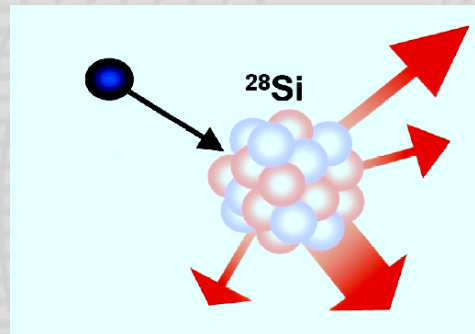


Vulnérabilité des équipements électroniques aux effets singuliers des particules

Effet singulier

- Un effet singulier est induit par une seule particule de type:

- Ion lourd
- Proton
- Neutron
- Alpha

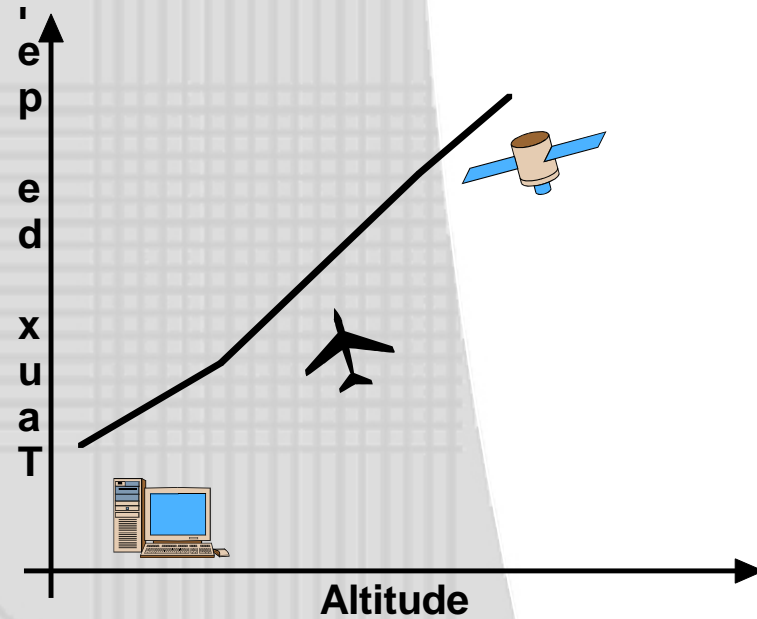


Conséquence d'une collision particule-atome de silicium: libération d'énergie par désintégration de l'atome de silicium

- Un effet singulier se manifeste donc localement mais ses conséquences peuvent s'étendre à l'ensemble d'un système sous la forme:
 - D'une perturbation
 - D'une panne fonctionnelle réversible ou permanente

Agresseurs

- **Hors atmosphère**
 - Ions lourds
 - Protons
- **En altitude**
 - Neutrons atmosphériques
- **Au sol**
 - Neutrons atmosphériques résiduels
- **Dans les équipements**
 - Particules Alpha dues aux boîtiers des composants



