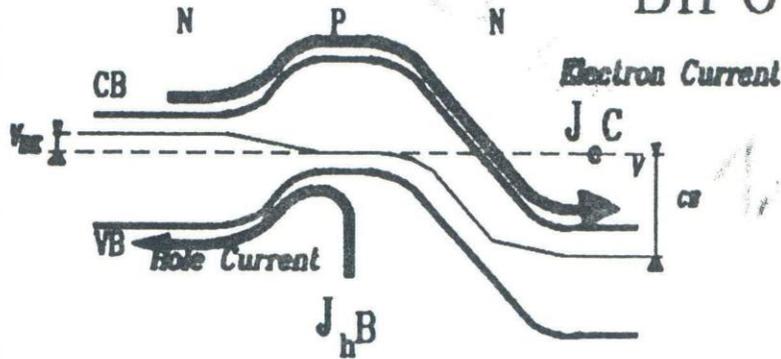
$K_{\tau}$  = constante

# Irradiation par un flux de neutrons de 1 MeV

## GAIN DEGRADATION



# BIPOLAR GAIN



$\Rightarrow$  Diffusion Current in the Neutral Base Region

$$J_e(x) \# \frac{dn}{dx} = \frac{1}{(D\tau)^{1/2}} \cosh \frac{W_B - x}{(D\tau)^{1/2}}$$

$$\beta = \frac{J_{eC}}{J_{hB}} = \frac{J_{eC}}{J_{eE} - J_{eC}} = \frac{1}{1 - J_{eC}/J_{eE}}$$

$$n(x) = n_{E0} \frac{\sinh \frac{W_B - x}{(D\tau)^{1/2}}}{\sinh \frac{W_B}{(D\tau)^{1/2}}}$$

$$J_{eC}/J_{eE} = \frac{1}{\cosh \frac{W_B}{(D\tau)^{1/2}}} \# 1 - \frac{W_B^2}{2(D\tau)}$$

THEREFORE :

$$\frac{1}{\beta} \# W_{base}^2 / (D\tau) \# (W_{base}/L_{diff})^2$$

# FIRST CONSEQUENCE

Bipolar Gain Degradation Modelling

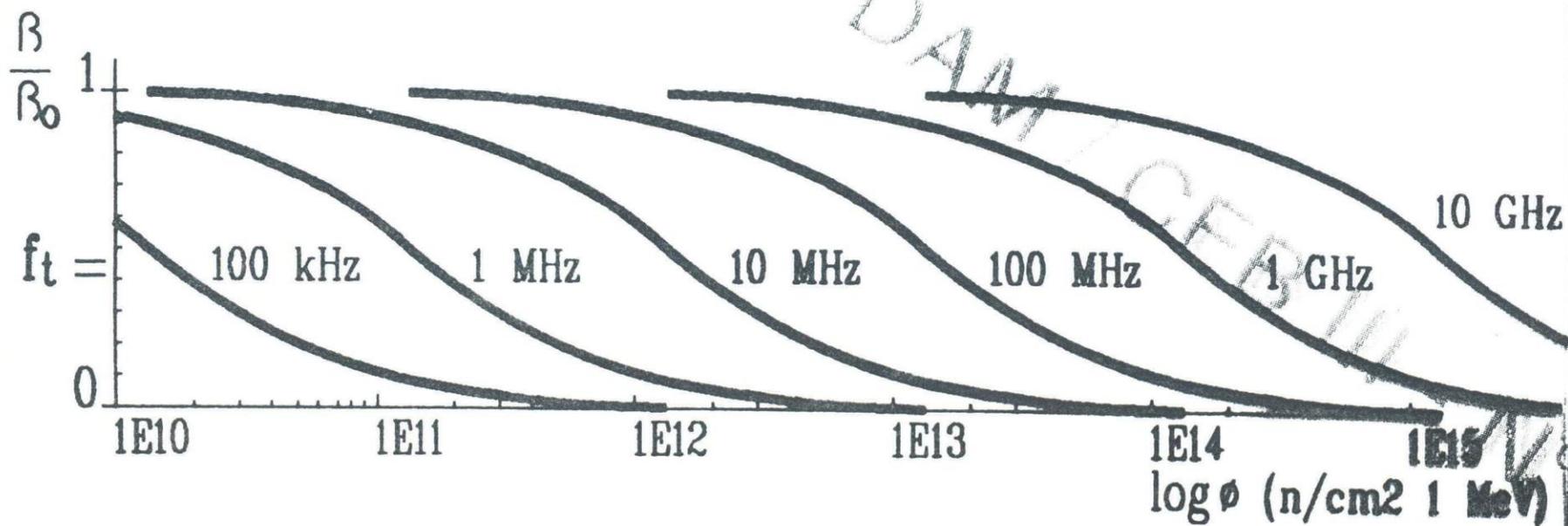
$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau} \cdot \phi \quad \text{or :} \quad \tau = \frac{\tau_0}{1 + \tau_0 \cdot K_{\tau} \cdot \phi}$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_0} + K_{\beta} \cdot \phi \quad \text{or :} \quad \beta = \frac{\beta_0}{1 + \beta_0 \cdot K_{\beta} \cdot \phi}$$

# THE INFLUENCE OF THE CUT-OFF FREQUENCY

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_0} + \frac{K\tau}{2\pi f t} \cdot \phi$$

