

IRRADIATIONS DE CIRCUITS MICRO ÉLECTRONIQUES

Françoise BEZERRA
Experte Sénior Radiations - CNES

ATELIER « ACCÉLÉRATEURS, RECHERCHE ET SOCIÉTÉ » - Session « Matière Inerte »

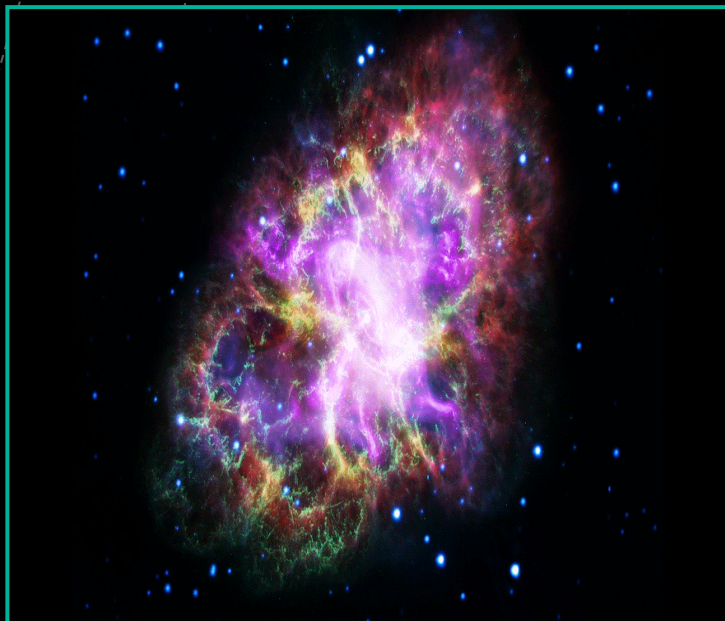


01

POURQUOI TESTER DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES?

LES SOURCES DE RAYONNEMENTS IONISANTS DANS L'ESPACE

POURQUOI TESTER DES
COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES?

