



NRTW 2025

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 19 et Jeudi 20 mars 2025 | GANIL – Bd Henri Becquerel, 14000 Caen

Méthode de test au niveau système de cartes électroniques
COTS sous ions lourds à haute énergie

Alexis de Bibikoff – Safran Data Systems 

Organisé par :





01. Contexte

Equipement à caractériser
Coûts d'une caractérisation

02. Méthode Système

Objectif et Principe
Modélisation
Définition des SEE
Mise en œuvre

03. Problématiques

Taille du faisceau d'ions
Energies du faisceau d'ions
Choix de l'accélérateur de particules

04. Conclusion

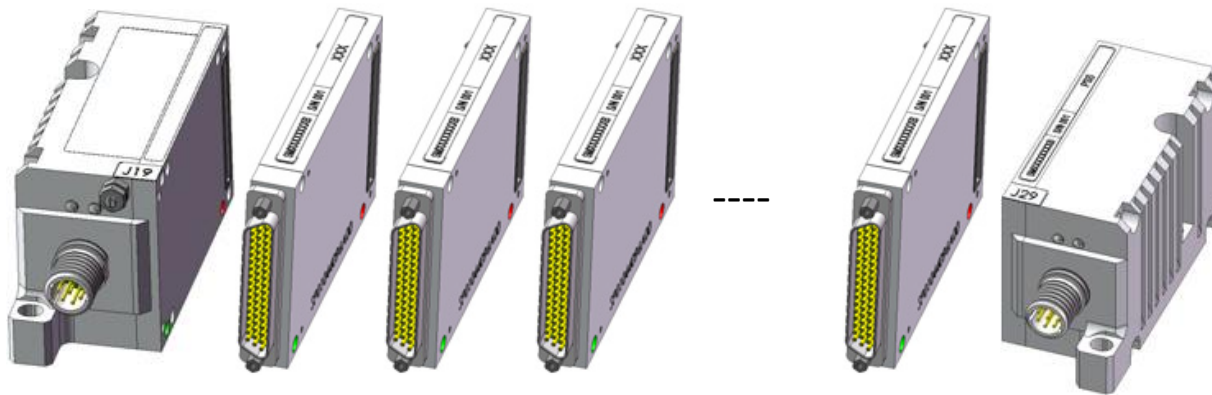
Bonnes pratiques
Avantages de la méthode
Inconvénients de la méthode

Equipement à caractériser : Data Acquisition Unit (DAU)

- Technologie XMA (COTS = Commercial Off-The-Shelf)
- Nombre de composants actifs des modules principaux = 180 / module
- Nombre de modules par DAU = 2 à 16
- Nombre de références différentes de composants actifs = 126

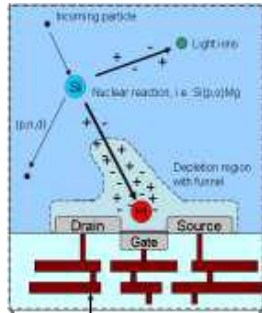
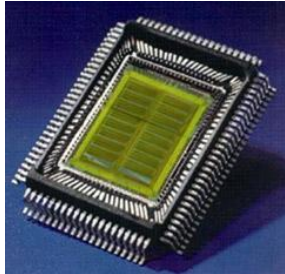
Caractéristiques mécaniques d'un module

- Boîtier en aluminium épaisseur totale 10,8 à 36,6 mm
- Nombre de PCB par module = 1 à 2



Utilisation de composants COTS = Aucune donnée existante de tenue aux radiations

1 circuit

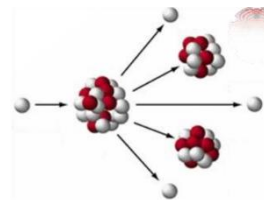


$$\sigma(L) = \sigma_{sat} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{L-L_0}{w}\right)^s} \right]$$

$$N_{failures} = \int \phi(x) \sigma(x) dx$$

Coût pour une caractérisation
D₀ ≈ 10 K€ à 450 K€ (ex : DSP)

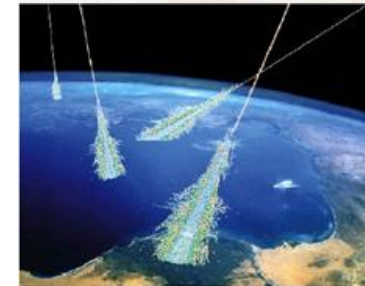
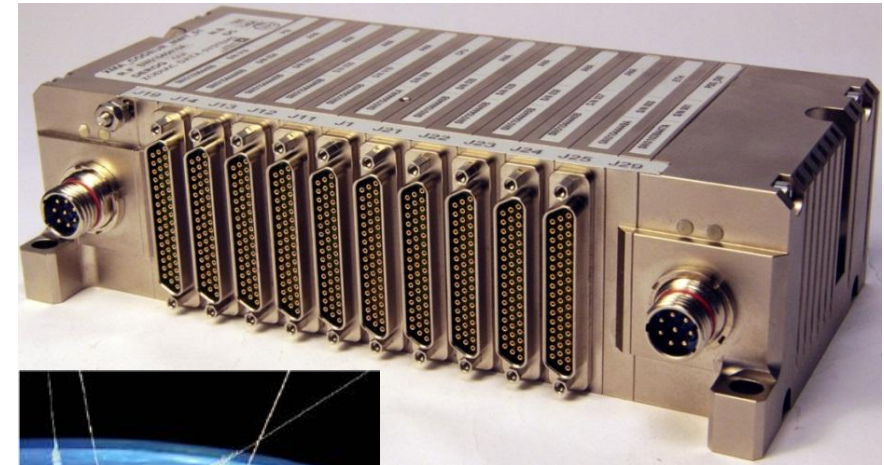
1 module = *n* circuits



$$M_{failures} = f(N_1, N_2, \dots, N_n) = ?$$

$$\text{Coût} : D_m = \sum_1^n D_n$$

1 DAU = *m* modules + logiciel



$$DAU_{failures} = f(M_1, M_2, \dots, M_n, \text{logiciel}) = ???$$

$$\text{Coût} : D_{dau} = \sum_1^m (\sum_1^n D_n)_m + ? = \sum_1^m D_m + ?$$

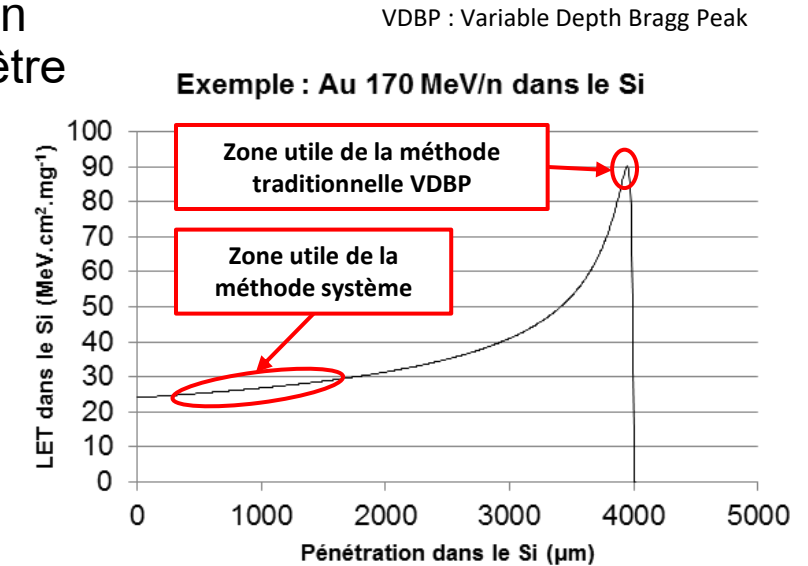
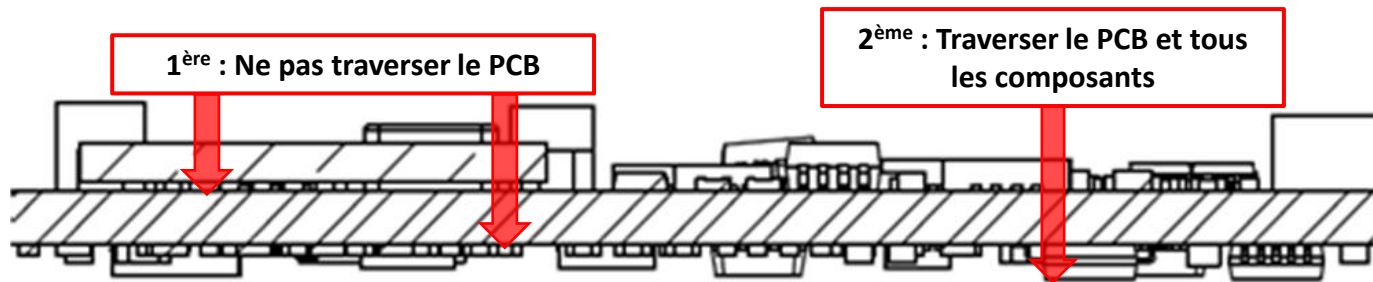
Objectif d'une caractérisation efficiente d'un équipement COTS:

