



*Activités interdisciplinaires menées au LSM
Modane – 26 janvier 2016*

Métrologie de la contamination radioactive dans les matériaux et circuits électroniques à l'échelle du ppb et en-deçà

Activités de l'IM2NP au LSM

J.L. Autran, D. Munteanu

IM2NP – UMR CNRS 7334, Marseille



Im2np

(Aix*Marseille
université

Remerciements

- **P. Roche, G. Gasiot** (STMicroelectronics, Crolles)
- **P. Maillot** (STMicroelectronics, Rousset)
- **B. Dwyer McNally** (XIA LLC, USA)
- **F. Mauger** (LPC-Caen)
- **G. Warot, M. Zampaolo, F. Piquemal** (LSM, Modane)
- **J. Bustos** (CPPM, Marseille)



Radiation Effects & Electrical Reliability Joint Laboratory
STMicroelectronics – CNRS - Aix-Marseille University - ISEN

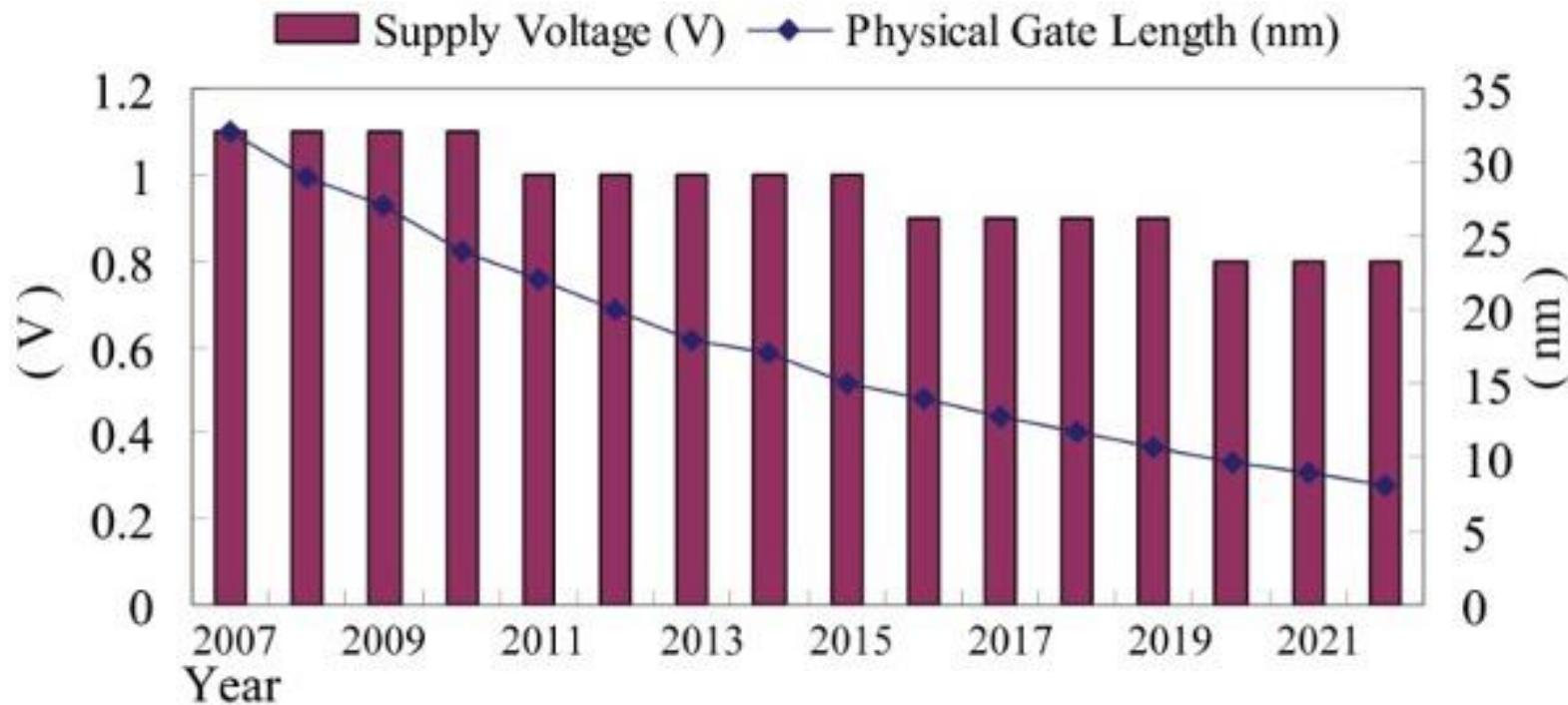


Plan de la présentation

- **Introduction – Contexte**
- **Impuretés radioactives et matériaux radioactifs**
- **Détection électrique au niveau circuit**
- **Métrologie au niveau wafer**
- **Conclusion & perspectives**

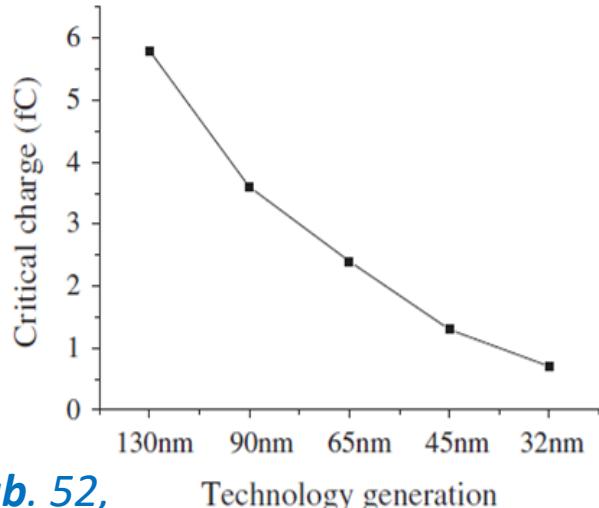
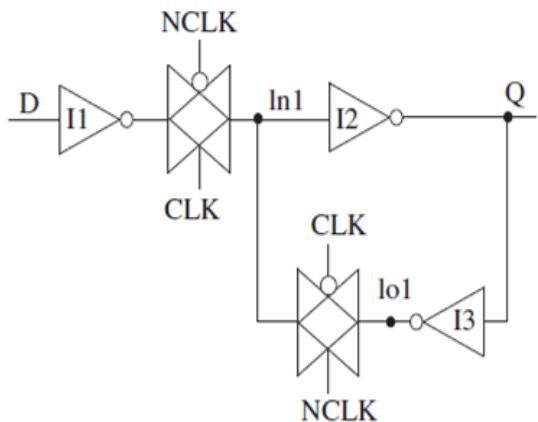
Introduction - Contexte

- Evolution de la microélectronique : diminution des dimensions du transistor MOS et de la tension d'alimentation des circuits



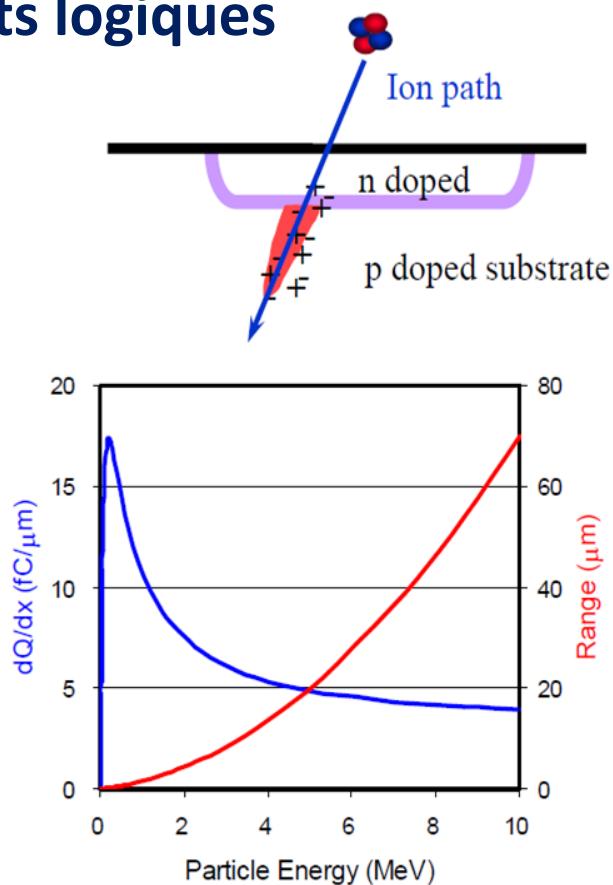
Introduction - Contexte

⇒ Diminution de la charge critique des circuits logiques



Nan & Choi *Microelec. Reliab.* 52,
1209–1214 (June 2012)