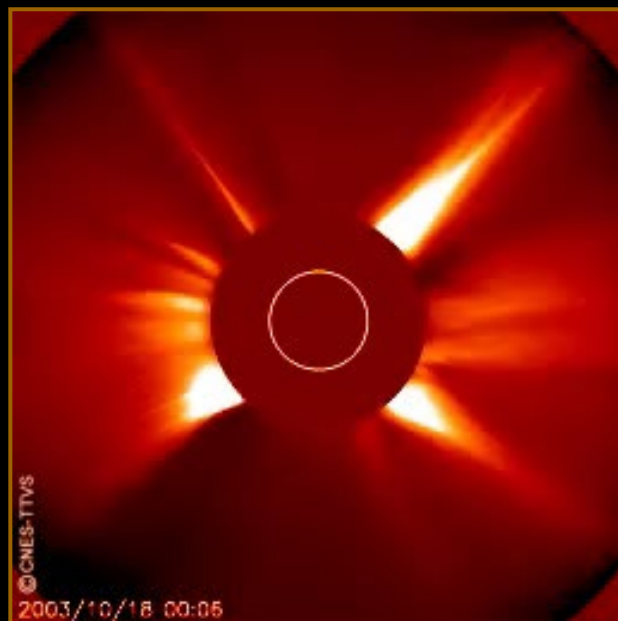


**Rayons Cosmiques
(GCR)**

Protons

Ions

Abondance max ~300 MeV/n
Energie max ~ 10 GeV/n

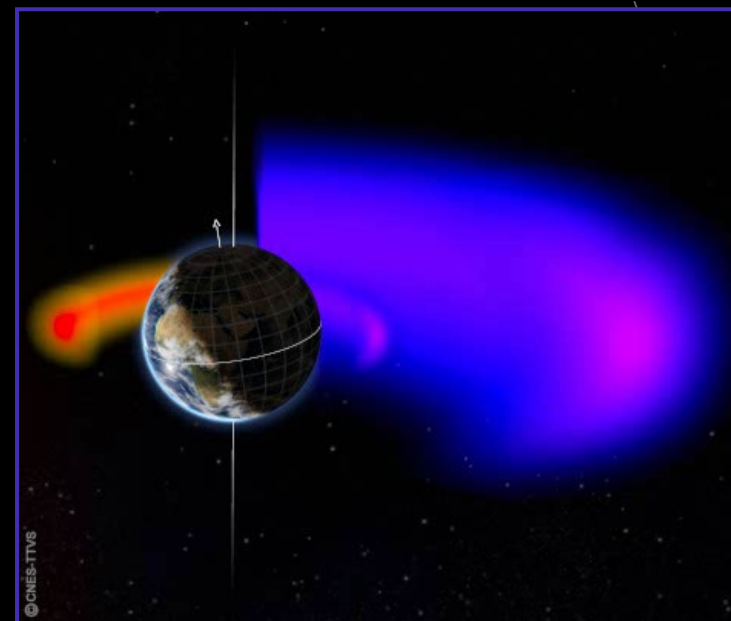


Soleil & éruptions

Protons

Ions

keV- 500 MeV qq 1-10 MeV/n



Ceintures de Van Allen

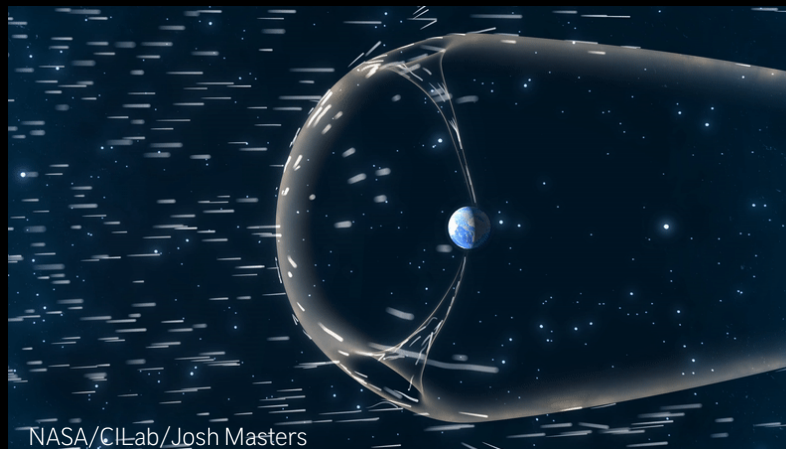
Protons

Electrons

keV- 500 MeV eV - ~ 10 MeV

ENVIRONNEMENT RADIATIF NATUREL ATMOSPHERIQUE

Protection par champ magnétique
Terrestre sauf sur les pôles

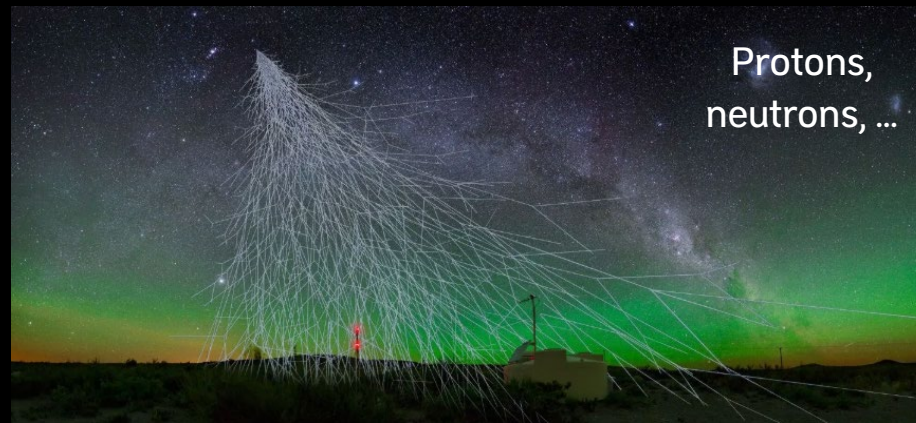


Interaction avec les atomes de l'atmosphère:

Photons

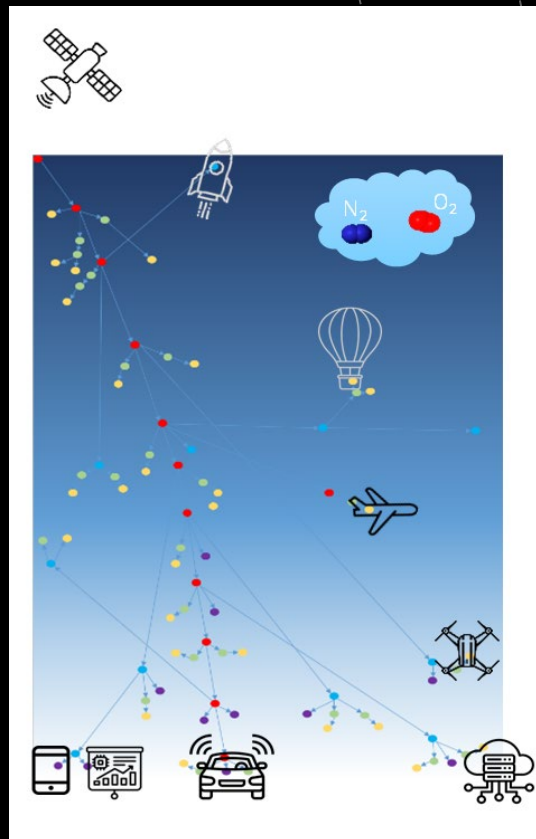


Protons,
neutrons, ...