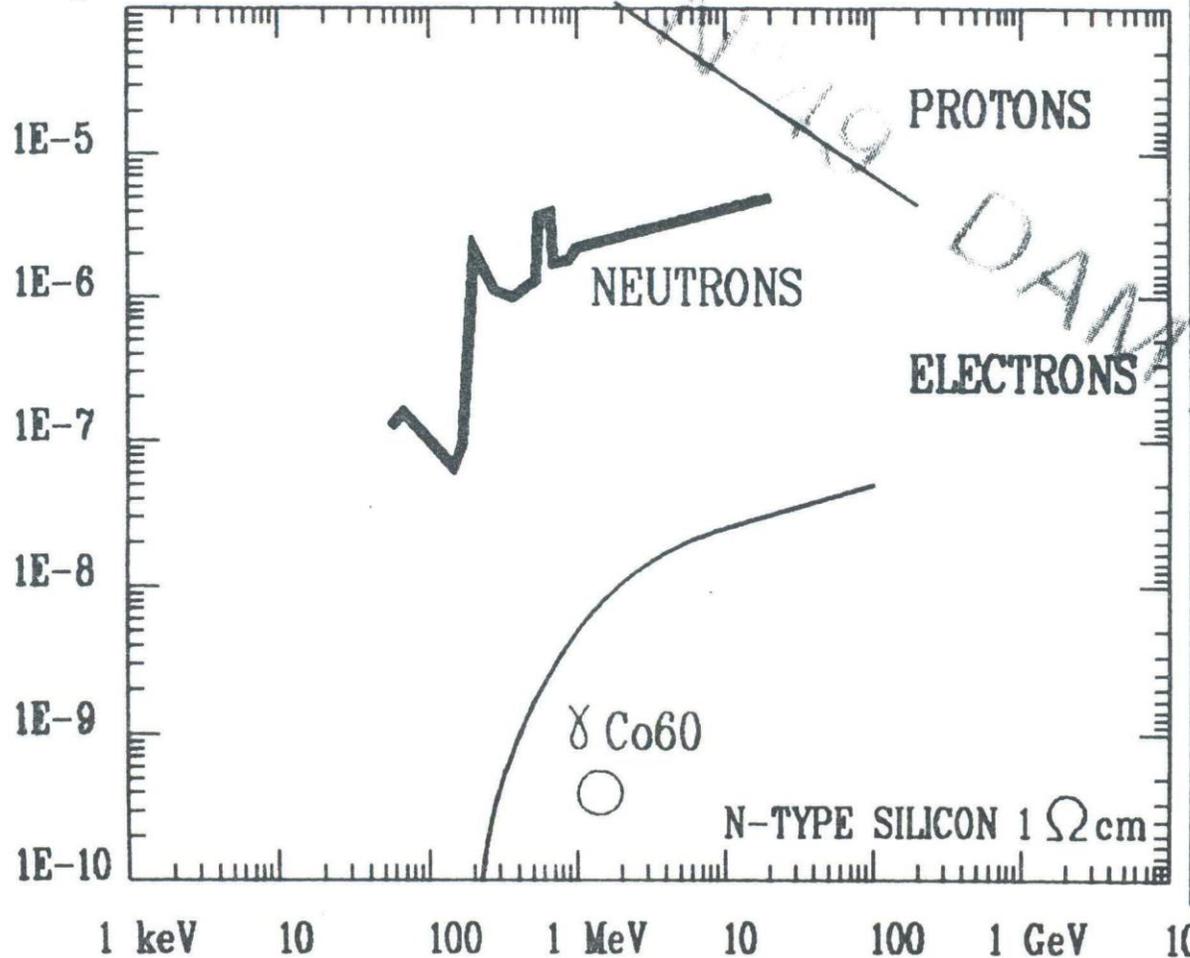
MESSENGER-SPRATT FORMULA



$K\tau = 5E-7$  cm<sup>2</sup>/s (Strong injection : 10 uA/um<sup>2</sup>)       $\beta_0 = 100$

# DISPLACEMENT EFFECTS HIERARCHY

$K_{\tau p}$  (Cm<sup>2</sup>/Second)



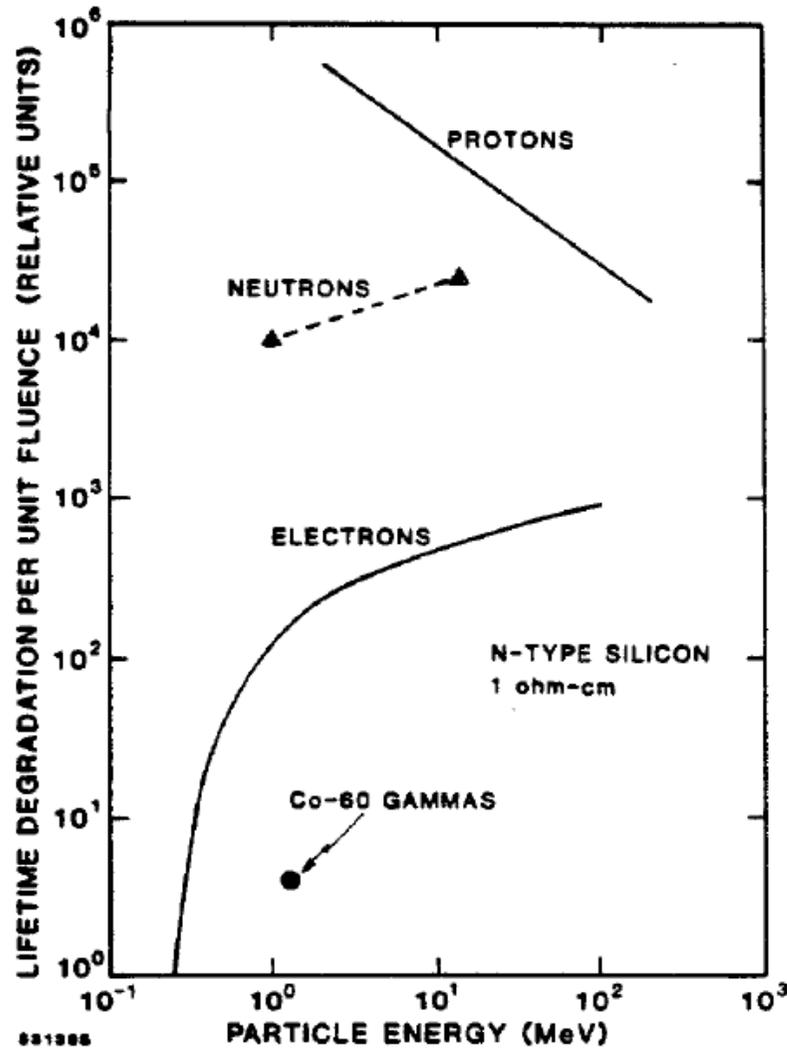
1E10 (Cm<sup>-2</sup>)  
 FLUENCE REQUIRED  
 TO DECREASE  
 LIFETIME  
 FROM 10 TO 9  
 MICROSECONDS

Minority Carrier  
 Lifetime  
 Reduction

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau}$$

curves from Curtis66, Srour83

Pour une énergie donnée, plus la particule est massive, plus elle transfère d'énergie et plus  $K\tau$  est grand