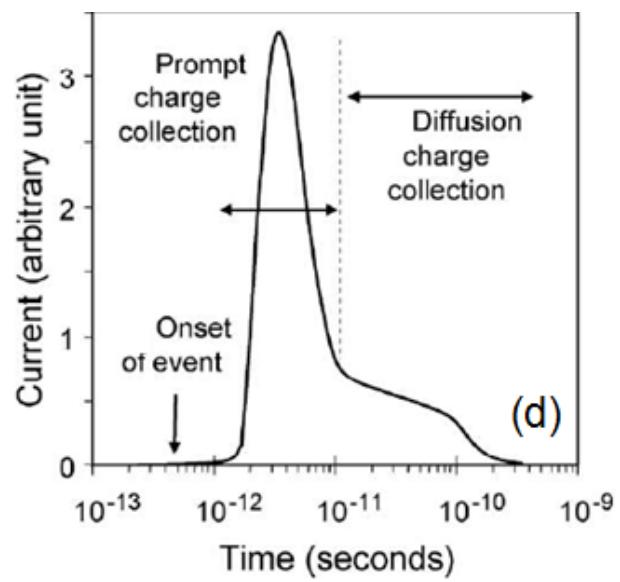
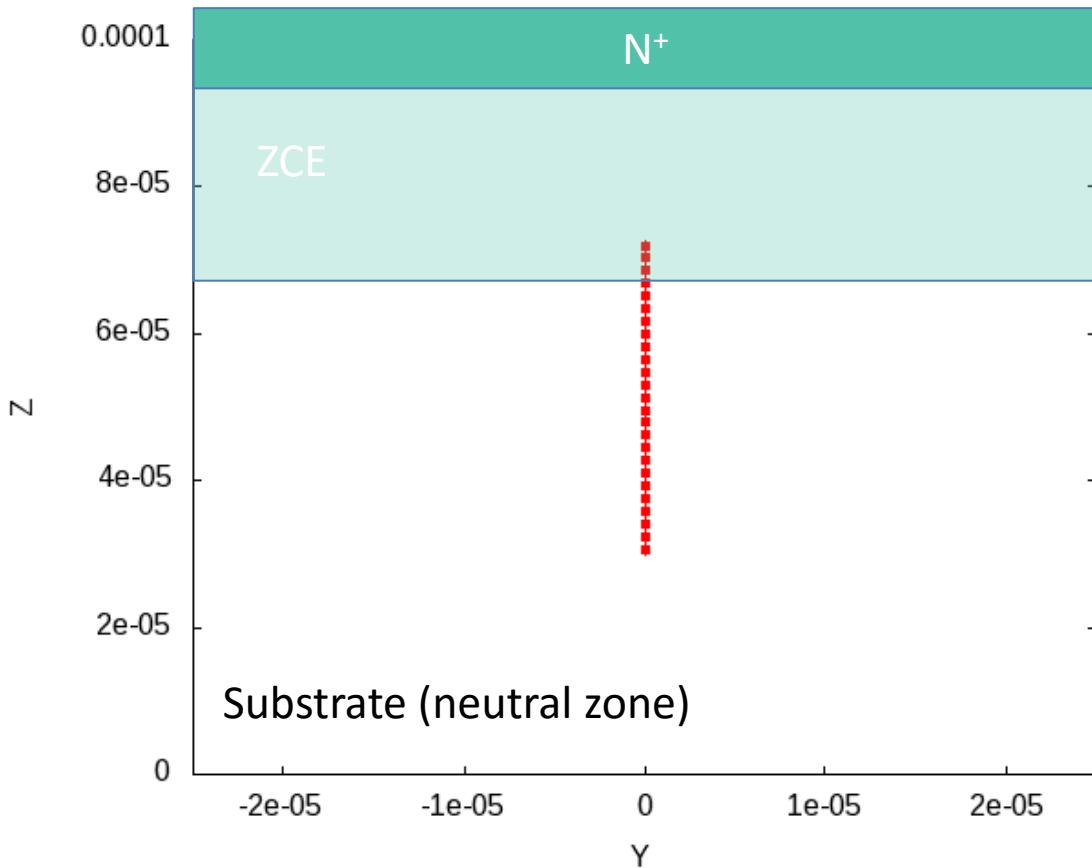
charge critique < charge déposée par une particule ionisante (α , p, ion lourd) et collectée par un nœud sensible du circuit



After Clark, *SER Workshop*
(October 2012)

Introduction - Contexte

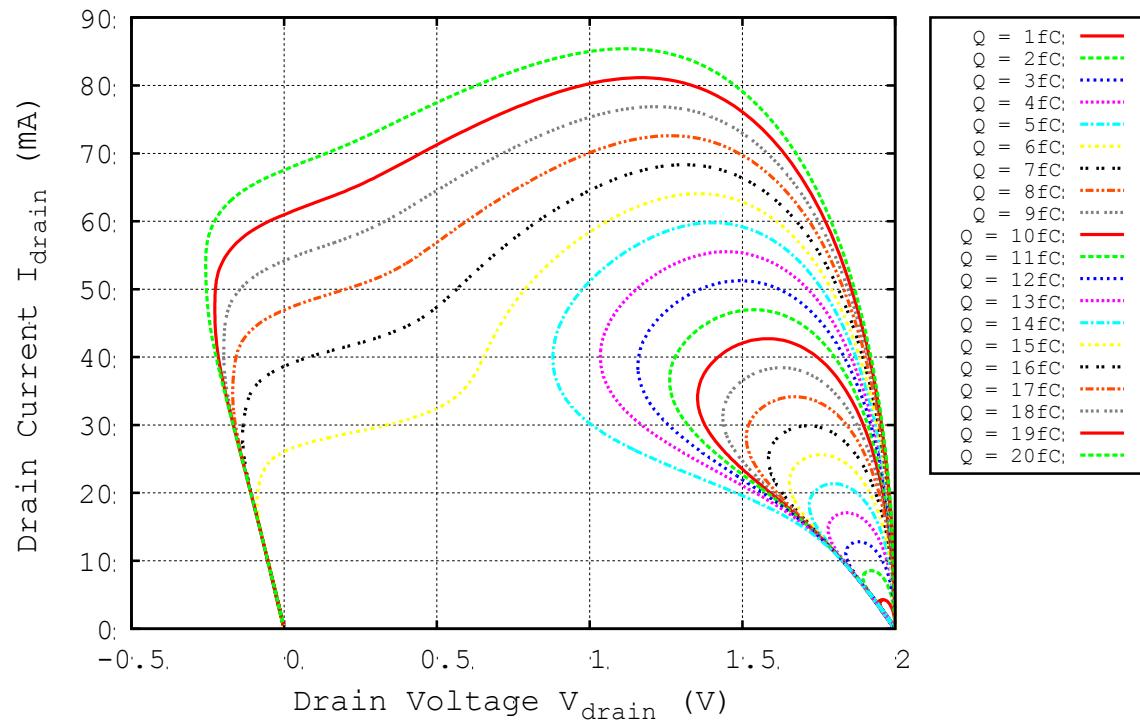
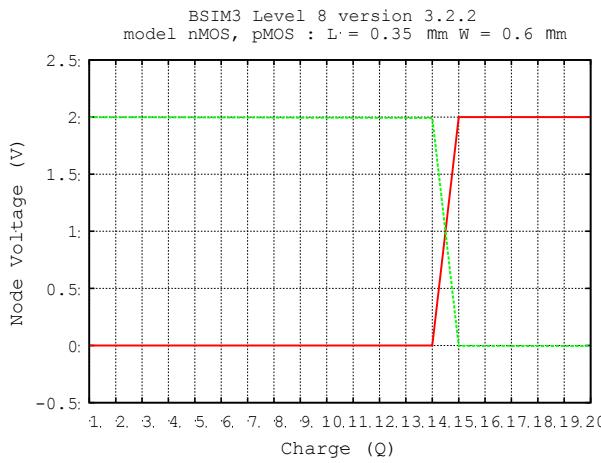
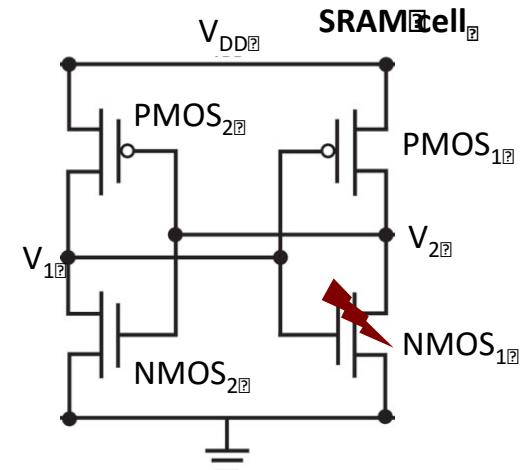
⇒ Apparition de “single events” dans les circuits logiques



Current pulse caused by
the passage of the
energetic particle

Introduction - Contexte

Exemple: basculement d'un point mémoire SRAM → “Soft Error”