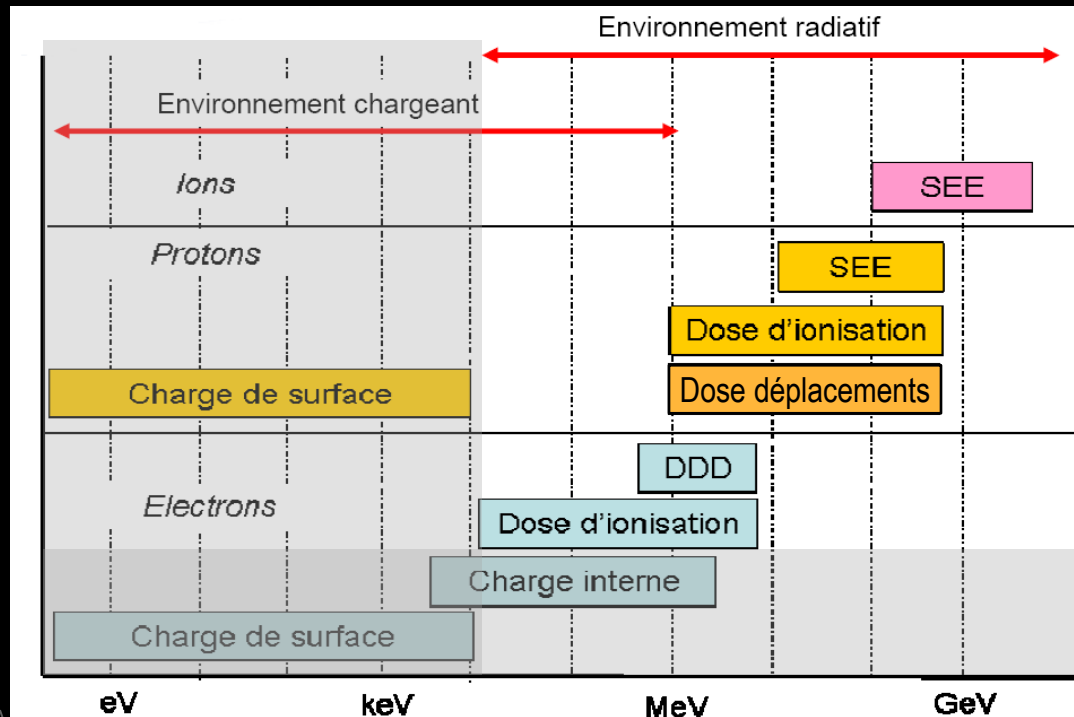
Vue d'artiste d'une pluie de particules engendrée par des rayons cosmiques, au dessus de la plaine argentine où sont installés les capteurs de l'Observatoire Pierre Auger. A Chantelauze, S. Staffi, L. Bret

POURQUOI TESTER DES
COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES?



EFFETS REDOUTÉS SUR LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES ACTIFS

EFFETS
REDOUTÉS



Effets singuliers

Single Event Effects

- Passage d'une seule particule (probabiliste)
- Espace ou atmosphère

Effets cumulatifs

Effets de dose

- Dégradation progressive
- Spécifiques au spatial



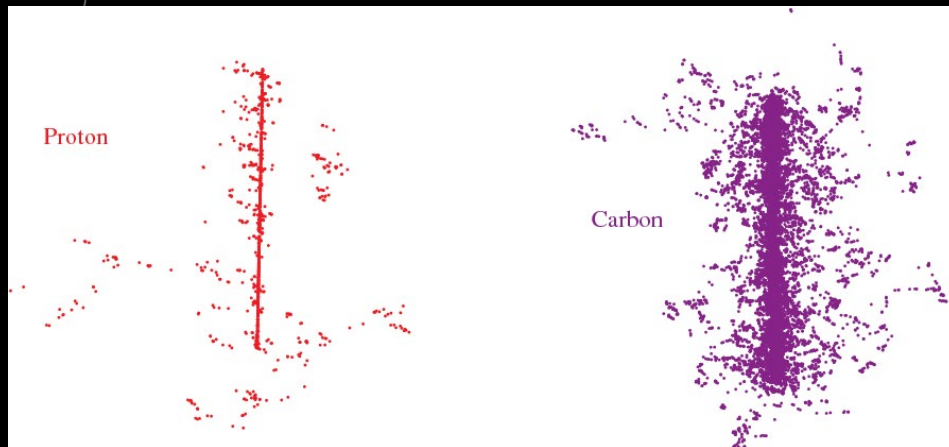
Fort effet du blindage (atténuation, secondaires,...)