# La constante $K_\beta$ est liée à la fréquence d'amplification maximale du transistor ( $f_t$ )

## BIPOLAR HARDENING THROUGH TRANSISTOR DESIGN

### MESSENGER-SPRATT FORMULA (1958)

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_0} + K_\beta \cdot \phi$$

$$\text{With : } K_\beta = \frac{K_\tau}{2\pi f_t}$$

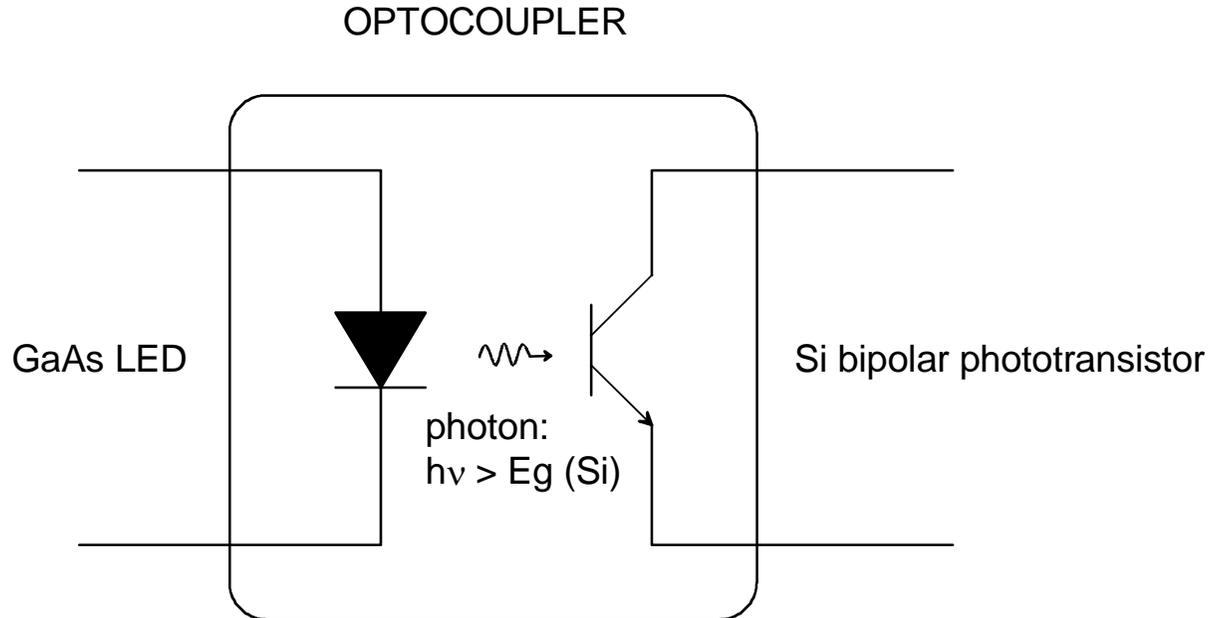
Connects  $K_\beta$   
and  
the Unity-Gain  
Frequency  $f_t$

=> Try to Increase  $f_t$   
or Decrease  $K_\tau$

Note that  $K_\beta \approx \frac{1E-7 \text{ to } 1E-5}{f_t (\text{MHz})}$

and  $f_t = 10 \text{ MHz to } 10 \text{ GHz}$

# OPTOCOUPPLERS



## Neutron-induced damages:

- Decrease in bipolar current gain  $\beta$ ;
- Attenuation of light in the medium between the LED and the bipolar transistor;
- Decrease of LED light emission due to non-radiative recombination

=> **Decrease of the current transfer ratio.**

# Sommaire

- 1. Les radiations sont partout ! Flux vs. Fluence
- 2. Effets « singuliers » à une particule et Effects « cumulatifs » à plus grandes fluences.
- 3. Effets électriques « singuliers ».  
Courbe de la probabilité fonction du LET de la particule
- 4. Effets cumulatifs « de la dose »  
Relation dose-fluence-energie
- 5. Cas des particules massives (hadrons et leptons) chargées ou non  
Effets ionisants et d'endommagement des électrons, neutrons et protons
- 6. Comment faire ?  
Référentiels de connaissance issus d'autres communautés  
(spatial, avionique, informatique, médical, etc)