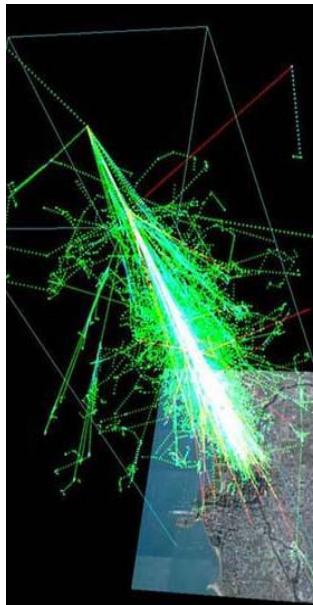
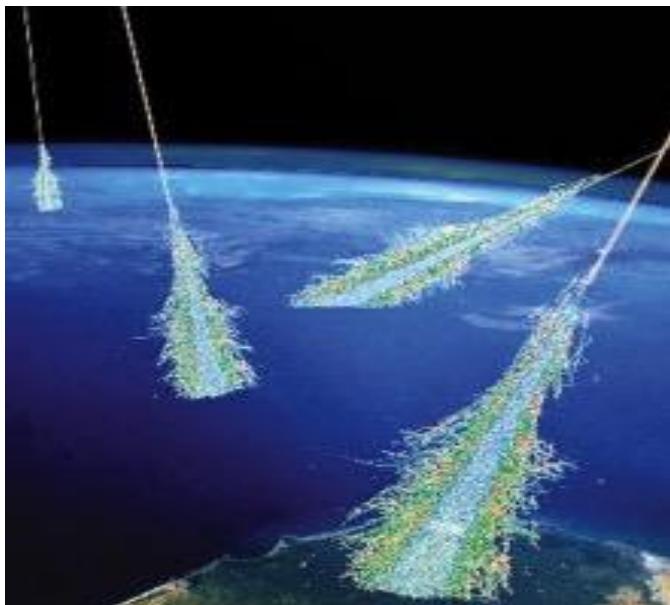


Introduction - Contexte

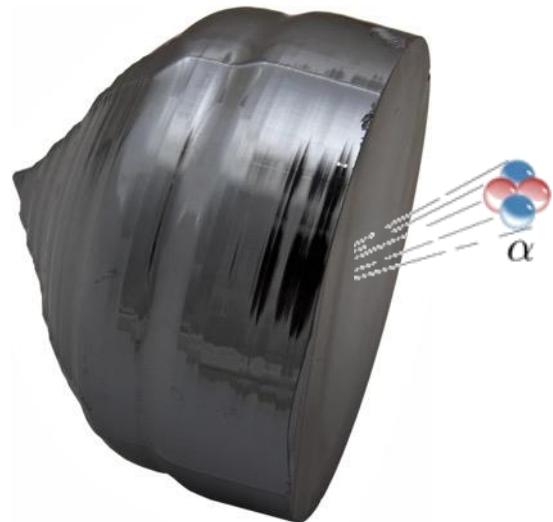
Radiations naturelles au niveau terrestre (i.e. au niveau du sol)



Atmospheric-particles
Elementary particles - device interactions (high energy neutrons)



Alpha-particles
U/Th contamination
Natural α -emitter isotopes



Impuretés radioactives et matériaux radioactifs

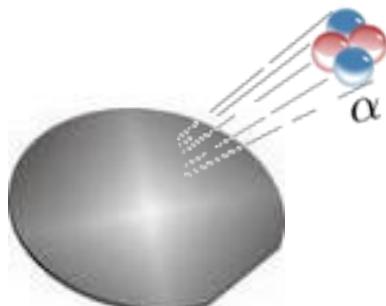


→ Use of Silicon wafers, ceramic packages and contact bumps contaminated with Uranium and Thorium elements at ppb levels



→ 0.5 ppb of ^{238}U in Silicon
= 425 Bq/m³
= 0.18 Bq/kg

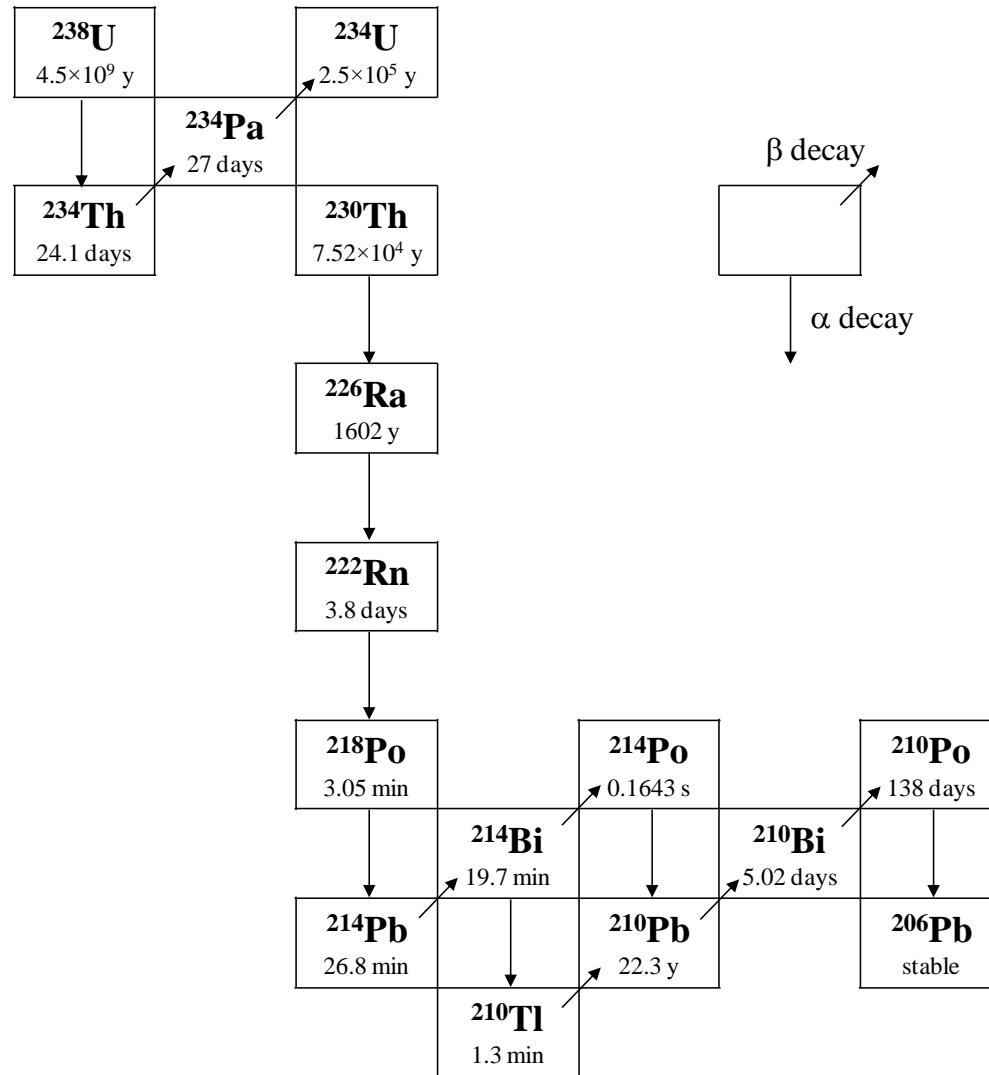
→ Compared to:
Radioactivity of sea water: 12 Bq/kg
Radioactivity of spring water: 0.1 Bq/kg



0.5 ppb of ^{238}U in Silicon
= $2.28 \times 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{h}$

Impuretés radioactives et matériaux radioactifs

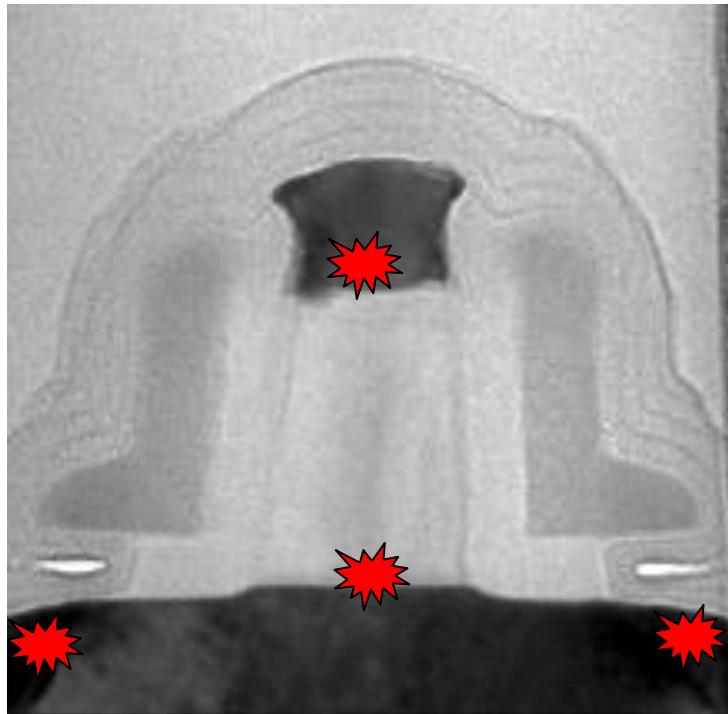
Uranium	92
Protactinium	91
Thorium	90
Actinium	89
Radium	88
Francium	87
Radon	86
Astatine	85
Polonium	84
Bismuth	83
Lead	82
Thalium	81