$$DAU_{failures} = \int \phi(x) \sigma_{dau}(x) dx ; \text{Coût} : D_{dau} \approx D_0$$

Objectif

- La méthode consiste à utiliser des ions lourds à très haute énergie afin d'irradier toutes les zones actives des composants du système sans être obligé de les ouvrir.
- Et ceci en ayant des variations de LET entre les composants les plus faibles possible pour un ion défini.

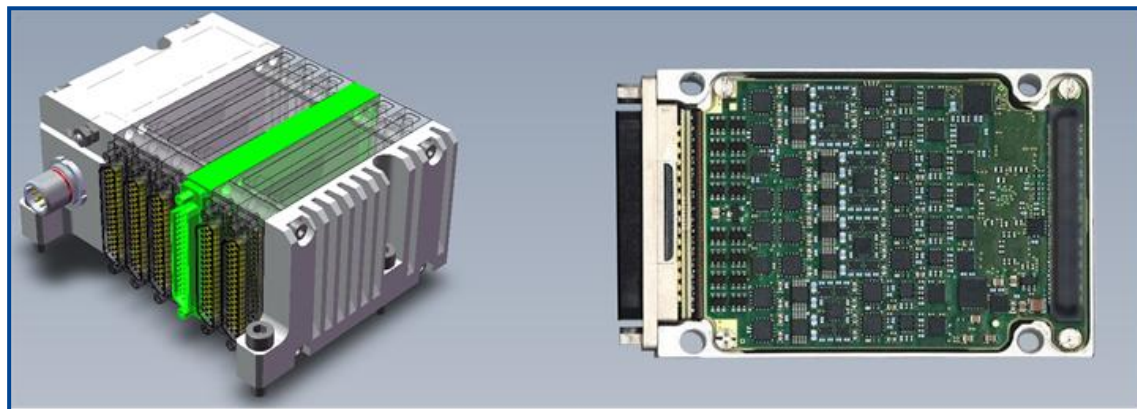
Nous avons deux possibilités



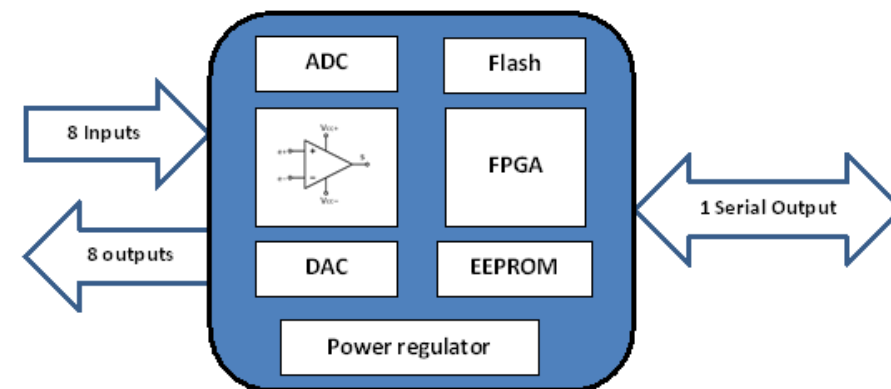
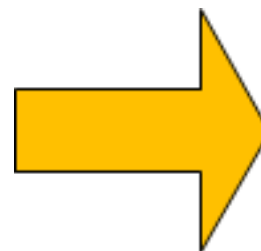
- La 1ère solution a l'inconvénient d'obliger à irradier chacune des faces du PCB indépendamment.
- Si la 2ème solution est possible pour des faibles LET ($< 15 \text{ MeV.cm}^2.\text{mg}^{-1}$) avec peu de variation de LET entre les composants, elle peut devenir problématique pour des LET $> 25 \text{ MeV.cm}^2.\text{mg}^{-1}$.

Il n'y a pas de solution universelle. Tout est une question de compromis.

Exemple de système : XMA_ANA 8 voies analogiques



DAU

DUT en PCB double faces comportant
160 composants actifsDUT Considéré comme une boîte noire avec 8 entrées
analogiques, 8 sorties de conditionnement et un bus série

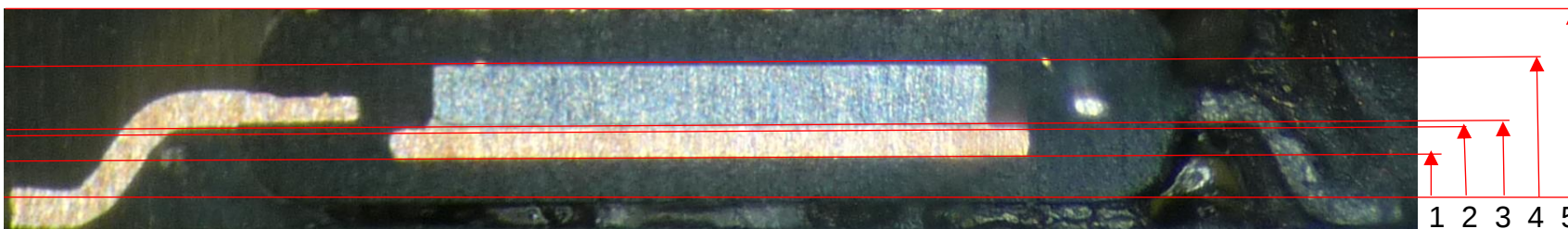
Pour la caractérisation de SEE, nous considérons le DUT comme une boîte noire

- Des générateurs externes sont utilisés pour injecter les signaux d'entrées.
- Nous comparons en temps réel les signaux injectés avec les mesures fournies par le DUT. Toute différence sera comptabilisée comme un SEE.

Avantage : 100% des dispositifs électroniques actifs du système sont irradiés
Inconvénient : c'est une boîte noire

Modélisation des composants actifs

- Toutes les couches de chaque type de composant actif sont mesurées via des coupes métallographiques.