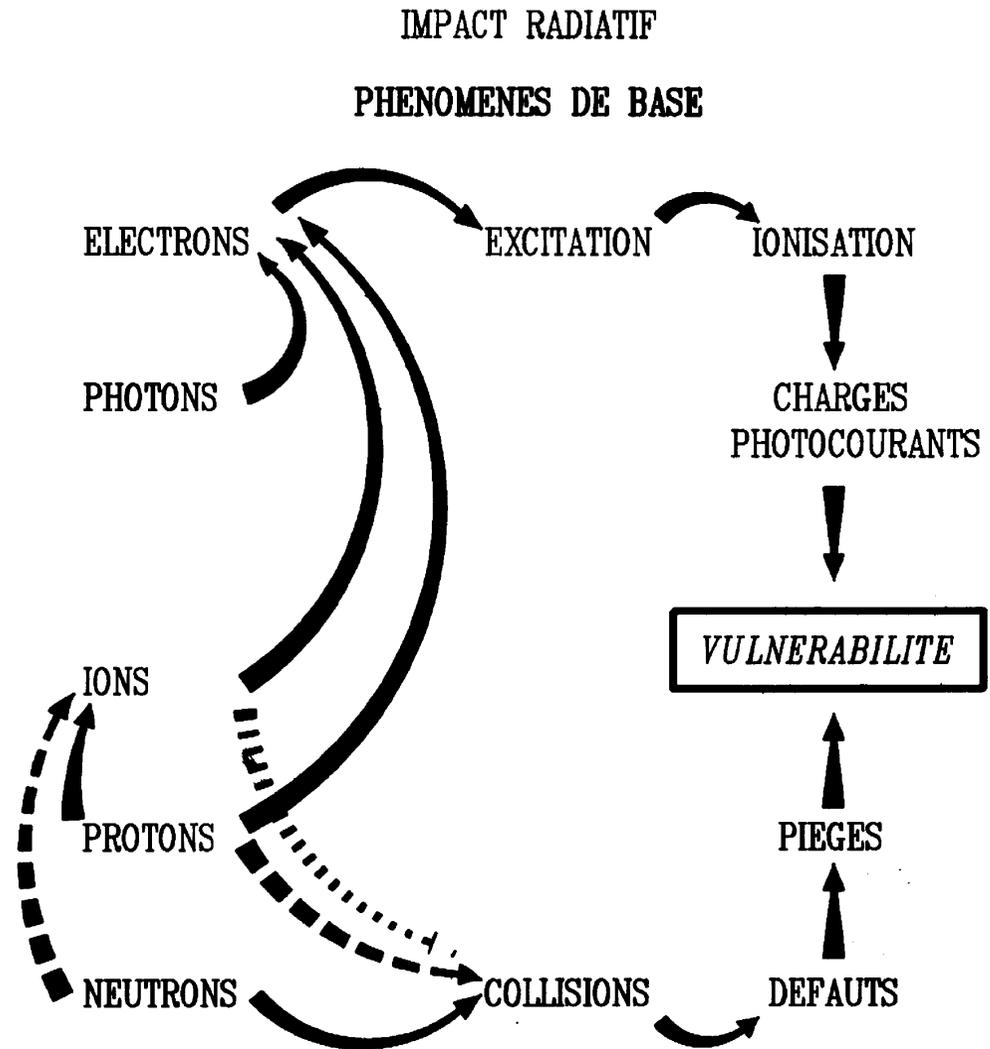
# Cascades de phénomènes

## Deux voies :

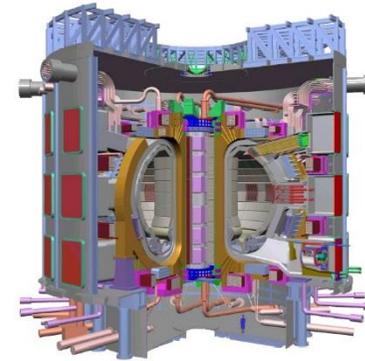
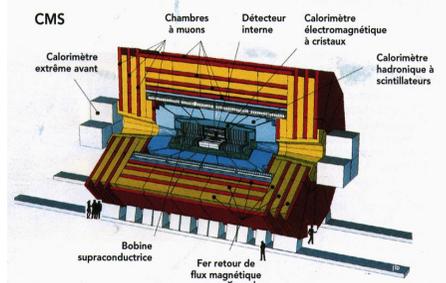
Il y a deux voies  
d'endommagement :

par les charges et courants  
(effets ionisants)

ou par les atomes déplacés  
(effets d'endommagement)



# Une alternative au blindage ? LA RELOCALISATION



- **LHC : Impossible sur les détecteurs**

Possible dans le tunnel de l'accélérateur (« relocation » des Alim des aimants supra, dans des alvéoles)

- **Possible à l'intérieur d'un satellite, dans une certaine mesure**

Profiter du blindage naturel

- **Impossible dans un avion !**

- **Possible sur Iter**

– dans le Iter Building, si pris suffisamment tôt dans le projet – travaux en cours

- **Centrales Nucléaires**

– compliqué – situation normale vs. accidentelle – température – humidité, etc

**La protection efficace  
par blindage est généralement inapplicable,  
couteuse ou inopérante**

**Le durcissement repose donc sur la "transparence" :**

**il faut admettre d'être traversé par des flux de toutes natures,  
mais il faut en minimiser les effets.**

**C'est le « durcissement »**

- par choix de technologie (Hardening by Technology, HBT)**
- par conception de circuits (Hardening by Design, HBD)**
- par conception du système (HBS)**

**(cartes, sous-systèmes, alvéoles, bâtiment...)**

## Tests et standardisation

Utilisation de trois types de faisceaux :

- $\gamma$  du  $^{60}\text{Co}$  – 1,17 et 1,33 MeV (représentatifs de  $\gamma$  de fission)
- X de la raie L du cuivre – 10 keV (facile à utiliser en laboratoire)
- Protons de 63 MeV (représentatifs de la ceinture de protons dans l'espace)

# TID – Total Dose Testing

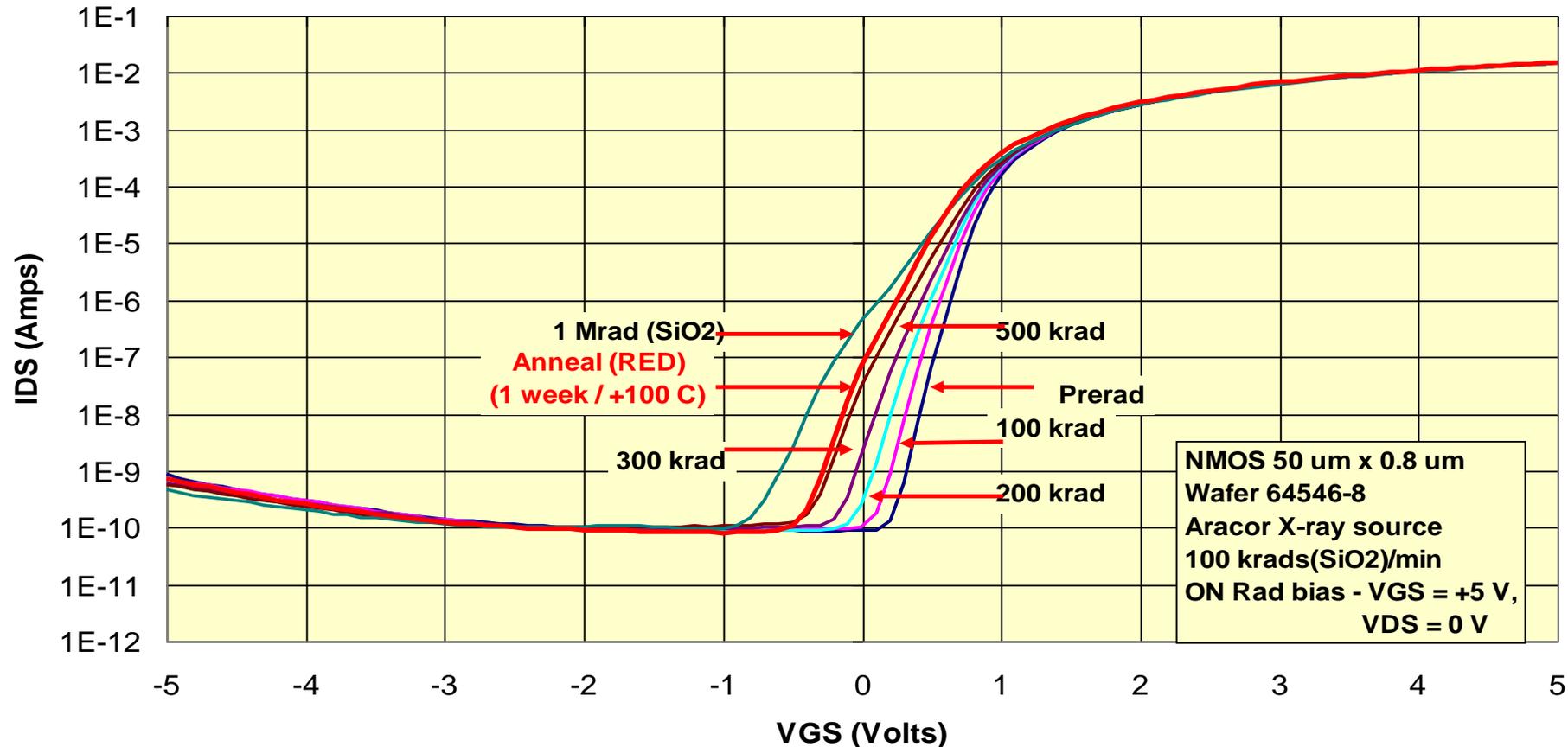
- **Three primary total dose test approaches – proton fluence, Cobalt 60 and X-ray sources**
- **1 MeV (Cobalt 60) gamma ray**
  - High range, lidded parts can be used
  - Damage to silicon and SiO<sub>2</sub> identical
  - Dose rates up to 100 krad(Si)/hr depending on age of source and position
- **60 MeV protons**
  - Best technique to simulate space environment
  - $\sim 7 \times 10^{12}$  protons/cm<sup>2</sup> equivalent to 1 Mrad(Si)
- **10 keV X-ray**
  - Convenient – wafer level test capability, small footprint
  - Limited X-ray range – need delidded parts and no probes over device
  - Can do up to 100 krad(SiO<sub>2</sub>)/min
  - X-ray energy absorption is 1.8X less in oxide than in silicon, so need to use units of rad(SiO<sub>2</sub>) to best correlate with Cobalt 60 data