Impuretés radioactives et matériaux radioactifs



→ Introduction of new materials with natural alpha-particle emitter isotopes: platinum (silicides), hafnium (gate dielectrics)



TEM cross-section - After Intel

Appl. Phys. Lett. 93, 064105 (2008)

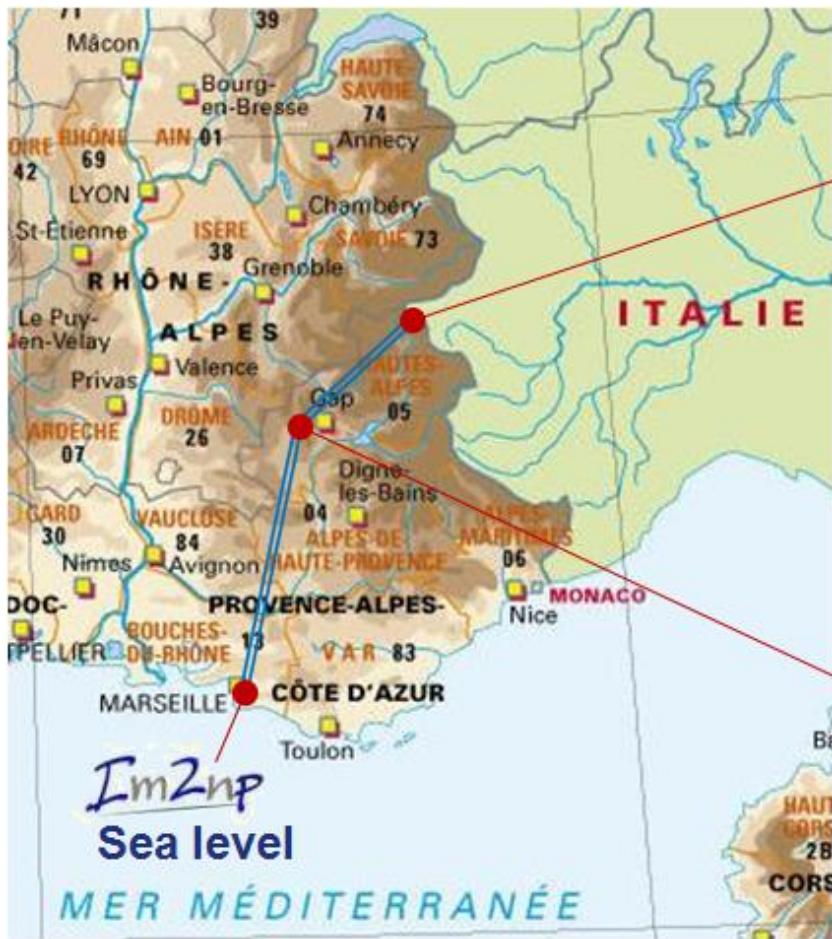
TABLE I. Disintegration rates of radioactive materials. Concentrations of radioactive nuclei are deduced from natural abundances.

Element	$T_{1/2}$ (s)	Natural abundance (%)	Disintegration rate [$(\text{mm}^2 \mu\text{m}^{-2} 10^9 \text{ h})^{-1}$]
^{190}Pt	2.05×10^{19}	0.014	85.21×10^4
^{144}Nd	7.23×10^{22}	23.8	41.07×10^4
^{152}Gd	3.41×10^{21}	0.2	7.31×10^4
^{148}Sm	2.21×10^{23}	11.24	6.35×10^4
^{187}Re	1.37×10^{18}	62.6	5.70×10^4
^{186}Os	6.31×10^{22}	1.59	3.14×10^4
^{174}Hf	6.31×10^{22}	0.16	0.32×10^4

After Wrobel et al.
(IES-CNRS Montpellier)