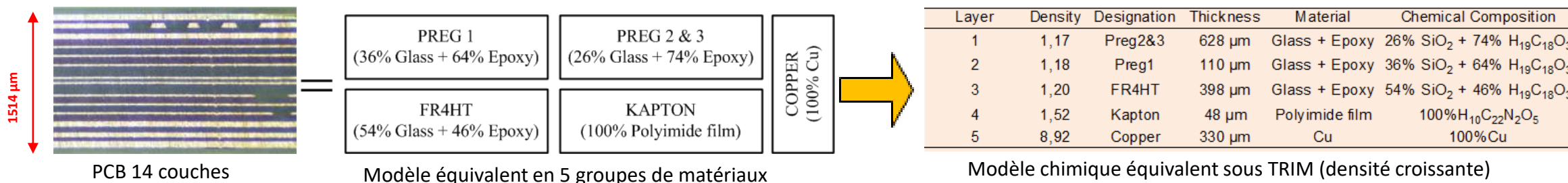
N°	Designation	Thickness	Material
1	Box	206 µm	86.91%SiO2 + 12.78%Epoxy + 0.31%Carbon black
2	Leadframe	131 µm	97.50%Cu + 2.35%Fe + 0.12%Zn + 0.03%P
3	Die Attach	24 µm	77,71%Ag + 3.11%Copper(II) Oxide + Epoxy
4	Chip	267 µm	100%Si
5	Box	252 µm	86.91%SiO2 + 12.78%Epoxy + 0.31%Carbon black

- Le modèle chimique est ensuite modélisé sous TRIM (Transport of Ions in Matter) ^[R11] afin de calculer la perte d'énergie des ions à travers les différentes couches de matériaux du dispositif jusqu'à sa surface active.
- A partir de l'énergie résultante au niveau de la surface active du composant, le LET est calculé en utilisant SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) ^[R11]

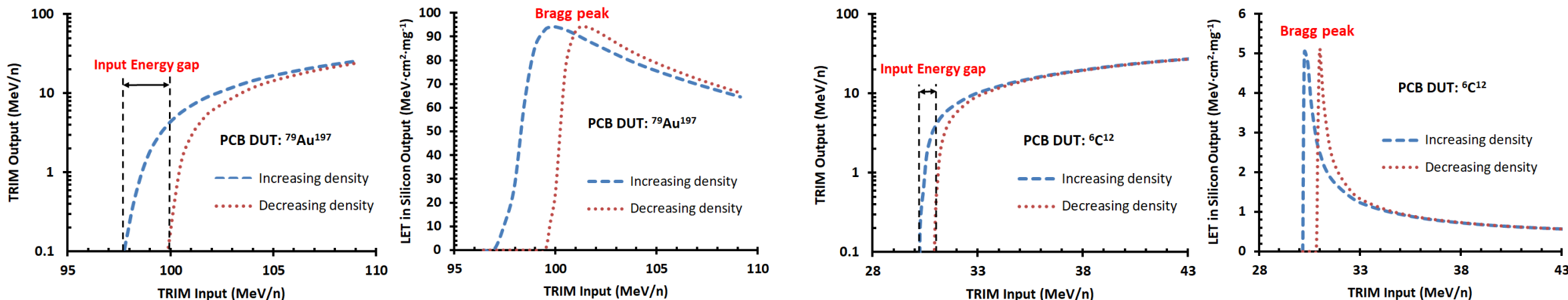
La composition des couches est généralement disponible par le fabricant dans le cadre de REACH

Modélisation des PCBs

- De la même façon le PCB est modélisé



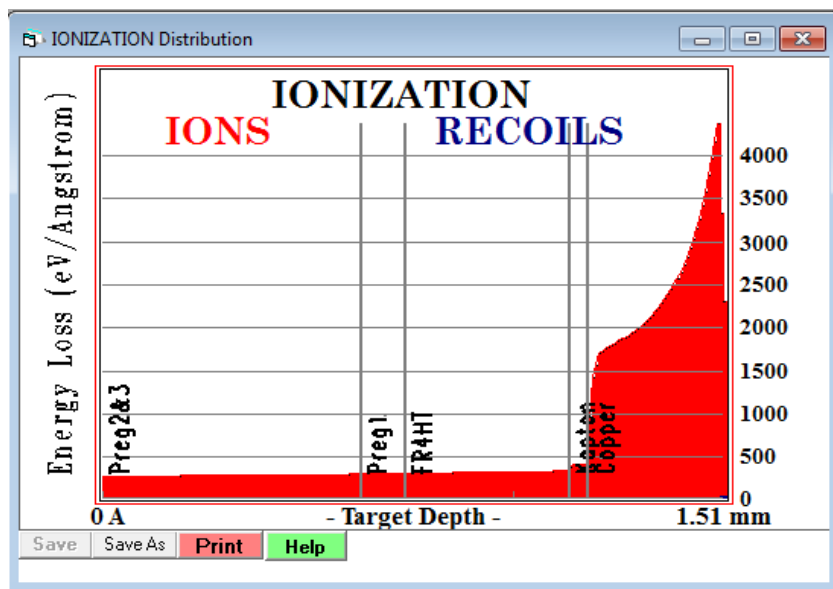
- Dans notre cas, le PCB peut être regroupé en 5 groupes de matériaux.
- Pour la modélisation sous TRIM, afin d'être toujours en pire cas (LET le plus faible), il est important de définir les couches de matériaux dans l'ordre croissant des densités.



Remarque : plus l'ion est lourd plus le gap est important

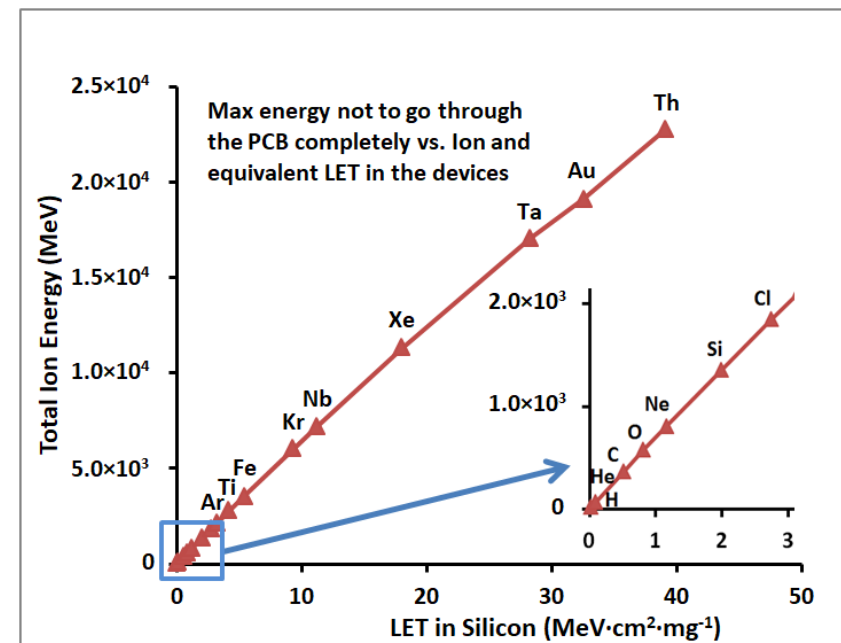
Calcul de l'énergie maximale des ions

- Dans le cas où nous ne traversons pas le PCB (possibilité n°1), le pire est le PCB seul.
- A l'aide de TRIM, nous calculons le point limite où l'énergie de sortie (TRIM out) devient nulle.



Exemple : Distribution d'ionisation du Xenon dans le PCB

ION	Xe
n	132
Bragg Peak (MeV.cm ² .mg ⁻¹)	69,24
Total energy TRIM Input (MeV)	11440
Equivalent LET in Silicon (MeV.cm ² .mg ⁻¹)	18
Energy TRIM Output (MeV)	0



- En ramenant les énergies calculées de chaque ion aux LET respectifs équivalents dans le silicium, nous obtenons une fonction quasi linéaire (erreur = $\pm 10\%$ aux extrémités).

Remarque : Le calcul de deux ions extrêmes suffit à extrapoler tous les autres à $\pm 10\%$ près

Définition des SEE

- Parler de SEE comme des SET, SBU, SEU, MCU, MBU, SEFI, SEL etc. dans le cas d'un système comme notre DAU n'a pas vraiment de sens en soi.
- Nous considérerons que deux états possibles
 - Soit le système nous envoie des données fausses temporairement
 - Soit le système se bloque définitivement (envoi de données fausses continuellement ou plus rien du tout).