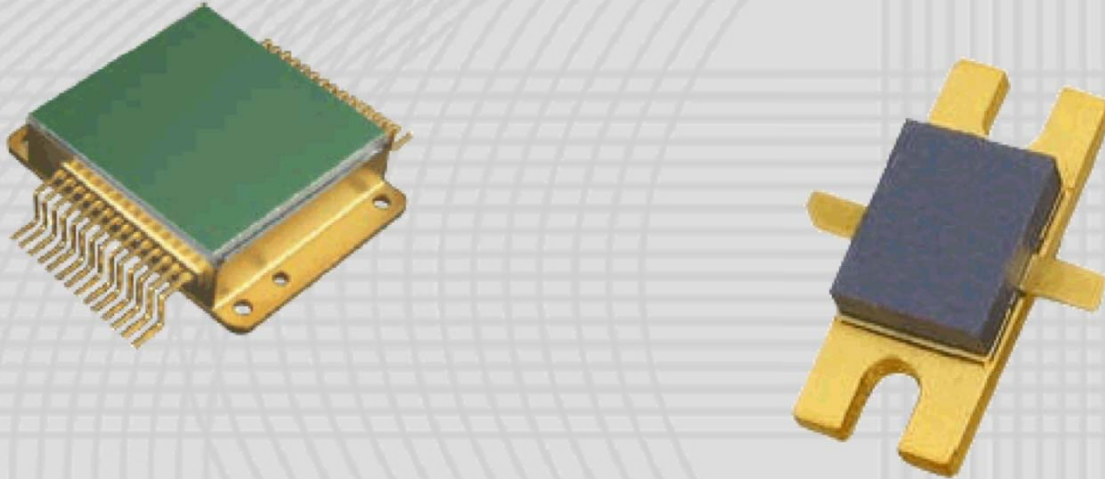
Victimes potentielles ou avérées

- **Hors atmosphère**
 - Satellites
 - Lanceurs et véhicules spatiaux
 - Stations orbitales
 - Sondes
- **En altitude**
 - Vols longs courriers
- **Au sol**
 - Réseaux informatiques et téléphonie (pannes dans les routeurs)
 - Automobile, ferroviaire (destructions d'IGBT dans les commandes de moteurs), etc.

Grandeurs physiques

- **Flux intégral : Φ**
 - Nombre de particules par cm^2
- **Energie cinétique : E**
 - De quelques fractions d'eV au GeV
- **LET (Linear Energy Transfert): dE/dx**
 - Perte d'énergie par unité de parcours (en Mev/cm)
- **Section efficace de SEE : σ**
 - Probabilité de l'effet singulier (cm^2 ou cm^2/bit)
 - Fonction de E , dE/dx mais indépendante de Φ

Effets sur les composants électroniques



Ces effets sont appelés SEE

(Single Event Effects)

Effets sur les composants électroniques

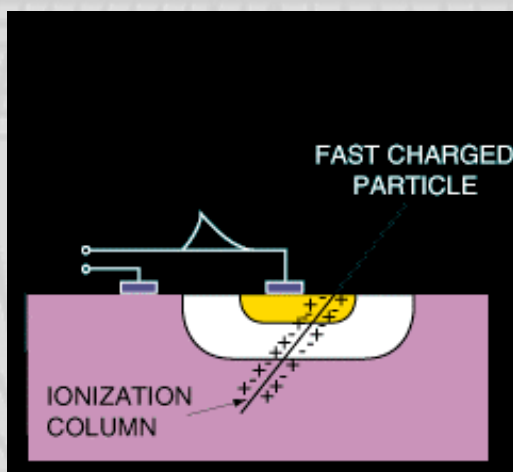
- **Les SEE ont été observés en premier lieu au sein des composants eux-même (pollution des boîtiers céramiques par du Thorium radioactif; années 70) puis dans le domaine des applications spatiales (années 80)**
- **A cette époque les composants électroniques n'étaient sensibles qu'aux effets des particules lourdes et/ou très énergétiques (ions lourds notamment)**
- **Aujourd'hui, la miniaturisation des composants électroniques conduit à rendre ces derniers de plus en plus sensibles aux particules de faible masse tels les protons et les neutrons, ainsi qu'aux particules de basses énergies**

Effets sur les composants électroniques

- **Mécanismes de base**

- Interaction avec les matériaux semiconducteurs

- **Ionisation directe** par les particules chargées (freinage continu dans la matière, notion de LET)



Source *Spacecraft Anomalies due to Radiation Environment in Space* by Lauriente and Vampola