# Attention aux tests TID !

## TID – Effets de “guérison” (anneal) partielle post-rad

### Difficile à maîtriser

### Se référer aux standards de test US-MIL-STD, ASTM et ESA



# Applicable Standards

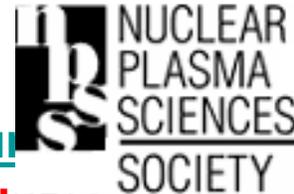
- **MIL-Std 883, Method 1019, DoD, USA and Web pages.**
- **ASTM F-1892, USA and Web pages.**
- **ESA/SCC Basic Specifications, Method 22900, and <http://www.estec.esa.nl>.**
- **IEEE Std 1156.4-1997. “IEEE Standard for environmental specifications for spaceborne computer modules”, The IEEE Computer Society, Bus Architecture Standards Committee. ISBN 1-55937-911-1, published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47<sup>th</sup> Street, New York, NY 10017, USA.**

# Contexte et ressources bibliographiques dans le domaine

Resources utiles pour ce cours et vos recherches

- IEEE Transactions on Nuclear Science

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?pu>



IEEE Transactions on Nuclear Science was the number one journal in science and technology in 2002,

All aspects of the theory and application of nuclear science and engineering including instrumentation, high-energy physics, reactor controls, effects.



## Conferences et proceedings (surtout spatial)

USA <http://www.nsrec.com> 400 à 600 personnes – à Paris, 14-18 juillet 2014

Les Short courses depuis 1980 : plus de 10 000 pages sur un seul DVD à commander à l'IEEE (site Web)

Europe : RADECS European Conference <http://www.radecs.net> 300 à 400 personnes

- Objectives: Promote basic and applied science and more specifically research in the field of radiation and its effects on materials, components and systems - Relevant industries: space, civil nuclear and military applications
- Scientific activities: Holding e

<http://www.ANIMMA.com> Marseille, Lisbonne,

France : RADSOL (GDR CNRS ERRATA) voir site web depuis 2008 – consacré aux effets des neutrons

Très bon site : <http://radhome.gsfc.nasa.gov/>

# Exemple de données publiées (NASA/JPL website)

TABLE I. SUMMARY OF RECENT TID/DD TEST RESULTS AT THE JET PROPULSION LABORATORY (CONT'D.)

Part Type	Description	Tech.	Mfr.*	Date Code	Sample Size	Dose Rate (rad/s)	Bias During Exposure	Failure Parameter	Spec. Limit	Pre-Rad Value	Av. Dose/Fluence to Parm. Failure	Av. Dose/Fluence to Func. Failure	Comments
IRFMG40	MOSFET, 1000V	N-channel	Int. Rect.	0032	8	25 (HDR)	Gate or drain biased	BVds, IDSS, & VG(th)	various		~14 krad	>16 krad	Usable to ~16 krad with some parameter derating @ high/low temperatures
LF2802A	MOSFET, RF	N-channel	M/A-Com	01F15	6	50 (HDR)	Various biases	VG(th)	various		5 krad	5-10 krad	Usable to >5 krad with VG(th) derating
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	50 (HDR)	Biased	VOS	2 mV		5 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	50 (HDR)	Unbiased	VOS	2 mV		5 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	0.01 (LDR)	Biased	IB+	50 nA		3-4 krad	>30 krad	Scotland foundry
LM124A	Op amp, quad	Bipolar	National	H0D0110 B	3	0.01 (LDR)	Unbiased	IB+	50 nA		3-4 krad	>30 krad	Scotland foundry
LT1006A	Op Amp	Bipolar	Lin. Tech.	9626A	5 per group	HDR & LDR	Biased & Unbiased	VOS	180 μV	<50 μV	12 krad (LDR, biased)	10-15 krad (HDR, biased)	Generally OK to 10 krad; RLAT recommended
LTC1157CS8	MOSFET driver	CMOS	Lin. Tech.	819	5	25 (HDR)	Biased	Voh, Icel	--	--	3 krad		OK to 2.5 krad
LTC1604AIG	A/D converter, 16-bit	CMOS	Lin. Tech.		4	25 (HDR)	Biased	Bipolar Gain Error					Bipolar gain error slightly out of specification at 100 krad
MAX306EW1	Multiplexer, 16-channel	CMOS	Maxim	0143	3	25 (HDR)	Biased	Functional	--	--	--	<1 krad	Address lines high
MAX306EW1	Multiplexer, 16-channel	CMOS	Maxim	0143	4	0.01 (LDR)	Biased (see comment)	ID(on)	300 nA	20 nA	3 krad	5 krad	Address lines cycled continuously
MAX539	D/A Converter, 12-bit	CMOS	Maxim	GF008	4	25 (HDR)	Biased, clocked	Linearity, supply currents			>10 krad	<20 krad	Minor parametric changes within spec. at 10 krad
OPA687N	Op Amp, wide-band	Bipolar, very high speed, complementary	Tex. Instr. (Burr Brown)	0231	5 per group	0.01 (LDR)	Biased & Unbiased	No significant changes after 30 krad	--		>30 krad	>30 krad	
PSS-QP50-6-SM	Quadrant photo-diode (Si)	Si diode	Pacific Silicon Sensor	0123	8	Protons	Unbiased	Responsivity		1 mA	2.4E11 p/cm <sup>2</sup> [-40 krad(Si)]		Responsivity degraded ~20% @ 1 krad, & ~50% @ 15 krad.
UC1717J (5962-9474601MEA)	Stepper-motor driver	Bipolar IC	Tex. Instr. (Unitrode)	0144A	5 & 4	0.01 (LDR)	5 Biased, 4 Unbiased	Comparator threshold voltage	--	--	--	~16 krad	