Avec cette méthode nous considérons les deux types de SEE suivants

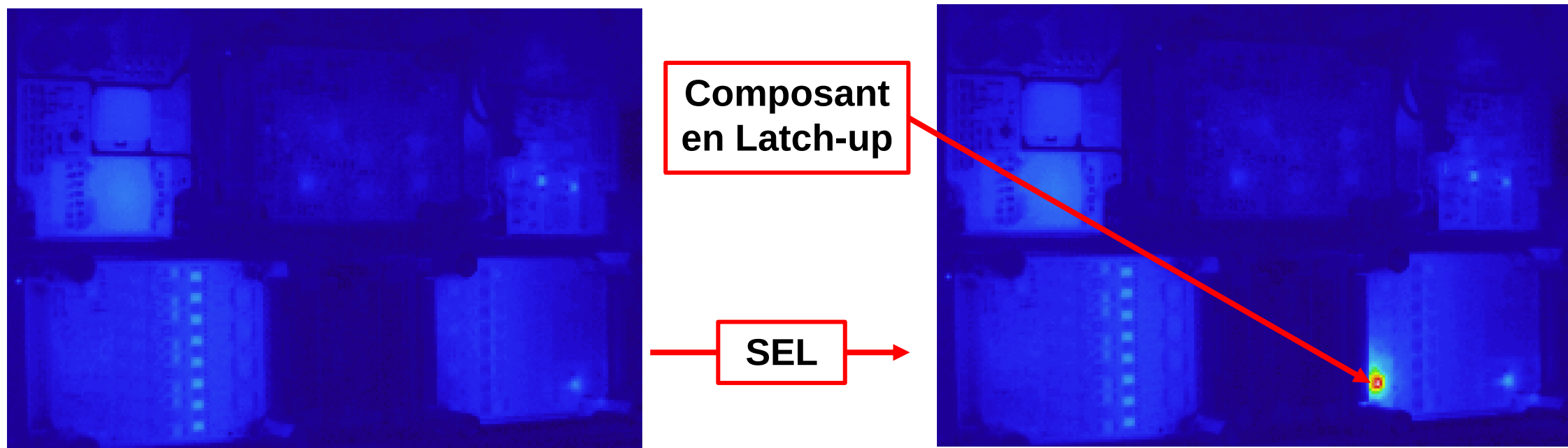
- TSEE pour Temporary Single Event Effects
- PSEE pour Permanent Single Event Effects
- Deux sous catégories pour les PSEE sont aussi à prendre en considération
 - Les PSEE détectables (PSEED)
 - Les PSEE non détectables (PSEEND). Appelés aussi EPND pour Evènement Permanent Non Détectable.

Les EPND sont les plus redoutés et définiront la fiabilité de notre système

Nota : Les SEL sont considérés comme des PSEE détectables (PSEED)

Cas Particulier des SEL

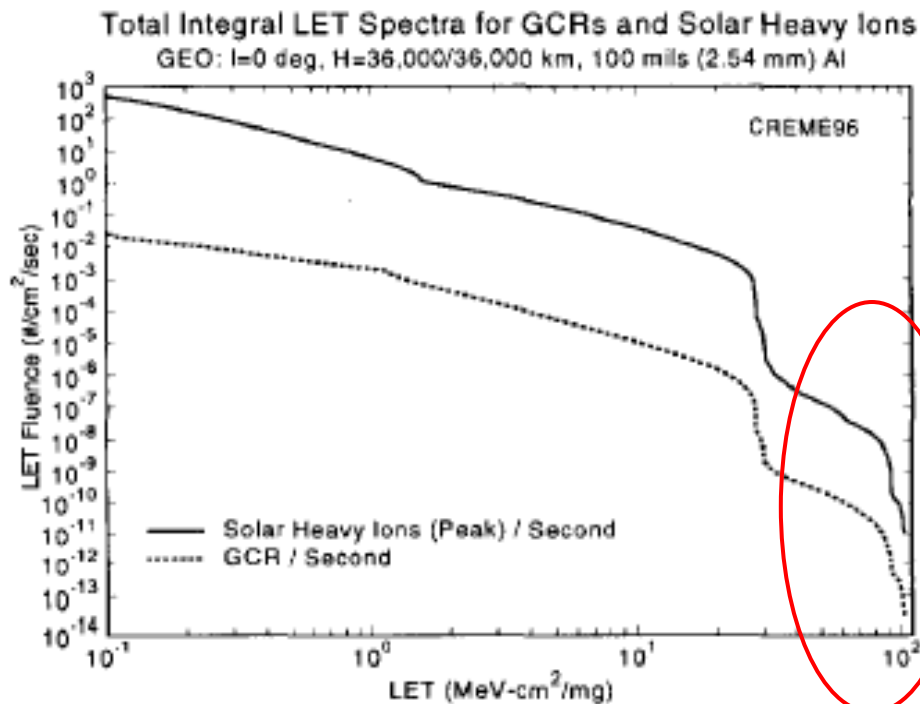
- Les SEL sont des PSEED redoutés car potentiellement destructifs
- Afin de pallier la contrainte de la boîte noire nous utilisons les infrarouges pour les localiser



Les camera IR sont très sensibles, et une variation de quelques dizaines de mK peuvent permettre de localiser un SEL

Définition du LET max nécessaire

- Plusieurs modèles GCR (Galactic Cosmic Ray) sont disponibles.
- CREME 86 (the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics), CREME 96, ISO 15390 ...



Ces modèles sont bien adaptés pour des particules jusqu'à $Z = 28$ (nickel).

- Au-delà c'est une terre inconnue !
- Déclarer des particules avec $Z > 30$ influencera les résultats de moins de 1%.

← Cette partie du spectre est extrapolée.

- $LET = 30 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$: $1 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} \sim 30 \text{ ans}$
- $LET = 60 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$: $1 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} \sim 300 \text{ ans}$
- $LET = 100 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$: $1 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} \sim 3 \text{ millions d'années}$

Conclusion : Il est nécessaire et suffisant de faire des caractérisations jusqu'au $LET = 30 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$
Au-delà ceci devient marginal, voire inconnu.

Résultats d'expérience : fonction de Weibull

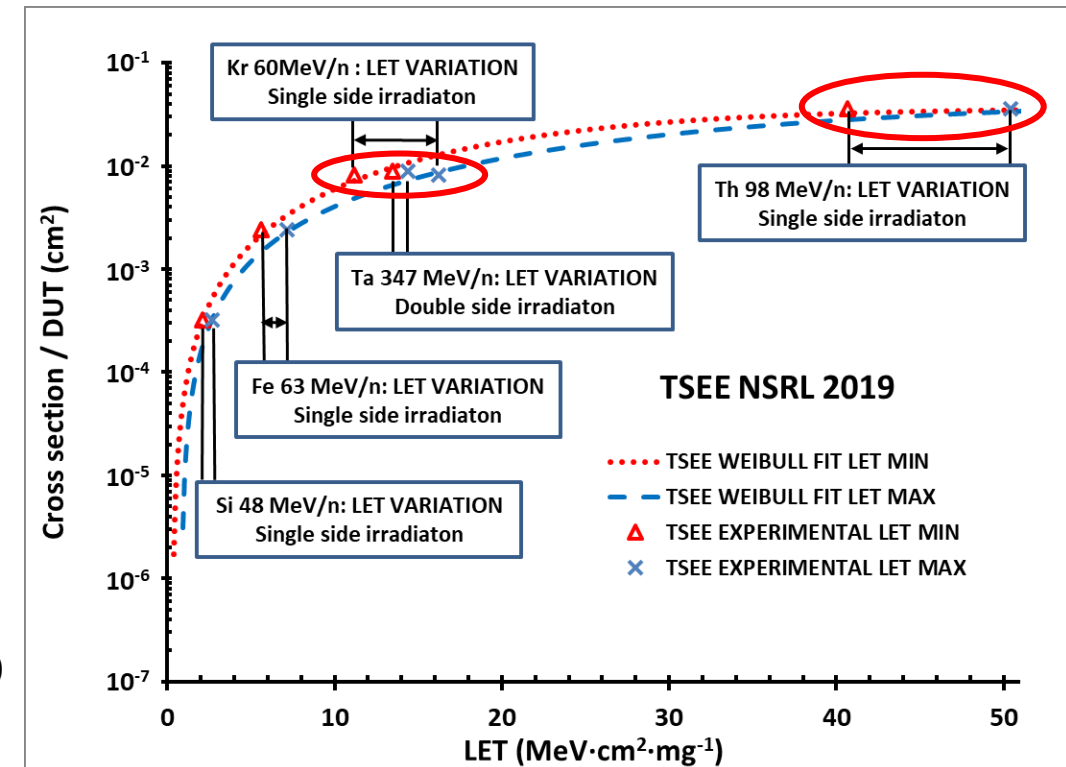
$$\sigma(L) = \sigma_{sat} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{L-L_0}{w}\right)^s} \right]$$

- Cette fonction est caractérisée par un LET seuil (L_0), une section efficace de saturation (σ_{sat}) et deux facteurs de forme (s et w).