- **Création de paires électrons-trous**

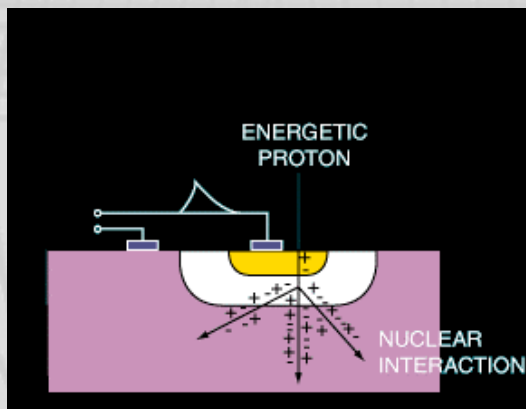
- » quantité de charge Q allant du fC au pC

Effets sur les composants électroniques

- **Mécanismes de base**

- Interaction avec les matériaux semiconducteurs

- **Ionisation par impact** : cas des neutrons et des protons de haute énergie (chocs élastiques et inélastiques)



Source *Spacecraft Anomalies due to Radiation Environment in Space* by Lauriente and Vampola

- **Ionisation par capture** : cas des neutrons de très basse énergie, dits « thermiques »

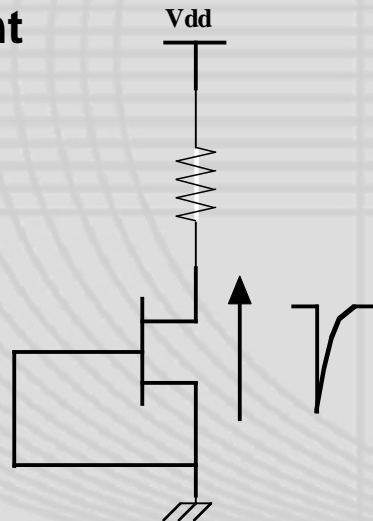
- **Création de paires électrons-trous**

- » **quantité de charge Q allant du fC au pC**

Effets sur les composants électroniques

- **SET (Single Event Transient)**

- La particule incidente induit par ionisation une quantité de charge. Cette charge est collectée par le champ électrique → création d'un **photocourant**

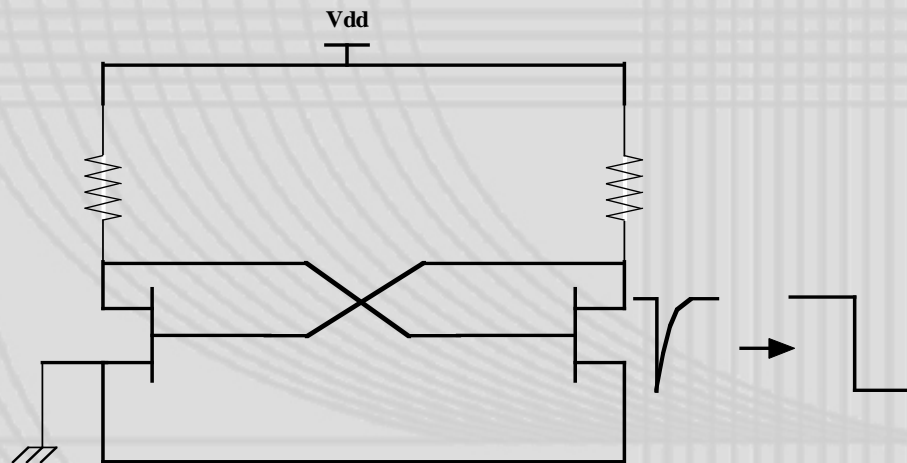


- Conséquence :
 - génération de signaux transitoires indésirables
 - risque de perturbation dans les systèmes numériques et analogiques

Effets sur les composants électroniques

- **SEU (Single Event Upset)**

- Le photocourant crée un changement d'état dans une structure de type "bascule".
 - Se produit lorsque la charge induite par la particule dépasse la quantité nécessaire au changement d'état (qq fC à qq 10 fC)