Détection électrique au niveau circuit

→ Expériences “temps réel” sur des circuits mémoires



-1700 m
under rock
DEPUIS 2007



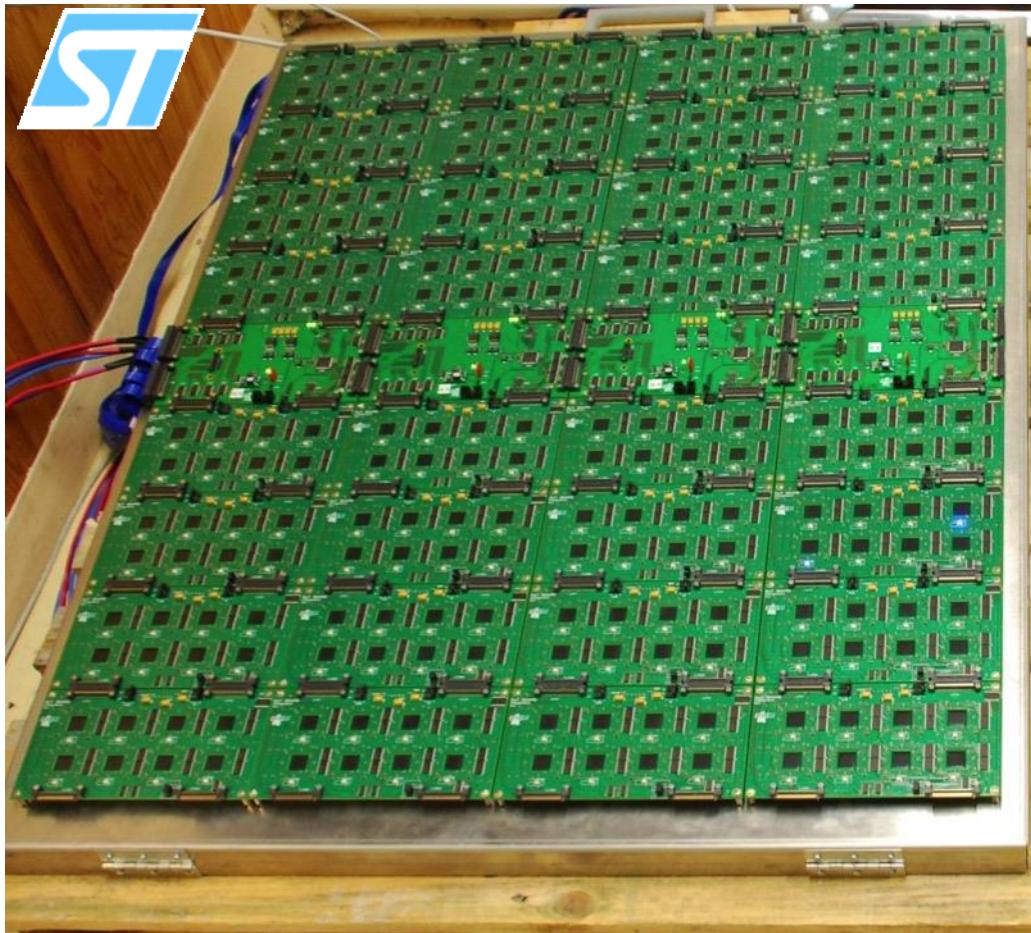
DEPUIS 2005



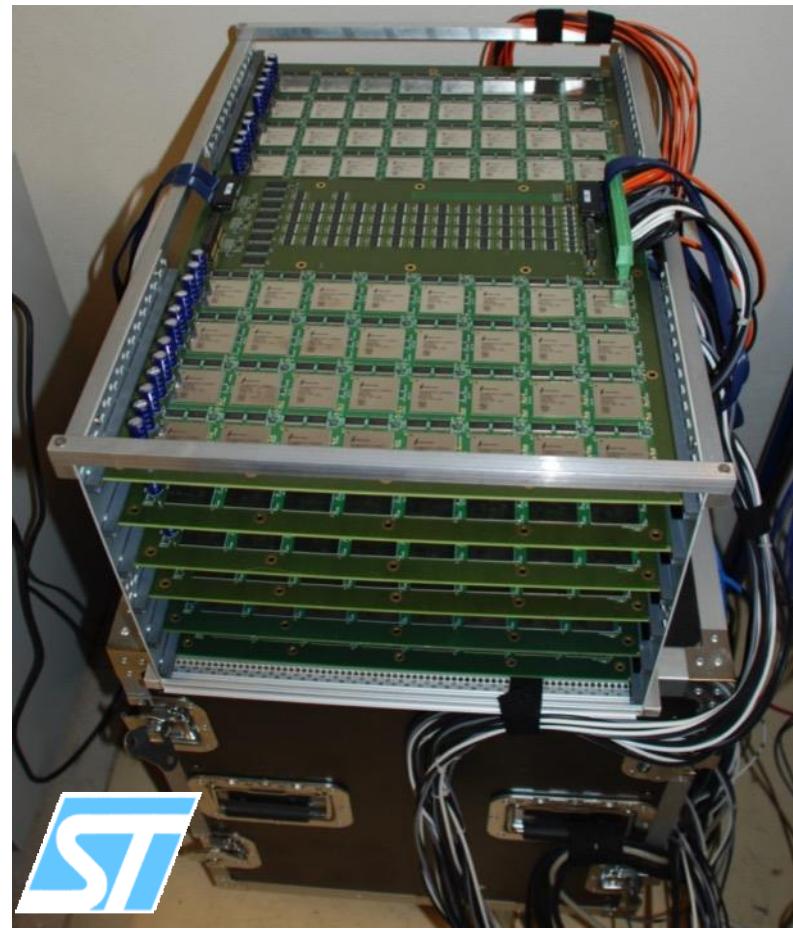
+2552 m in Alp
mountains



Détection électrique au niveau circuit

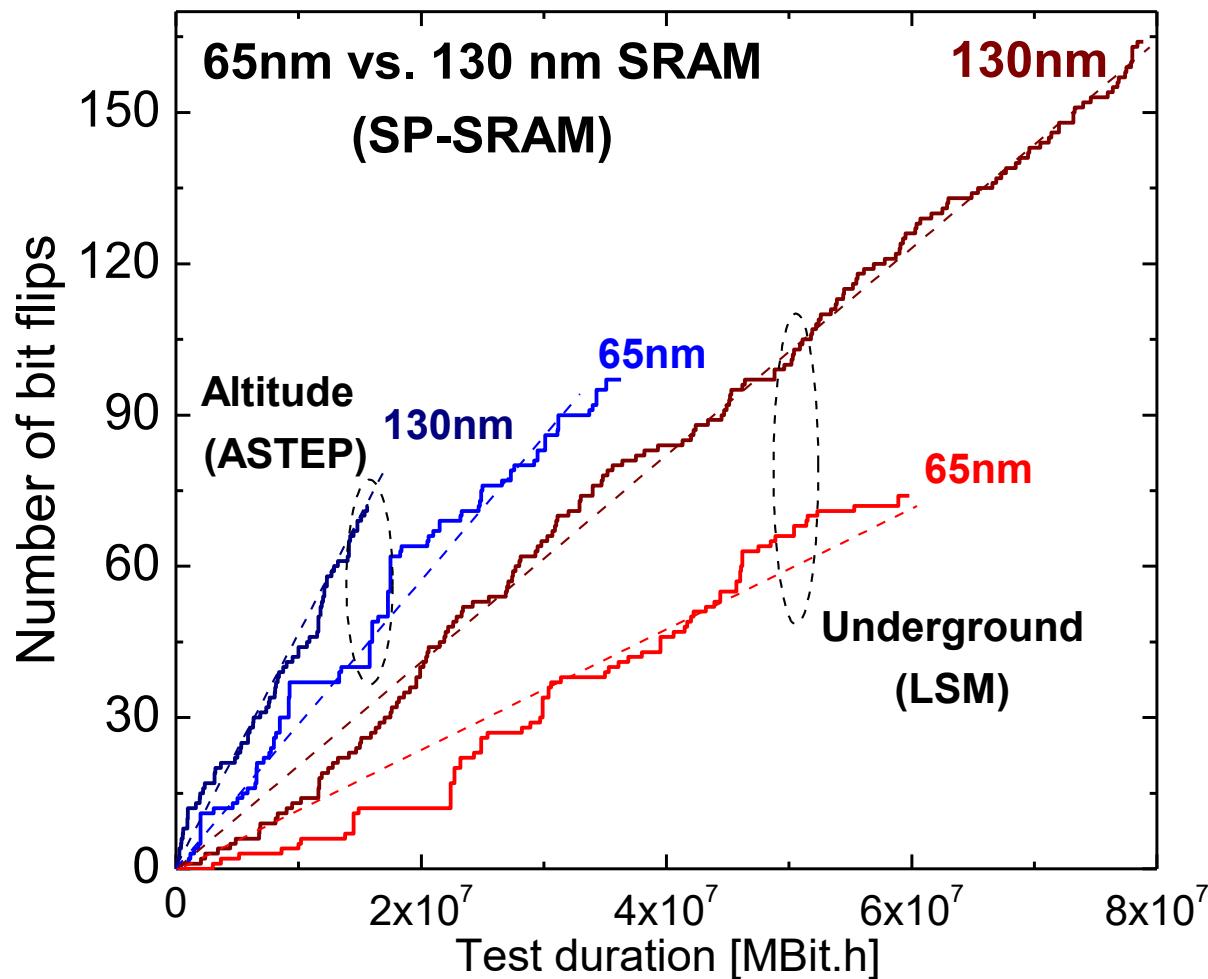


512 circuits SRAM 40nm (ST)



384 circuits SRAM 65nm (ST)