Sélection des LET

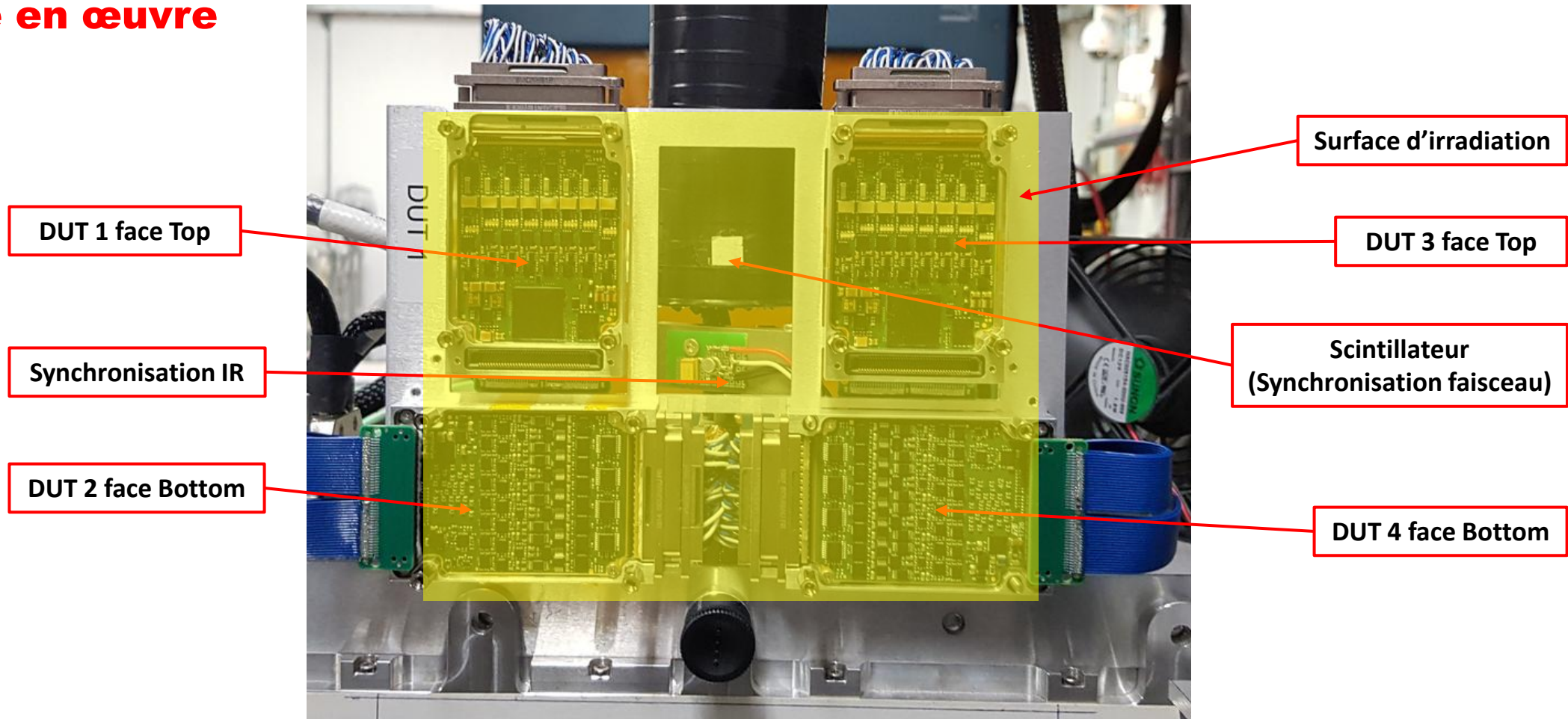
- Pour tracer la fonction nous avons besoin d'au minimum 4 à 5 valeurs de LET.
 - Un LET faible proche du seuil (L_0) $\sim 1 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$
 - Un LET fort pour la saturation (σ_{sat}). Dans notre cas, nous devons dépasser les $30 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$
 - Un LET proche des $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$
 - Un à deux LET intermédiaires pour affiner les facteurs de forme (s et w)

A LET équivalents nous sélectionnerons toujours l'ion le plus lourd.



Nota : Les composants COTS sont généralement sensibles et arrivent vite à la saturation. De ce fait, les variations à hauts LET n'influencent que peu le résultat final.

Mise en œuvre



Les systèmes de synchronisation sont indispensables pour calculer précisément la fluence pour chaque SEE