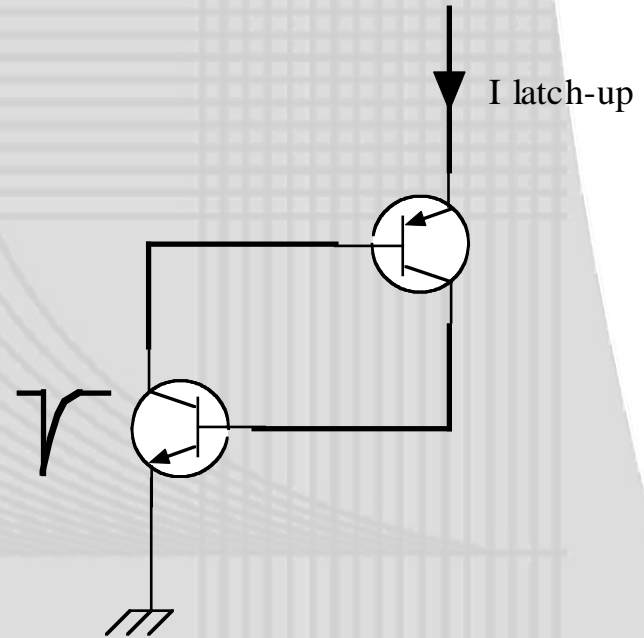
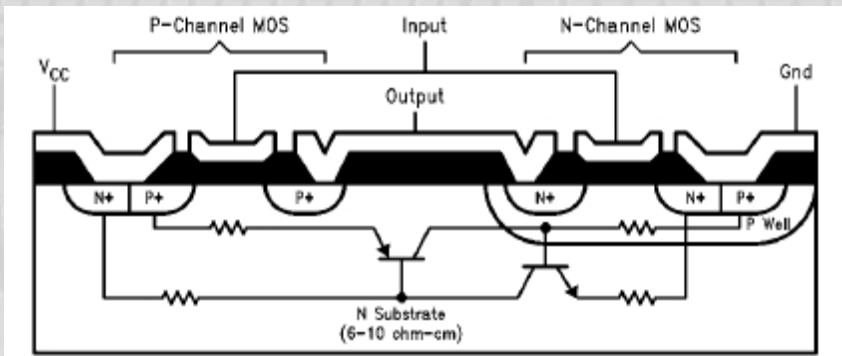
– Conséquence

- génération d'erreurs dans les mémoires SRAM et les circuits numériques séquentiels

Effets sur les composants électroniques

- **SEL (Single Event Latch-up)**

- Le photocourant active une structure PNPN parasite au sein d'un composant en fonctionnement

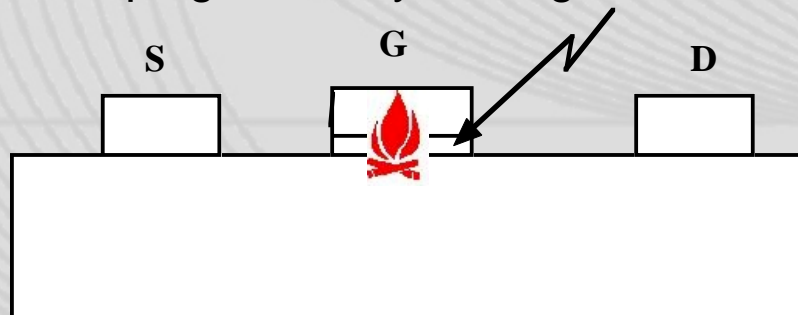


- Conséquence

- verrouillage fonctionnel parfois destructif

Effets sur les composants électroniques

- **SEFI (Single Event Functionnal Interrupt)**
 - L'effet singulier se traduit par le blocage la fonctionnalité du composant en le faisant passer dans des états interdits
 - Concerne notamment les machines d'état des composants numériques
- **SEGR (Single Event Gate Rupture)**
 - Le dépôt de charge conduit à la destruction d'une structure MOS par claquage de l'oxyde de grille



Effets sur les composants électroniques

- **MBU (Multi Bit Upset)**

- La particule unique affecte plusieurs structures voisines de type "bascule" en y induisant des changements d'état
- La probabilité de ce type d'événement singulier :
 - est plus faible que celle du SEU
 - croît avec la miniaturisation de l'électronique (rapprochement des zones actives)
- Conséquence
 - complexification de la problématique de la détection et de la correction d'erreur dans les systèmes numériques