# ANNEXE (2)

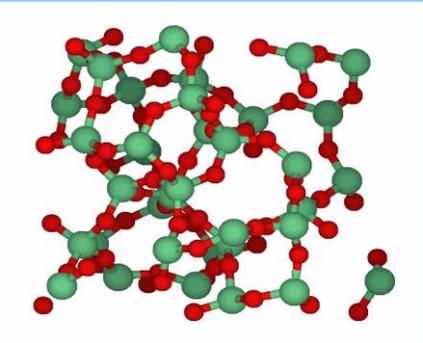
**Les besoins en fibres optiques (F.O.) et verres durcis sont grandissants pour les grands instruments scientifiques**

# Effets d'une irradiation sur les propriétés des F.O.

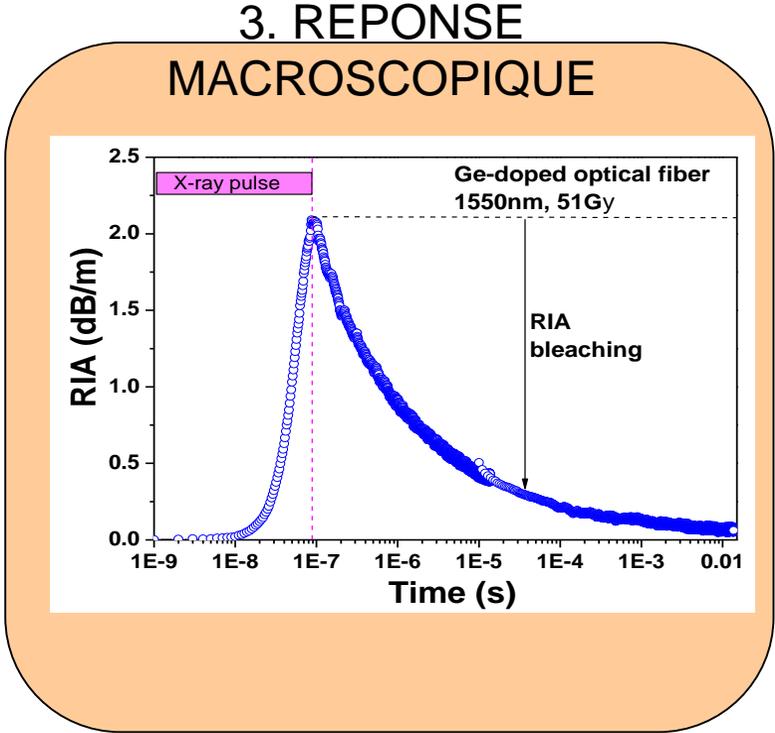
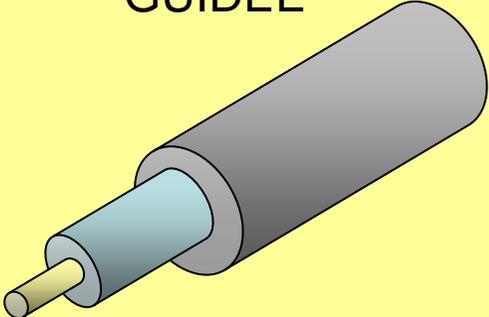
Mécanismes à plusieurs échelles

Pr Sylvain Girard, université de Saint-Etienne

1. INTERACTION RAYONNEMENT - MATIERE



2. OPTIQUE GUIDEE



□ Caractérisation et identification des mécanismes de dégradation / Prédiction par la simulation (1 & 2)

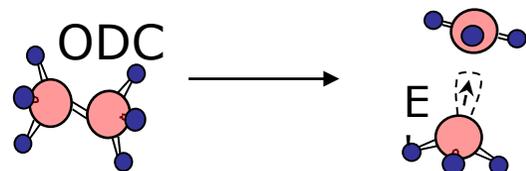
# Etude de la fibre / Mécanismes d'effet de la dose