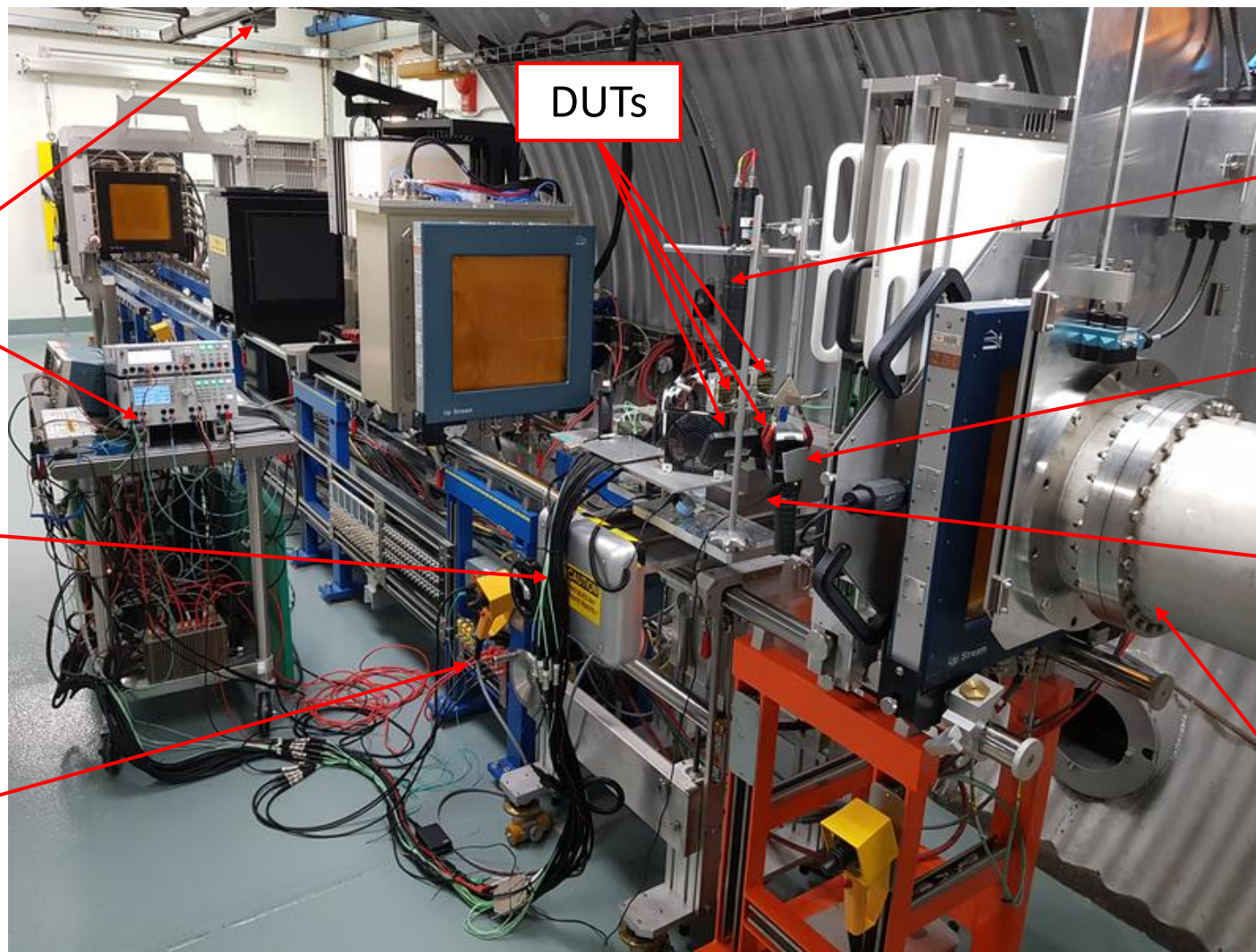
Mise en œuvre

Plusieurs WebCam

Banc de test

Distance maximale
entre le banc de test
et les DUTs : 1m50

Raccords avec la
salle de contrôle :
- 4 RJ45 minimum
- 4 BNC minimum



DUTs

Scintillateur

Camera IR

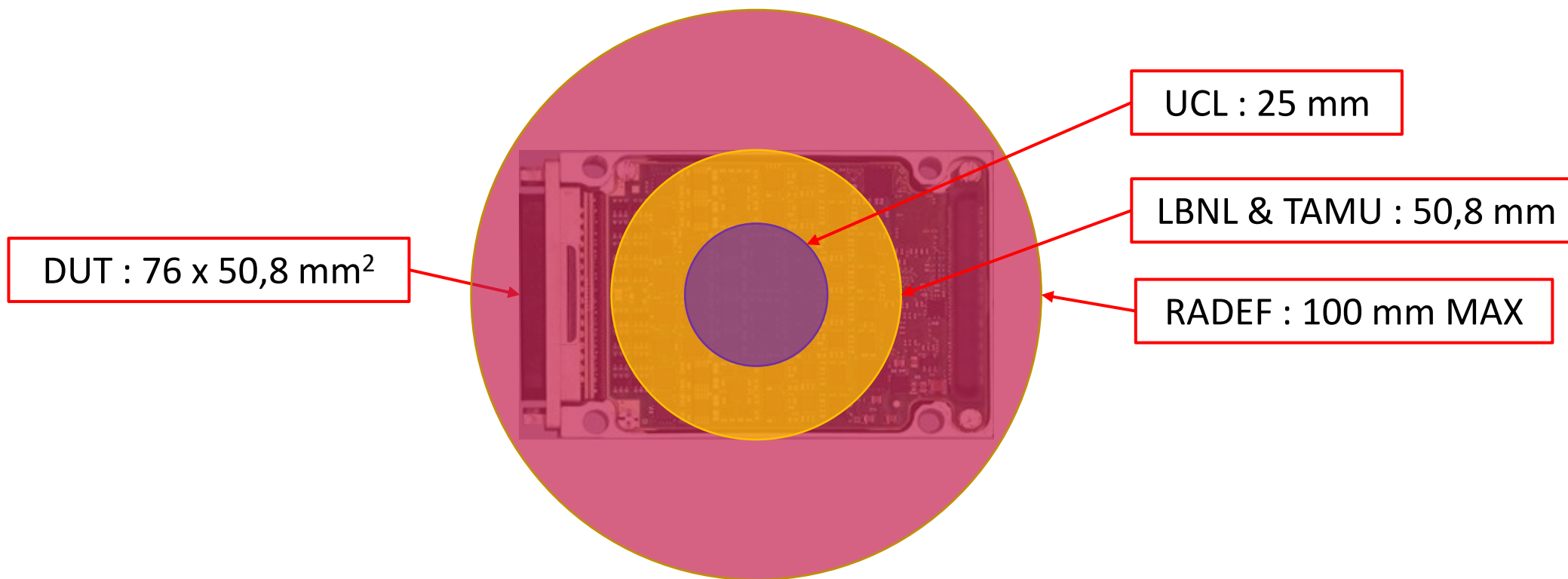
Blocs de protection
en tungstène

Tube d'arrivée du
faisceau d'ions

Les essais se réalisent sous atmosphère et température ambiante

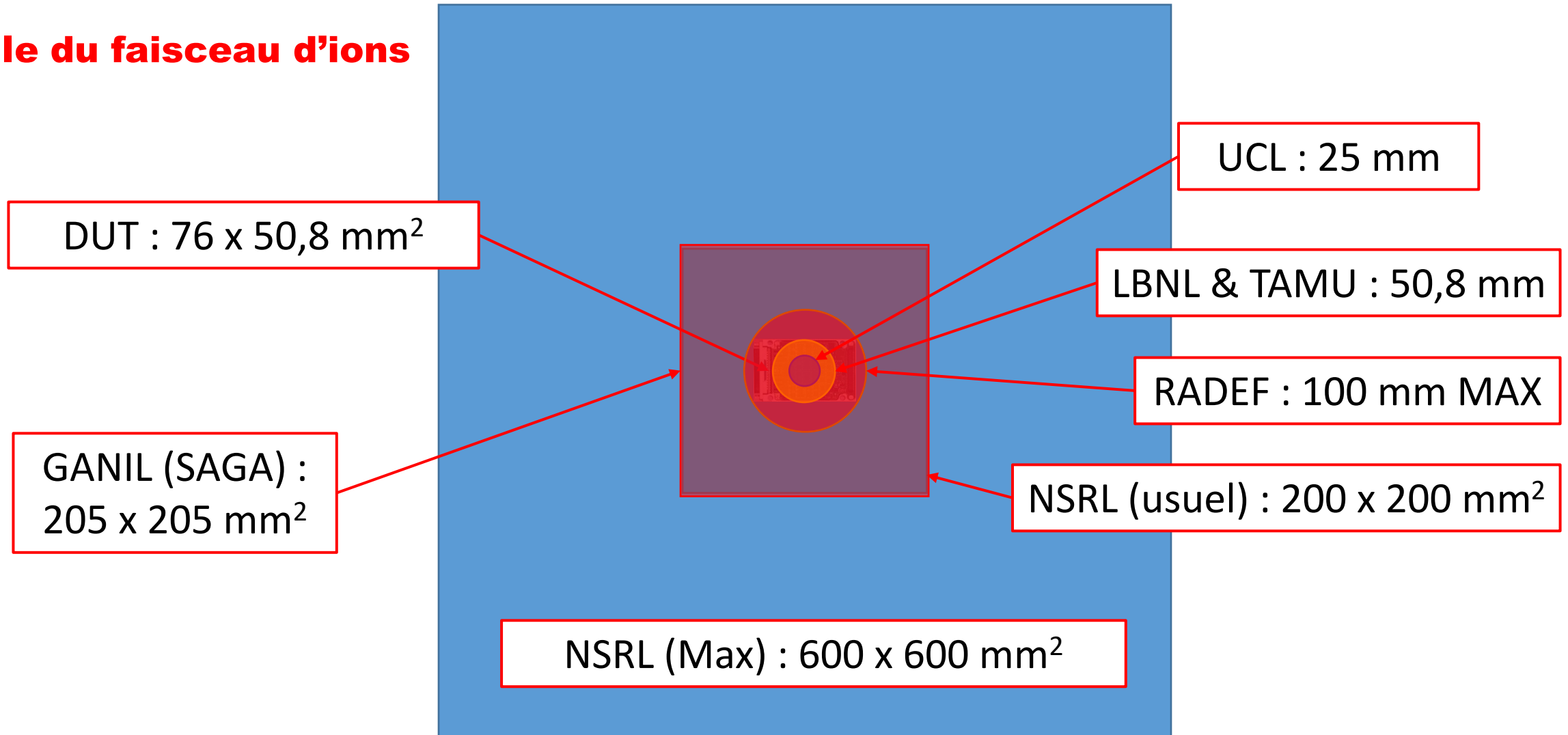
Important : La salle d'irradiation doit être accessible rapidement et à tout moment (faisceau coupé)