Risque Système

- **Deux notions fondamentales**

- La section efficace σ
 - probabilité de l'effet singulier (cm² ou cm²/bit)
- Le flux intégral Φ
 - nombre de particules par cm²

- **Quantification du risque**

- Le nombre d'effets singuliers est proportionnel soit :
 - à la quantité $\sigma \times \Phi$
 - à la quantité $\sigma \times \Phi \times N$ (N = nombre de bits)

Risque Système

- **Ordre de grandeur pour une application SOL**

- agresseur = neutrons atmosphériques
- **10** composants sensibles par équipement
- Section efficace composant tous SEE confondus:

$$\sigma = 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ (mémoire ou processeur)}$$

- Parc de **10000** équipements



- En moyenne, 2 équipements seront affectés par les SEE à l'échelle de 100 heures de fonctionnement.

Les SEE deviennent donc un facteur important de défiabilisation d'un système

Tendances

- **La miniaturisation des composants**
 - Conduit à l'augmentation des sections efficaces de SEE et donc, à l'accroissement des taux de panne.
 - Complexifie notablement la problématique de la détection et de la correction d'erreur (taux croissant de MBU).
- **La diffusion croissante de l'électronique**
 - Conduit à l'augmentation du nombre de victimes potentielles.

D'où la nécessité de durcir les fonctions électroniques vis-à-vis des effets singuliers des particules de l'environnement radiatif

Durcir les systèmes

- **Durcir les systèmes vis-à-vis des SEE**

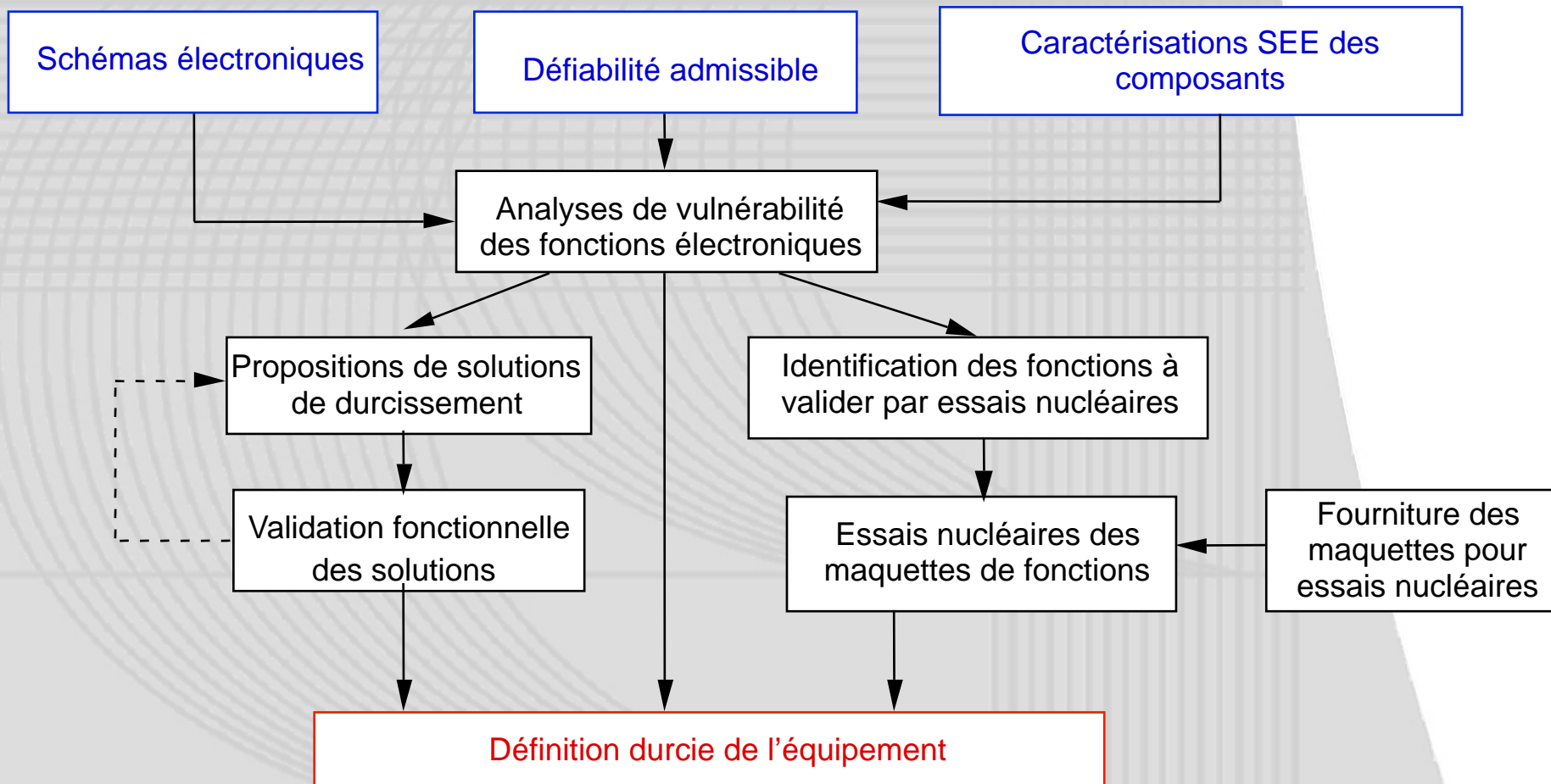
- Les SEE se traduisent par l'apparition d'erreurs et de défaillances venant dégrader la fiabilité du Système
- Durcir un Système consiste alors à garantir une défiabilité maximale pour ces effets