## Analogies avec la lacune d'oxygène dans les transistors MOS

### Transformation de défaut

Simulation

Mécanismes de génération des E' à partir des ODC



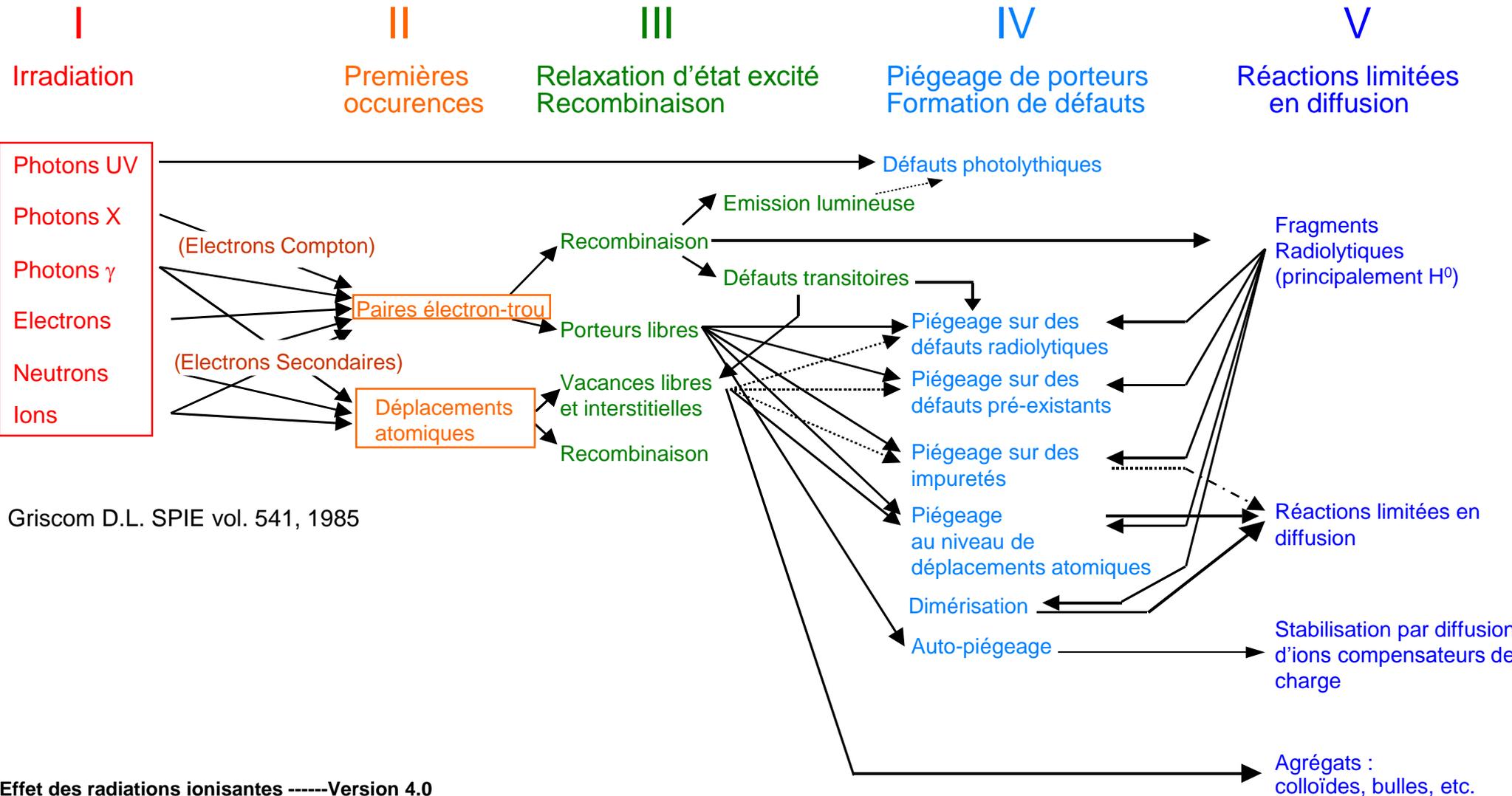
	Structure*	name	% of cases
Si#1		Dimer	80
Si#2		Puckered 4	10
Si#3		Puckered 5	10
Ge#1		Dimer	42
Ge#2		Puckered 4	17
Ge#3		Puckered 5	19
Ge#4		Divalent-Ge	22

Paramagnetic germanium-related centers induced by energetic radiation in optical fibers and preforms, Origlio G, Girard S, Cannas M, et al., JOURNAL OF NON-CRYSTALLINE SOLIDS 355, 18-21, pp 1054-1056, JUL 1 2009 and NIM B, 2008, IEEE Trans Nucl. Science, dec 2008  
Sylvain Girard, Nicolas Richard, Jean Bisutti, CEA

# Physique et technologie des composants

## Mécanismes dans mes matériaux semiconducteurs et isolants

### Modélisations



Griscom D.L. SPIE vol. 541, 1985

**Points de contacts possibles en France et pays limitrophes  
Electronique et capteurs “durcis”, spatial, nucléaire, transports et de la physique  
pour des stages, theses, candidatures..**

**Ingénieurs-Chercheurs et Enseignants-Chercheurs du domaine publiant  
dans les revues**

**Voir les sites web de leurs publications :**

- **IEEE Transactions on Nucl Science,**
- **Nuclear Instruments and Methods NIM-A**

**Agences**

**CNES, F**

**ESA, NL**

**CERN**

**Iter Organization, F**

**Universités**

**Aix-Marseille Université, F**

**Université de Montpellier, F**

**Bordeaux Université, F**

**Padova Université, Italie**

**Organismes de  
Recherche**

**CEA, F**

**SCK-CEN, B**

**ONERA, F**

**IN2P3-CNRS, F**

**Industries**

**EADS, F**

**THALES Alenia Space, F**

**TRAD Test et Radiations, F**

**Etc...**

# Autre ressource documentaire

## Industrie des Transports Aériens et Terrestres

1. L'avion est maintenant à commande tout-électrique  
(y compris celle du réacteur)

Le besoin de fiabilité est extrême

Les autorités imposent moins de  $10^{-7}$  erreur par heure de vol

(< 1 erreur par 10 millions d'heures de fonctionnement ~ 1000 ans)

Les trains, les véhicules sont également électronisés

Les défaillances d'origine électronique sont intrinsèquement catastrophiques et désastreuses pour l'image de marque

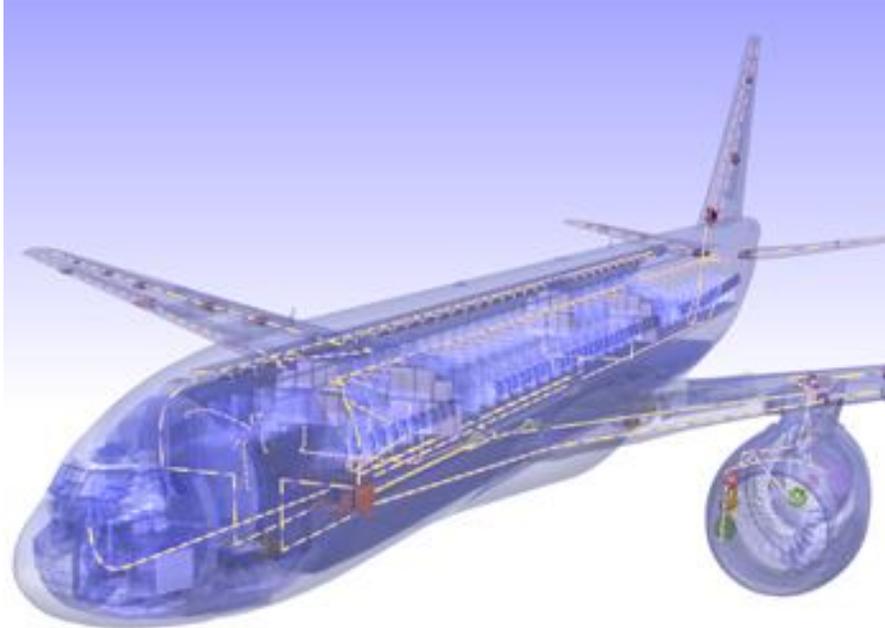
Tous calculs faits, on aboutit aussi à  $10^{-7}$  erreur par heure de conduite

2. Le véhicule électrique (hybride ou autonome) embarque une énergie considérable et des matériaux potentiellement dangereux à l'état métallique (lithium)