Taille du faisceau d'ions



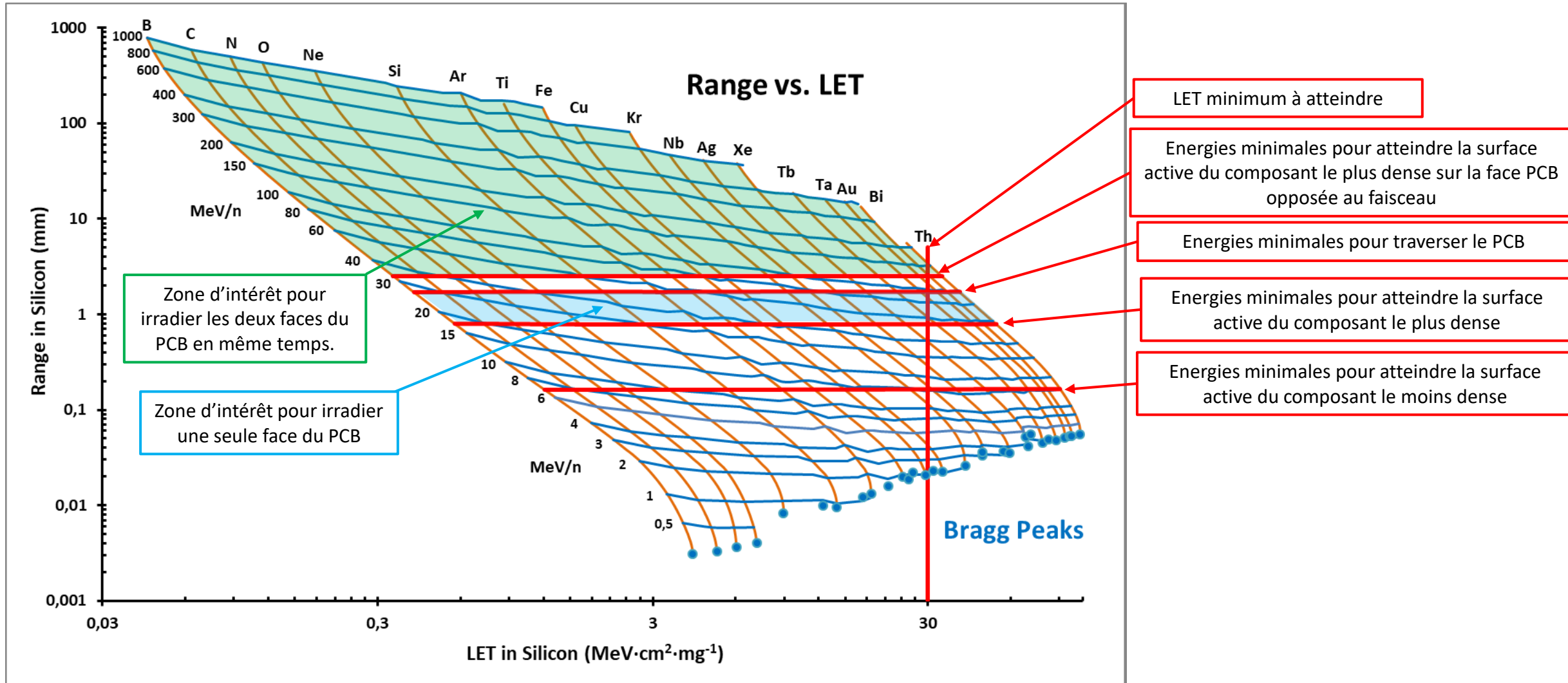
Notons que dans la possibilité n°1, il est nécessaire d'irradier 2 cartes à la fois (faces supérieure et inférieure)

Taille du faisceau d'ions

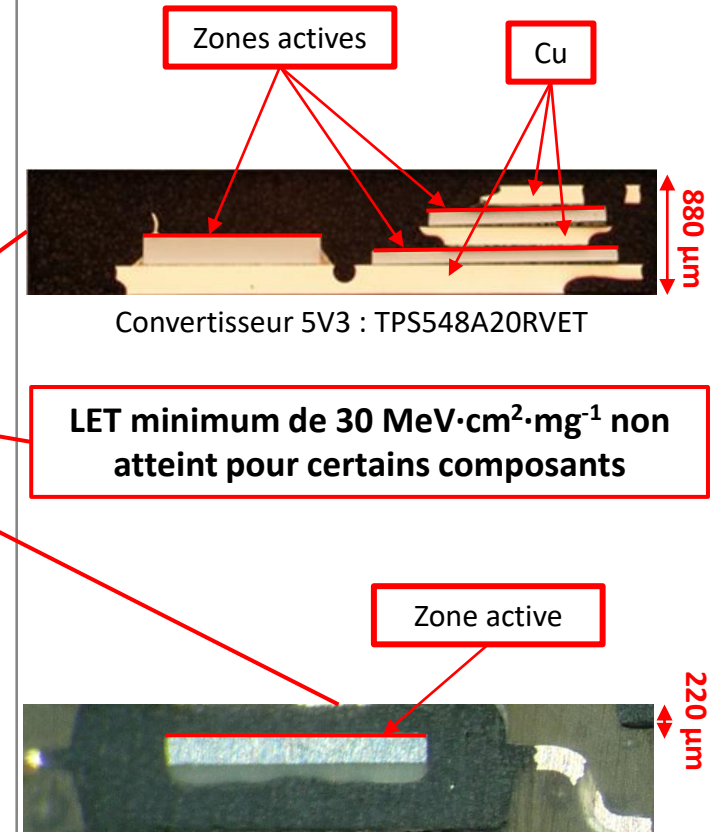
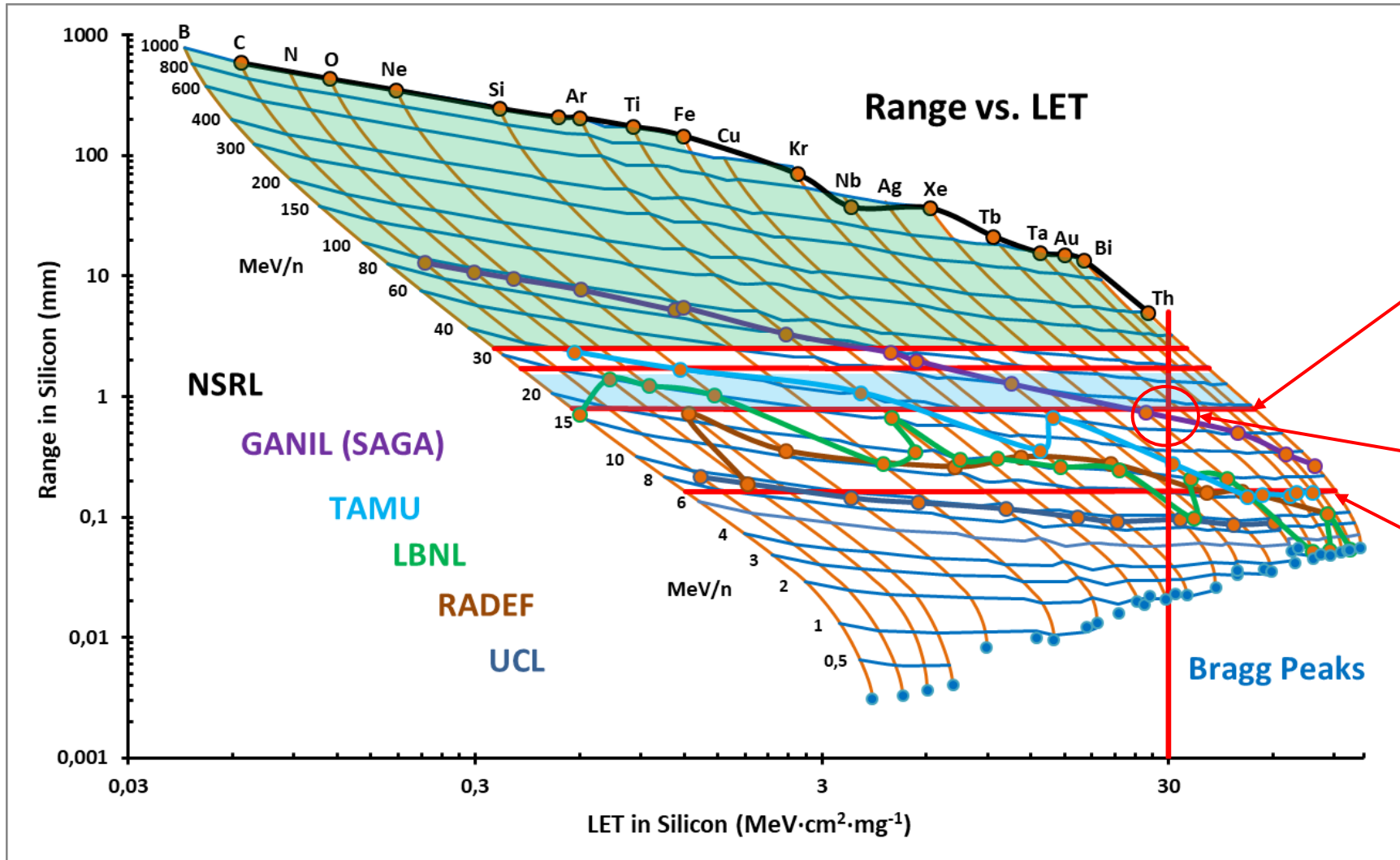