Détection électrique au niveau circuit

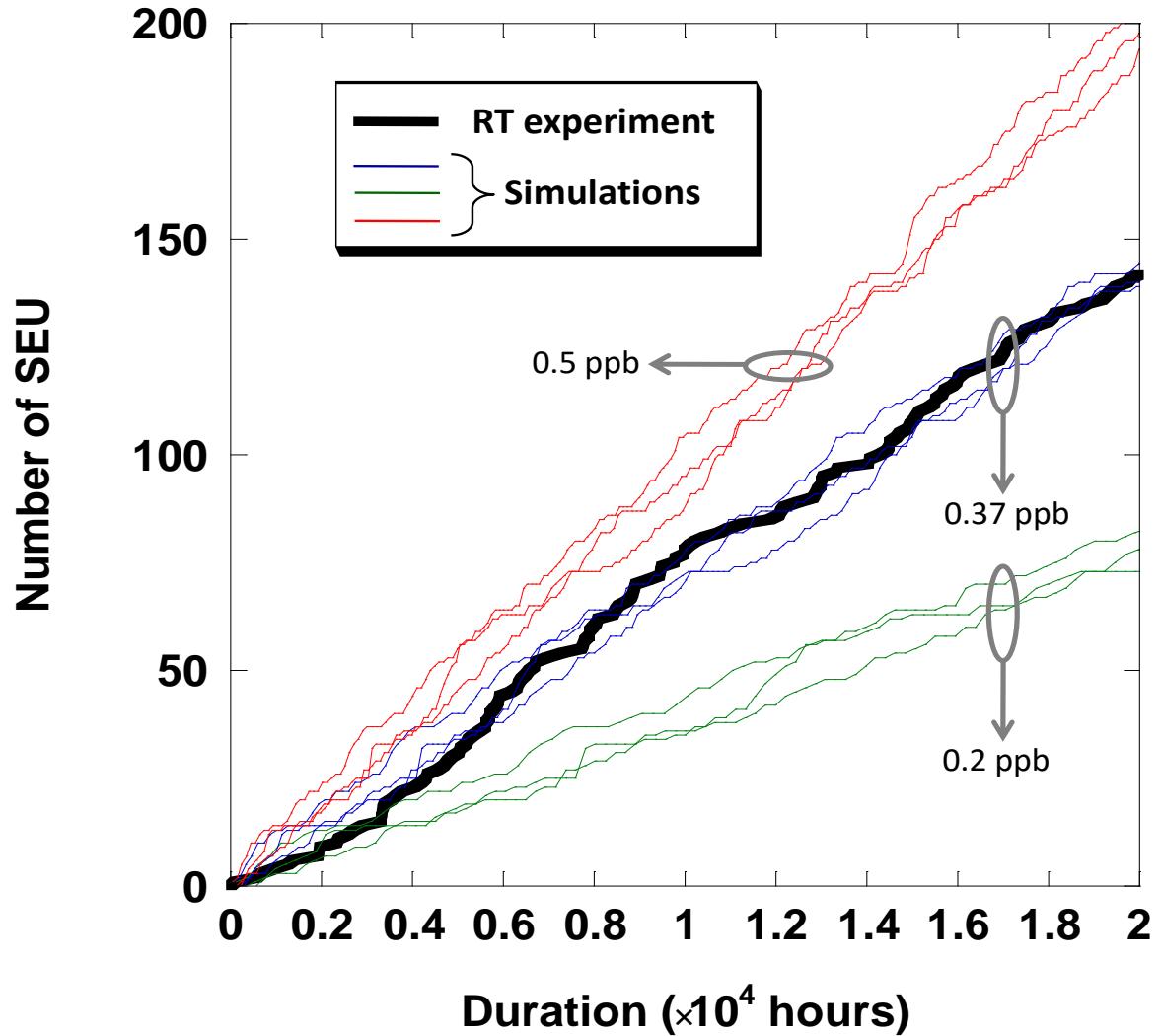


Détection électrique au niveau circuit



Détection électrique au niveau circuit

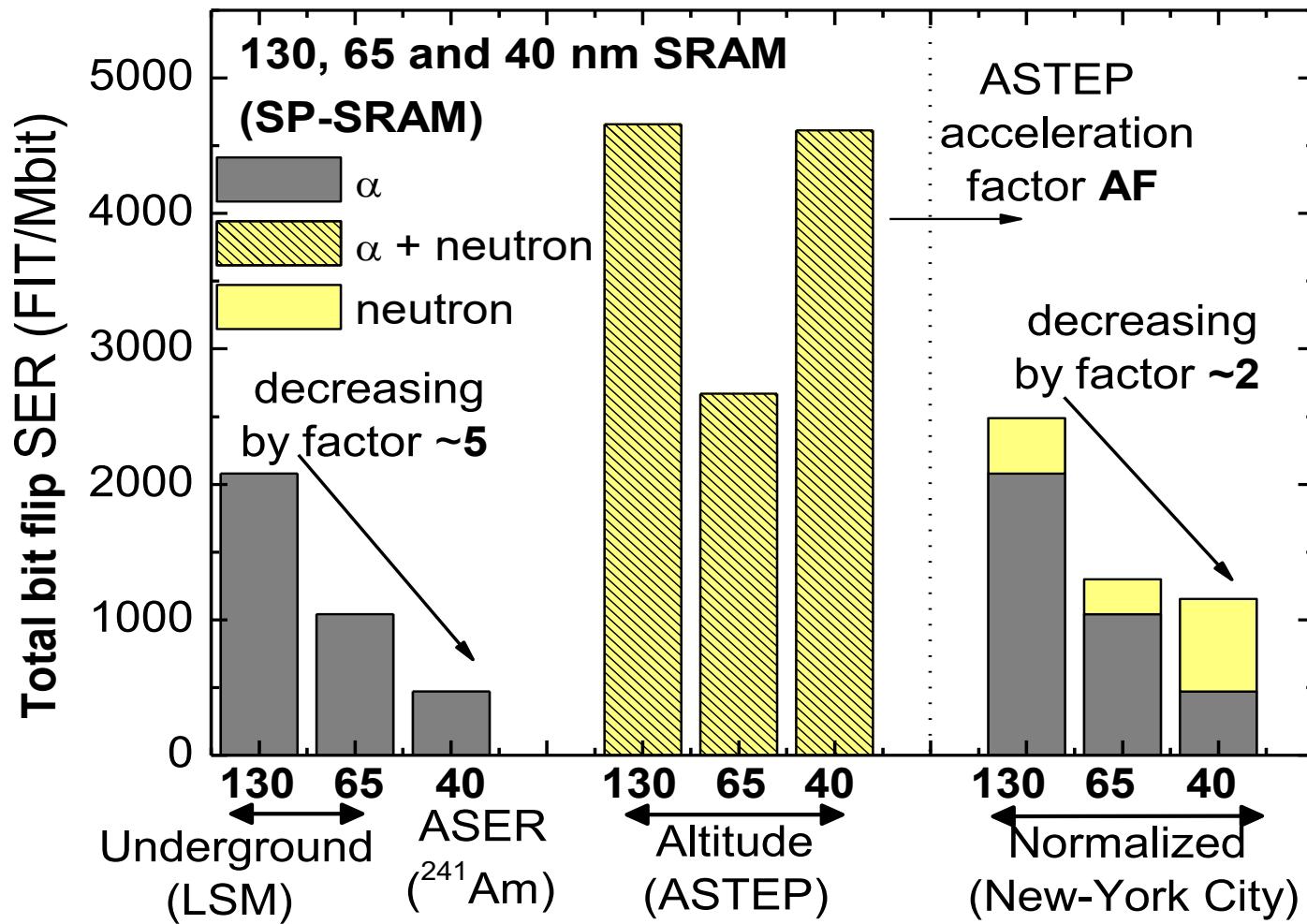
- Up to 20,000 h of cave characterization
- α -SER reevaluated to 2079 FIT/MBit
- Monte-Carlo simulation gives a contamination level by ^{238}U impurities of 0.37 ppb
- Very good agreement with wafer-level characterization (alpha emissivity) in the range [0.2-0.5] ppb



Synthèse : 8 années de tests temps réel

Platform	Circuit & Technology	Test temp.	Initial Mbit under test	Start date	Stop date	Effective cumulated hours of test	Experimental bit flip SER at test location (FIT/Mbit)
ASTEP	130 nm SRAM	RT	3,664	03/31/2006	11/26/2006	5,200	4,658
LSM			3,472	10/16/2007	10/15/2010	24,747	2,079
ASTEP		RT	3,216	01/21/2008	05/07/2009	11,278	2,670
		85 °C	2,884	06/26/2009	01/24/2013	28,482	2,670
LSM	65 nm SRAM	RT		04/11/2008	01/25/2015	57,058	1,040
Marseille		RT	3,226	03/13/2015	Ongoing	1,650	<i>1,503 (to be consolidated)</i>
ASTEP	40 nm SRAM	RT	7,168	11/03/2011	10/06/2014	27,473	5,185
Marseille		RT		10/16/2014	Ongoing	4,625	<i>1,348 (to be consolidated)</i>

Synthèse : 8 années de tests temps réel



Métrologie au niveau wafer



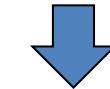
Méthode non destructive

Détection et spectroscopie
des particules alpha
émises à la surface d'un wafer

*Alpha-particle ultra low
background counter*



Im2np



Méthode destructive

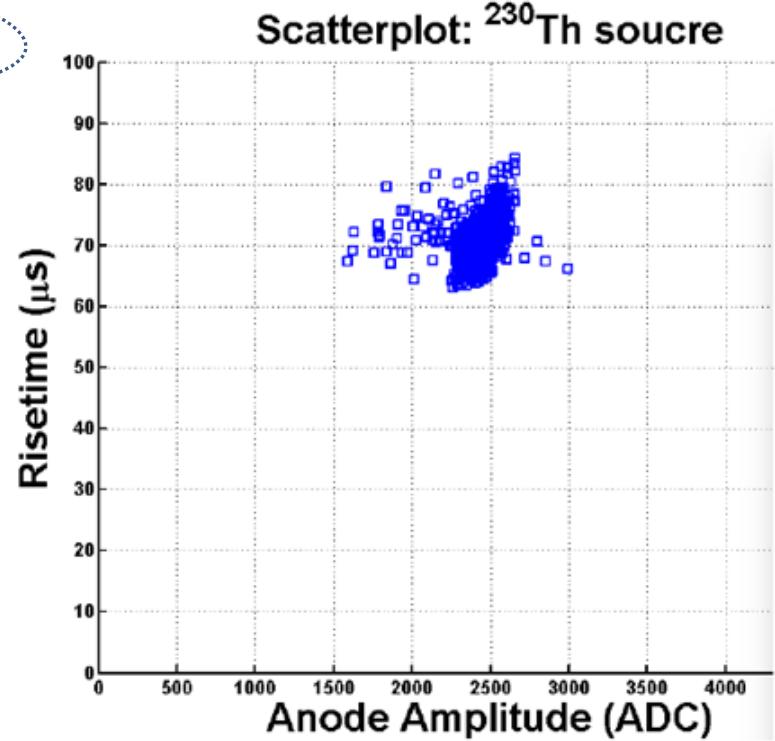
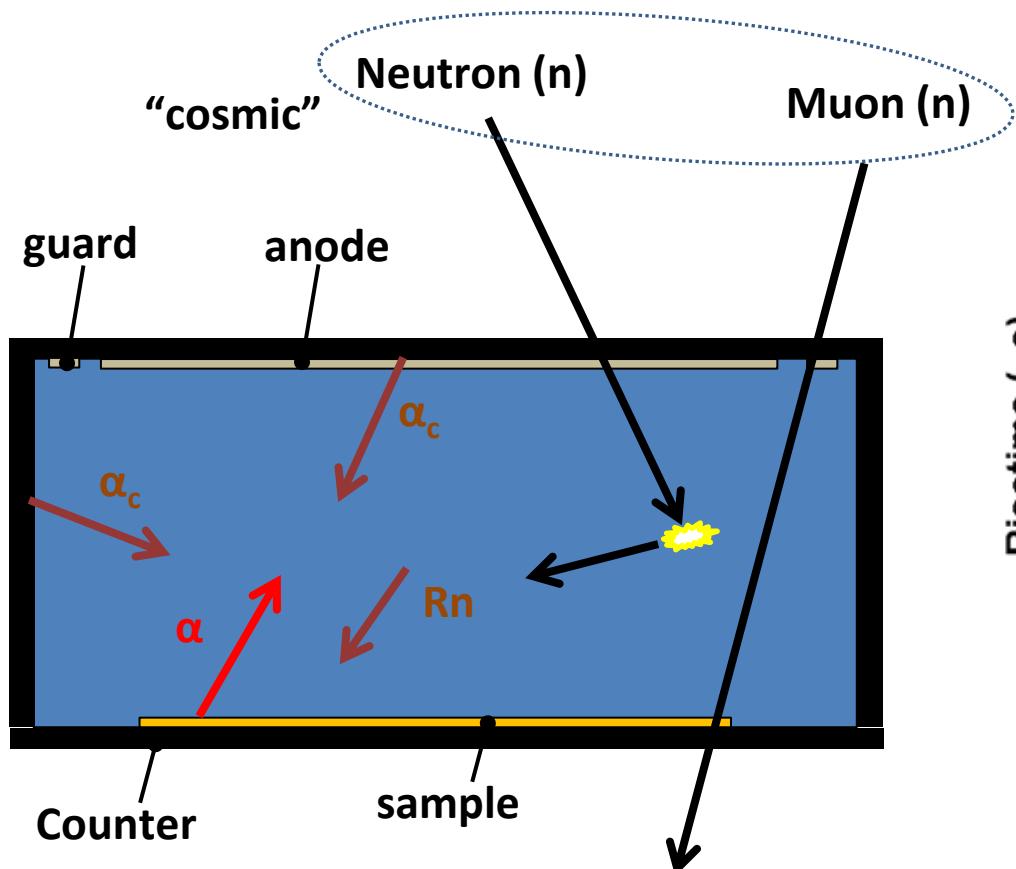
Analyse physico-chimique
par spectrométrie de masse
d'un wafer décomposé en
phase vapeur