$$P_{\text{défiabilité}} < P_o$$

- Un Système est un ensemble d'équipements
 - Décomposition pondérée de la défiabilité Système sur les équipements

Durcir les systèmes

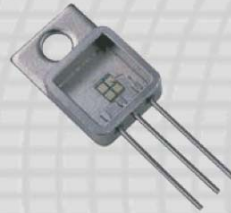
- Durcir un équipement vis-à-vis des SEE



Durcissement

- **Le durcissement au SEE est effectué à 4 niveaux:**

- Niveau Composant



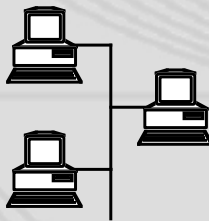
- Niveau Fonction ou Carte électronique



- Niveau Equipement



- Niveau Système



Durcissement

- **Niveau Composant**
 - Choix technologiques
 - Sélection des composants par des tests radiatifs

- **Niveau Fonction ou carte électronique**
 - Choix d'architecture (exemples)
 - processeurs sans cache
 - mémoire de Programme en mémoire PROM
 - ajout de dispositifs de détection et de correction d'erreur (EDAC, TMR etc...) pour les mémoires RAM
 - Choix logiciels → tolérance aux fautes

Durcissement

- **Niveau Equipement**
 - Redondance de fonctions
 - Fonctions de surveillance, de remise à zéro, de scrubbing ou de reprogrammation partielle (FPGA)
 - Blindage

- **Niveau Système**
 - Redondance d'équipements
 - Détection d'une défaillance et reconfiguration du système

Essais sur composants

- **Objectifs**

- Obtention des sections efficaces de SEE
 - utilisées comme données d'entrées lors de l'analyse de vulnérabilité des fonctions électroniques.
 - maîtriser la dispersion en fonction des évolutions technologiques du composant
- La modélisation ne peut remplacer un essai car on ne dispose que très rarement de toutes les données technologiques à temps. Elle peut cependant être utile pour effectuer une présélection

L'essai sur composant est indispensable dans tout processus de durcissement d'un système