Le GANIL permettrait l'irradiation de plusieurs DUT à la fois

Energies du faisceau d'ions



Energies du faisceau d'ions



Choix de l'accélérateur de particule

- Seuls le GANIL et le NSRL permettraient la méthode système ions-lourds directement

Equipement	HIF	RADEF	LBNL	TAMU	GANIL (SAGA)	NSRL
Pays	Belgique	Finlande	US	US	France	US
Taille de faisceau	25 mm	100 mm Max 20x20 mm usuel	25,4 - 50,8 mm	25,4 - 50,8 mm	205 x 205 mm ²	Jusqu'à 600 x 600 mm ²
Homogénéité	± 10%	± 10%	± 10%	± 10%	± 10%	± 3%
Environnement	Vide	Vide ou Air	Vide	Air	Air	Air
Ions	Cocktail : 10,1 MeV/n (C) 10.8 MeV/n (Ne) 9.3 MeV/n (Al) 9.5 MeV/n (Ar) 9.7 MeV/n (Cr) 10 MeV/n (Ni) 9,2 MeV/n (Kr) 9.4 MeV/n (Rh) 8 MeV/n (Xe)	Cocktail 1 : 16,3 MeV/n (O,Ne,Ar,Fe,Kr,Xe) Cocktail 2 : 9.3 MeV/n (N,Ne,Ar,Fe,Kr,Xe)	Cocktails : 4.5 MeV/n (B->Bi) 10 MeV/n (B->Au) 16 MeV/n (He->Xe) 20 MeV/n (C->Xe) 30 MeV/n (N->Ar)	15 MeV/n (He->Au) 25 MeV/n (He->Xe) 40 MeV/n (N->Kr)	95 MeV/n (C->Si) 88 MeV/n (Al) 78 MeV/n (Ar) 76 MeV/n (Fe) 74 MeV/n (Ni) 60 MeV/n (Kr) 50 MeV/n (Xe) 40 MeV/n (Ta) 29 MeV/n (Pb) 24 MeV/n (Th)	2000 MeV/n (He->Ne) 1500 MeV/n (Si->Fe) 600 MeV/n (Kr->Ta) 400 MeV/n (Au) 200 MeV/n (Th)
Flux max	10 ⁴ /cm ² /s	10 ⁶ /cm ² /s	10 ⁸ /cm ² /s	10 ⁷ /cm ² /s	10 ⁴ /cm ² /s	10 ⁶ à 10 ⁹ /cm ² /Spill
Protons	75 MeV (LIF)	55 MeV	60 MeV	45 MeV	Non	2500 MeV
Neutrons	Oui (NIF)	Non	Oui	Non	Oui	Non
Possibilité n°1	NON	NON	Oui jusqu'au Ne	Oui jusqu'à l'Ar	Oui jusqu'au Xe	OUI
Possibilité n°2	NON	NON	NON	NON	Oui jusqu'à l'Ar	OUI

Il existe d'autres accélérateurs ions-lourds hautes énergies, comme le GSI (Allemagne) ou le CERN (Suisse), mais, soit ils ne sont pas accessibles aux industriels, soit les mises en œuvre sont incompatibles.

Bonnes Pratiques

- Pour un même LET prendre l'ion le plus lourd.
- Pour une caractérisation de composants COTS, atteindre un LET de $30 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ est suffisant.
- Pour des $\text{LET} > 15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$, il est recommandé d'irradier qu'une seule face du PCB.
- Les tests ions-lourds sont privilégiés pour la caractérisation des SEE destructifs tel que les SEL. Il est recommandé de faire préalablement des essais protons.
- Masquer certaines zones (FPGA par ex) pour converger sur les autres composants fautifs.

Avantages de la méthode

- Pas d'ouverture des puces et tous les composants actifs sont irradiés.
- Prend en compte le firmware. Reflet réel du système.
- Rapide et faible coût.
- Plus proche de l'environnement spatial.

Inconvénients de la méthode

- Impose l'accès à des Ions-Lourds de très hautes énergies (NSRL, GANIL, CERN ?).
- Les résultats sont liés au firmware.
- Boite noire.

Bibliographie

- [R1] : Wikipedia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Atome>
- [R2] : ACROnique du nucléaire n°37, juin 1997
- [R3] : R. Baumann, K. Fruckmeyer, “Radiation Handbook for Electronics,” Texas Instruments SGZY002, Mar. 2019
- [R4] : Brookhaven National Laboratory, “Radiological worker 1 training study guide”, Feb. 17th 2017
- [R5] : R. Ecoffet, “Space environment”, CNES, May. 24th 2017
- [R6] : C. Tscherne, “Space Radiation Environment and Total Ionizing Dose”, RADECS 2021, Short Course, 13th Sept. 2021
- [R7] : I. Chatterjee, “Basic Mechanisms and Testing of Complex Devices”, RADECS 2021, Short Course, 13th Sept. 2021
- [R8] : A. de Bibikoff, “Method for System-level testing of COTS electronic board under High Energy Heavy Ions”, RADECS 2019, IEEE DOI 10.1109/TNS.2020.3013952, 2020
- [R9] : C. Weulersse, “A Monte-Carlo Engineer Tool for the Prediction of SEU Proton Cross Section from Heavy Ion Data,” IEEE RADECS 2011, Proceedings [E-5], pp. 1-4, Sept. 2011.
- [R10] : A. de Bibikoff, “Caractérisation efficiente des systèmes COTS aux environnements radiatifs spatiaux”, RADSOL 2016, 24 juin 2016
- [R11] : SRIM© & TRIM [Online]. Available: <http://www.srim.org>.
- [R12] : A. Sicard, “Trapped particules models”, OMERE 5.0 Workshop, Toulouse, 14-15 mai 2017
- [R13] : R. Ecoffet, “Cosmic rays”, OMERE 5.0 Workshop, Toulouse, 14-15 mai 2017
- [R14] : R. Ecoffet, “Radiation effects in space : on-going issues and new concerns”, OMERE 5.0 Workshop, Toulouse, 14-15 mai 2017
- [R15] : F. Perez, “Overview of ESA Cubesat Missions and Radiation Testing on Cubesat Electronics”, RADECS 2021, Short Course, 13th Sept. 2021



NRTW 2025

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 19 et Jeudi 20 mars 2025 | GANIL – Bd Henri Becquerel, 14000 Caen

merci pour votre écoute !

Organisé par :