VPD-ICPMS



Métrologie au niveau wafer

→ Nouvelle architecture de compteur – Technologie XIA LLC

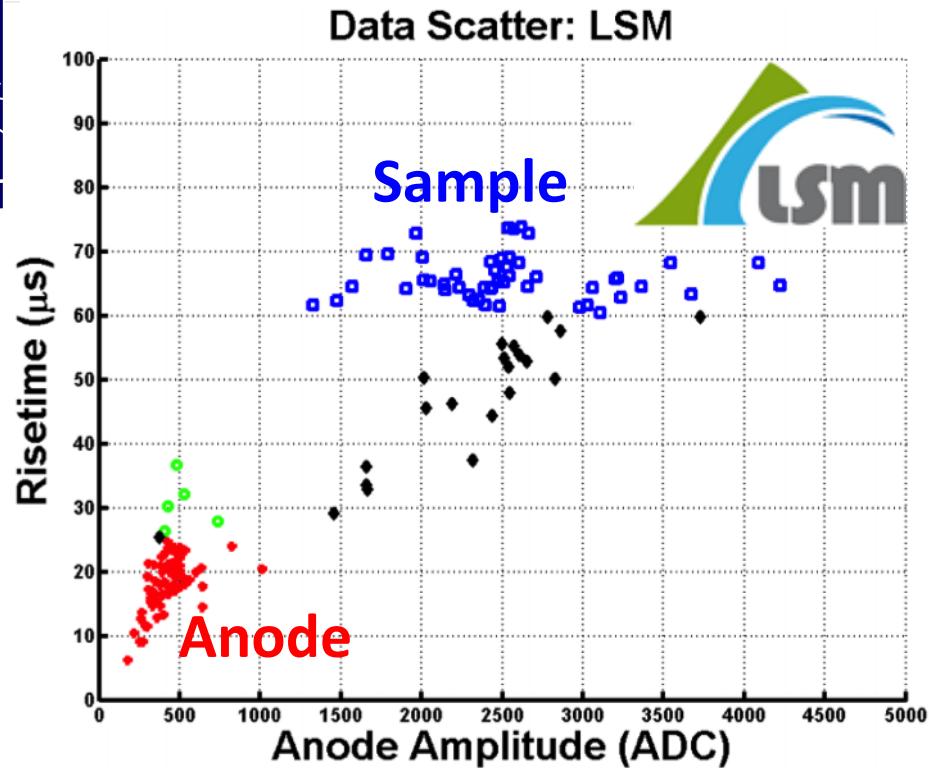
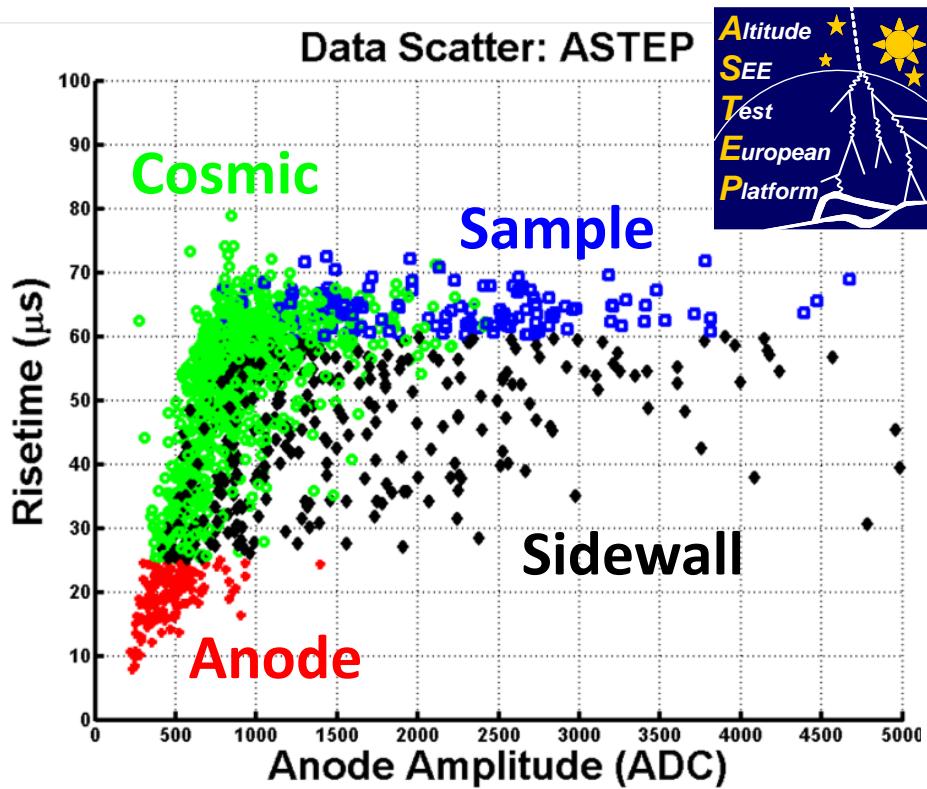