Essais sur composants

- **Paramètres mesurés**
 - Transitoires dans les composants numériques et analogiques (SET)
 - ***métrologie d'événements rapides ($T < 1$ ns) nécessitant le recours à des techniques HF large bande***
 - Nombre d'erreurs ou de dysfonctionnements dans les composants numériques (SEU, SEL, SEFI)
 - Taux de destruction (SEL, SEGR)

Essais sur composants

- **Fonctions électroniques testées**
 - Composants identifiés comme contribuant à la défiabilité lors de l'analyse de la conception des matériels

- **Mise en œuvre**
 - Pilotage à distance du composant sous test (risque radiatif)
 - nécessite la conception et réalisation d'électronique de proximité de conditionnement et traitement, elle-même durcie.
 - gestion de la contrainte de propagation des signaux.

Essais sur cartes et équipements

- **Objectif**

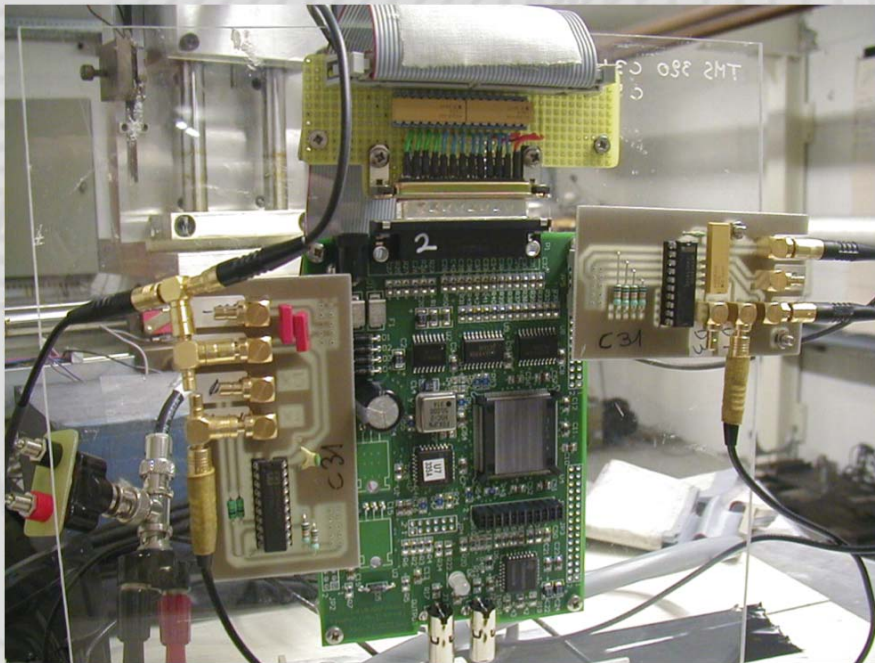
- Valider les solutions de durcissement retenues en vérifiant que la défiabilité est inférieure ou égale à celui attendue

- **Mise en oeuvre**

- Conception et réalisation d'outillages spécifiques pour mise en œuvre et/ou diagnostic complexes et développement de logiciels associés
- Instrumentation à distance
- Mesures en ligne au moyen d'oscilloscopes, de voltmètres, d'analyseurs logiques ou d'espions BUS, etc