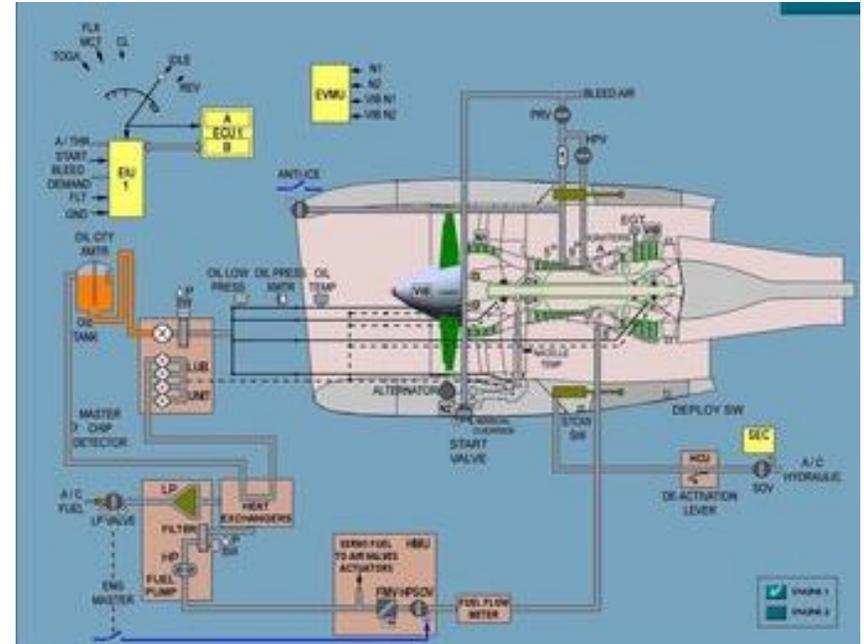
On s'aperçoit dans tous les cas que l'objectif ne peut être atteint que par un Design for Reliability (fiabilité intrinsèque) et en plus de **nombreux capteurs**, surtout là où il y a de l'énergie (turbo réacteur et batteries, par ex Lithium)

**C'est toute la chaîne d'instrumentation, du capteur au calculateur, qui doit être fiabilisée**

# Avionique



Avionneurs



Equipementiers

Au sol : quelques neutrons/cm<sup>2</sup>/heure – en vol : quelques neutrons/cm<sup>2</sup>/seconde

# Contexte et ressources bibliographiques

## Resources utiles pour ce cours et vos recherches

- IEEE Transactions on Nuclear Science

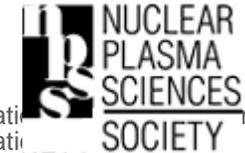
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=23>

IEEE Transactions on Nuclear Science was the number-four journal in nuclear science and technology in 2002, according to the annual Journal Citation Report (2002 edition) published by the Institute for Scientific Information. All aspects of the theory and application of nuclear science and engineering, including instrumentation, high-energy physics, reactor controls, and radiation effects.

- Association RADiations and its Effects on Components and Systems (Europe)

<http://www.radecs.net>

- Objectives: Promote basic and applied science and more specifically research in the field of radiation materials, components and systems - Relevant industries: space, civil nuclear and military applications
- Scientific activities: Holding the RADECS European Conference



Contact : [jean-luc.leray@cea.fr](mailto:jean-luc.leray@cea.fr)

# Commentaires

- Les unités rad(Si) (Système CGS) ou centigray cGy(Si) (Système Légal et Système international) sont les unités de base. Un rad ou un cGy mesurent l'absorption de  $10^{-5}$  Joule par gramme de matériau silicium, quel que soit le type de rayonnement.
- Cette notion est en fait le produit du spectre énergétique du rayonnement par le spectre énergétique des coefficients d'absorption des matériaux. C'est une donnée très globale et très réductrice : elle permet dans une certaine mesure de raisonner sur le résultat de l'exposition à des spectres très différents (X, gamma, neutrons, protons ...) en terme d'effet dans un matériau donné (ici le silicium). On parle d'un composant exposé à 100 kilorad(Si), sans se préoccuper dans un premier temps de la nature (X, gamma...) de l'exposition.
- Comme le composant comporte simultanément des matériaux très divers (Si, SiO<sub>2</sub>, GaAs, AlGaAs, ...), il importe de préciser dans quel matériau constituant est quantifiée l'absorption. On précise donc la partie du composant où a été quantifiée l'absorption : rad(Si), rad(SiO<sub>2</sub>), rad(GaAs). Pour une même exposition, les quantités peuvent varier de 1 à 10 d'un matériau à l'autre. Ces effets de renforcement d'absorption sont des problèmes métrologiques qui relèvent bien sûr de la Dosimétrie, voire de la Microdosimétrie.
- La dose de rayonnement est donc en fait une énergie déposée par unité de volume d'un certain matériau. Dans un semiconducteur ou un isolant, cette énergie est partiellement convertie en charges électriques (électrons et trous positifs). En général, pour les photons X ou gamma, les protons, les alphas, 1/3 de l'énergie est convertie en paires électrons trous, les deux autres tiers en phonons (chaleur) et une petite fraction en défauts du réseau cristallin. Pour le silicium, un rad(Si) génère 4 10<sup>13</sup> paires électron-trous par centimètre-cube.
- Un kilorad(Si) suffit donc à générer autant de charges dans les zones N et P que les atomes dopants (phosphore, bore) eux-mêmes (les niveaux de dopage sont de l'ordre de 10<sup>16</sup> à 10<sup>18</sup> atomes.cm<sup>-3</sup> dans les zones actives). Cette évaluation très schématique fixe l'ordre de grandeur du seuil de sensibilité de la très grande majorité des types de composants électroniques (100 rad(Si) à 10 kilorad(Si)). Au-delà commencent la vulnérabilité et le durcissement, avec tous les aspects technologiques et système qui en résultent.
- Le seuil naturel de perturbation des composants électroniques (au silicium) est de l'ordre du kilorad(Si). Des raisonnements plus élaborés mais complexes permettraient de raffiner cette approche, et de faire correspondre d'autres notions telles que le débit de dose ou le transfert d'énergie des rayons cosmiques.

## Definitions

- **Perte d 'énergie électronique: ionisation IEL**
  - Ionizing Energy Loss (interaction avec les électrons => « rayons delta »)
- **Pertes d 'énergie nucléaires : displacement damage NIEL**
  - Non Ionizing Energy Loss (collisions => noyaux de recul)
- **Mêmes unités de perte d 'énergie:**
  - MeV/mg/cm<sup>2</sup>
  - MeV/μm
  - Dans Si : **1MeV/μm=4.3 MeV/mg/cm<sup>2</sup>**