Calibration with a foil source

Métrie au niveau wafer

→ Caractérisation du compteur UltraLo 1800 XIA LLC

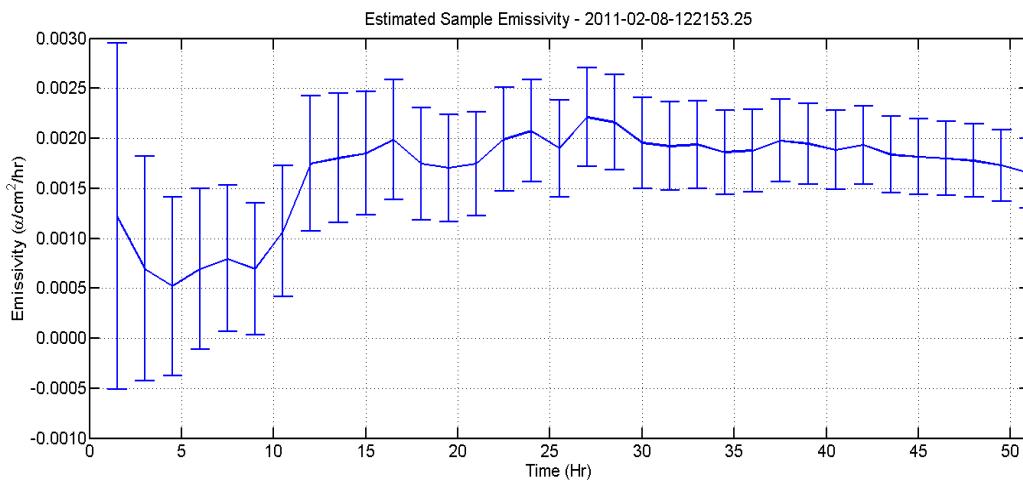
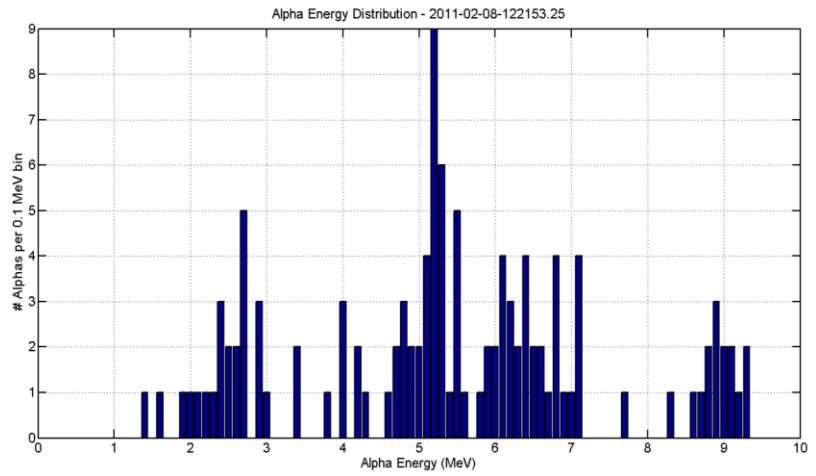
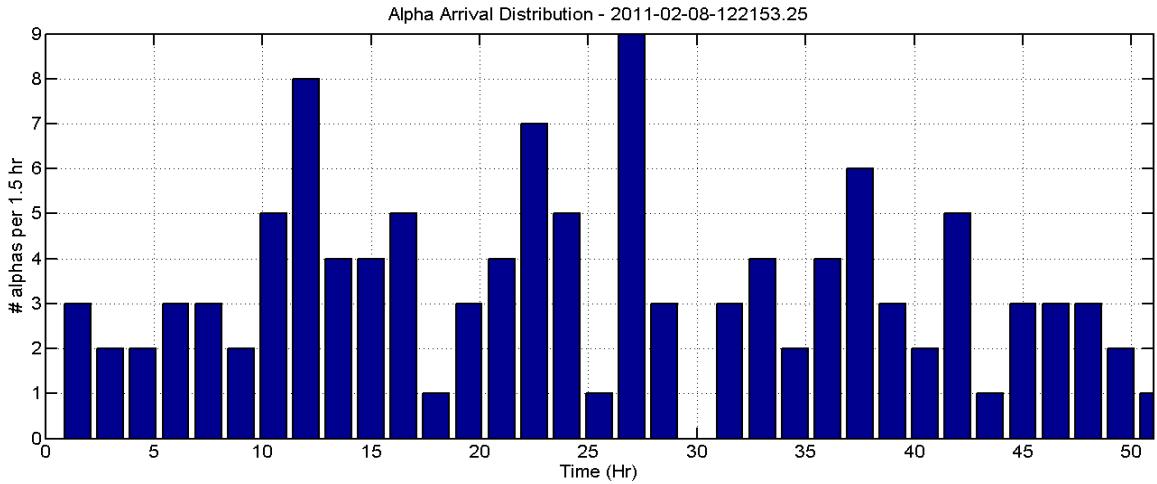
Campagnes de mesures – Août-Décembre 2010 (collaboration XIA-IM2NP)



After Dwyer McNally, IEEE SER Workshop (2011)

Métrologie au niveau wafer

→ Caractérisation de wafers de silicium 300 mm



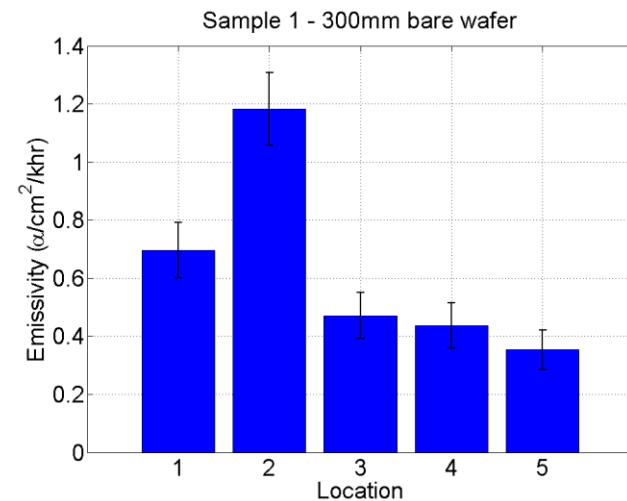
Métrologie au niveau wafer

→ Comparaison entre différents équipements

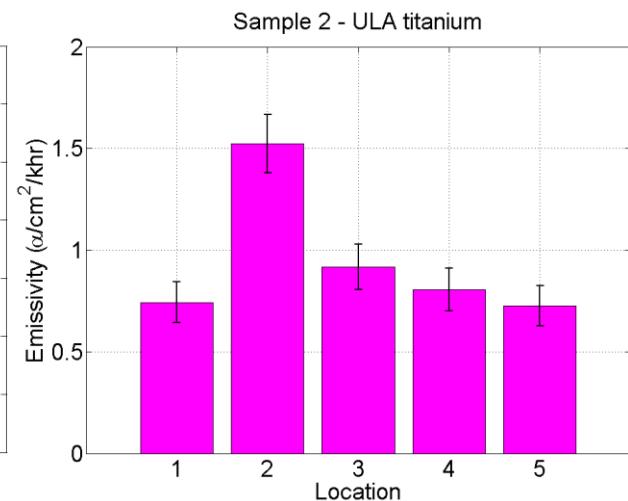
*Etude conduite par XIA LLC en 2012 avec les cinq premiers équipements:
XIA, IBM (Site 1), IM2NP, Honeywell, IBM (Site 2)*

Caractérisation d'une semaine (168h) pour chaque échantillon

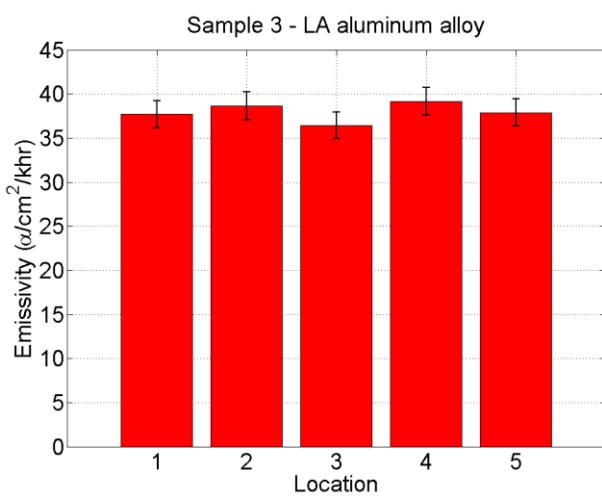
Wafer silicium 300 mm



Plaque de titane pur



Plaque d'aluminium



Conclusion - Perspectives

- La radioactivité alpha des matériaux est aujourd’hui l’une des composantes essentielles (avec le rayonnement atmosphérique) du taux d’aléas logiques (Soft Error Rate) dans les circuits CMOS au niveau du sol
→ problématique fondamentale pour les applications « haute fiabilité » (médical, sécurité, transport)
- Besoin d’une métrologie de la contamination alpha au niveau wafer/packaging dans la gamme [ppt – ppb]
- Deux techniques compatibles « wafer-level »: Spectrométrie alpha et VPD-ICPMS
- Nombreux sujets ouverts: instrumentation, calibration, modélisation et simulation,...

Conclusion - Perspectives

- **Projet de création d'une Plateforme "Ultra Basse Radioactivité" pour la micro-nanoélectronique au Laboratoire Souterrain de Modane – Plateforme ULTIME**
- **Objectif : caractérisations par spectrométrie alpha et gamma de matériaux en couches minces pour la microélectronique**
- **Projet porté par les laboratoires IM2NP, LSM, CPPM et LPC Caen**
- **Soutien du Laboratoire Commun STMicroelectronics-IM2NP**
- **Appel à projet PEPS Interdisciplinaires 2015 FaiDoRA (Faibles Doses, Risques, Alertes) 2015 infructueuxNouvelle soumission en 2016 ?**

Merci pour votre attention

Contact: Jean-Luc Autran

Aix-Marseille Université & CNRS, IM2NP, UMR 7334

jean-luc.autran@univ-amu.fr



Radiation Effects & Electrical Reliability Joint Laboratory
STMicroelectronics – CNRS - Aix-Marseille University - ISEN



Aix*Marseille université ISEN | école d'ingénieurs



GDR CNRS 33469 ERRATA

Effets des **Radiations** sur l'**Electronique** aux
niveaux **Atmosphérique** et **Terrestre**

<http://www.gdr-errata.fr/>