Essais

- Exemple de mise en œuvre



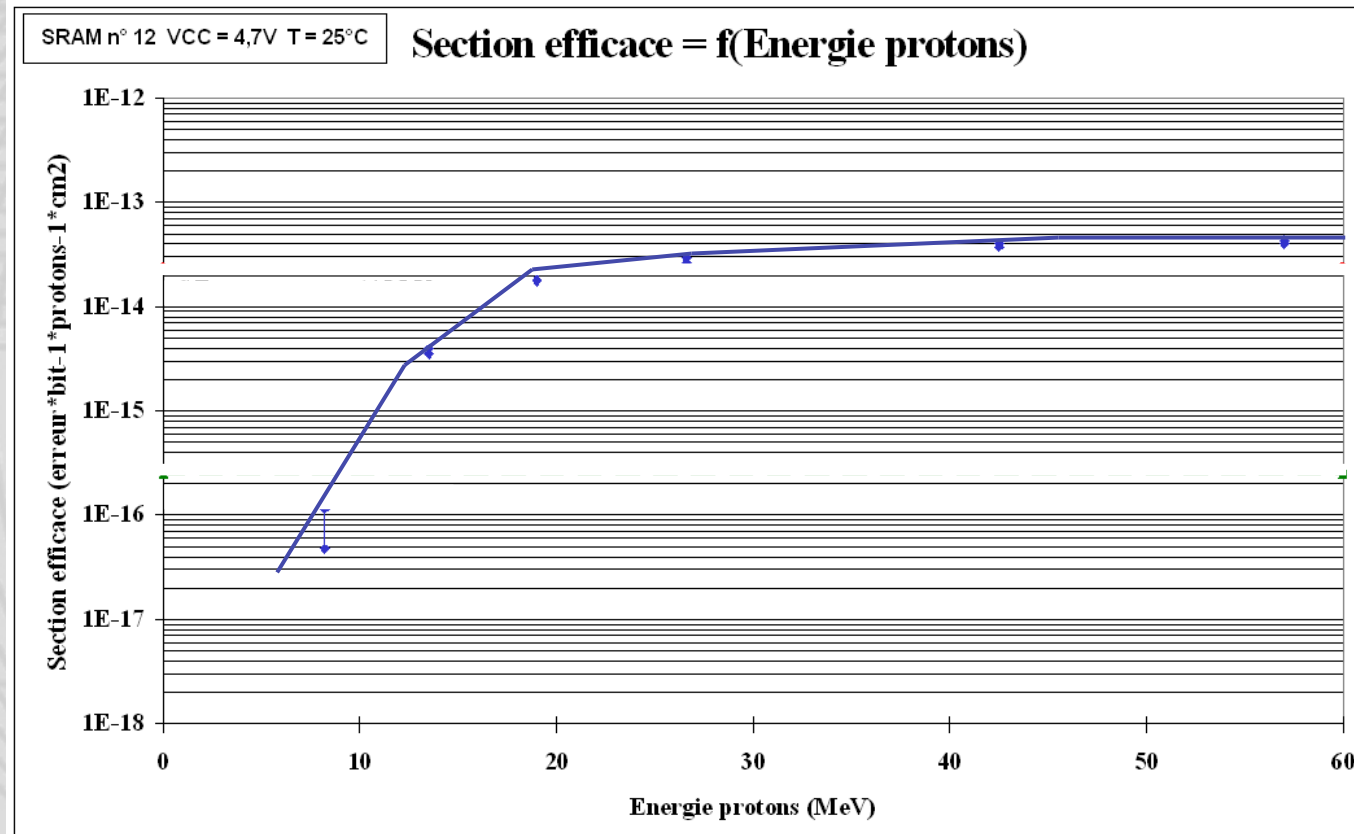
Salle d'irradiation



Salle de mesures

Essais

- Exemple de résultats expérimentaux



Moyens d'essais neutroniques

- **Basse énergie (neutrons de 25 meV)**
 - SACLAY (France); CEA
 - GRENOBLE (France)

- **Atmosphériques (de quelques eV au GeV)**
 - LOS ALAMOS (États-Unis); WNR
 - VANCOUVER (Canada); TRIUMF
 - UPSALLA (Suède); TSL
 - JUNGFRAUJOCH (Suisse),

Moyens d'essais

- **Moyens d'essais protoniques**
 - LOUVAIN LA NEUVE (Belgique); cyclotron
 - ORSAY (France); centre de protonthérapie
 - UPSALLA (Suède); TSL
- **Moyens d'essais "ions lourds"**
 - LOUVAIN LA NEUVE (Belgique); cyclotron
 - ORSAY (France); CNRS
 - UPSALLA (Suède); TSL

Merci pour votre attention