MECANISMES DE PERTE D'ÉNERGIE

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES

IONISATION

$$\text{LET} = f(p, E_p, \text{Mat})$$

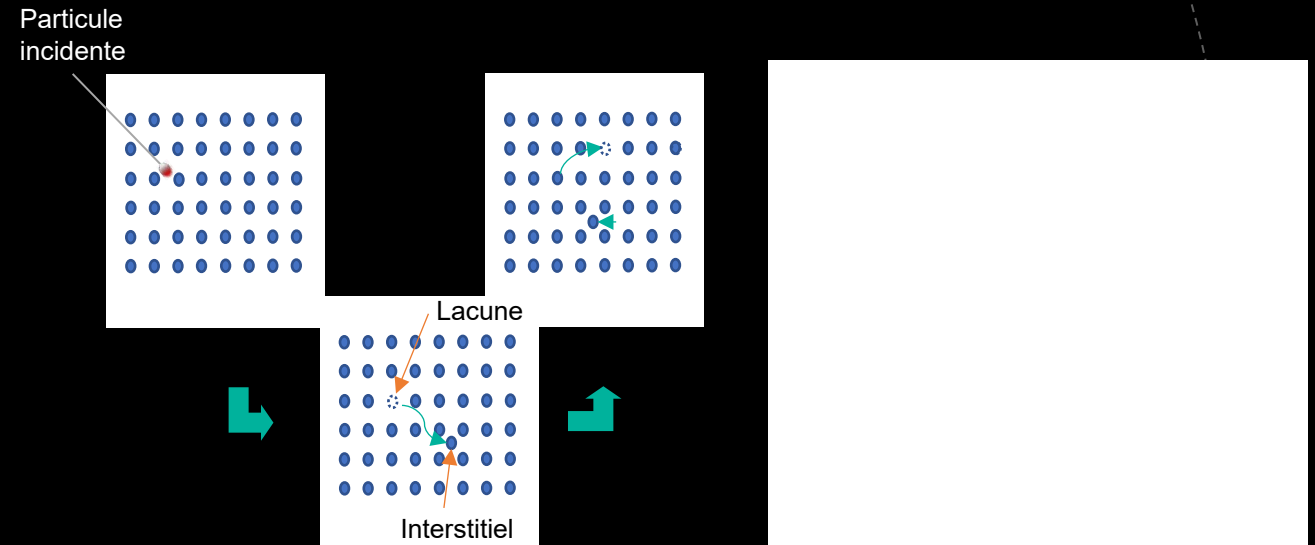


Dépôt d'énergie d'un proton et d'un ion Carbone dans 1µm d'épaisseur d'eau pour une énergie incidente de 1 MeV/n.

Bäckström, G. (2013). Protons, other Light Ions, and 60Co Photons : Study of Energy Deposit Clustering via Track Structure Simulations.

DÉFAUTS DE DÉPLACEMENTS

$$\text{NIEL} = f(p, E_p, \text{Mat})$$



Création de défauts de déplacements ou de clusters de défauts dans un réseau d'atomes

A. Jay et al., Simulation of Single Particle Displacement Damage in Silicon–Part II: Generation and Long-Time Relaxation of Damage Structure, IEEE-TNS vol:64 (2017)

EFFETS CUMULATIFS (DE DOSE)

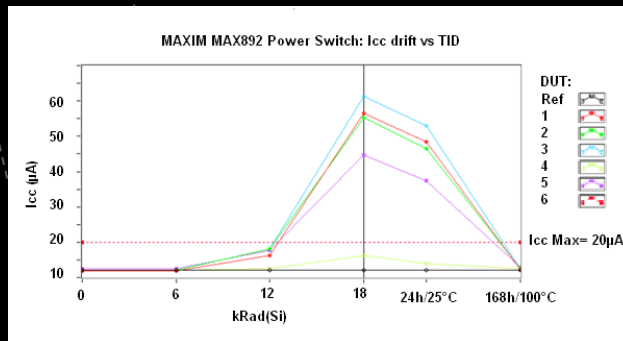
EFFETS
REDOUTÉS

Affectent composants et matériaux

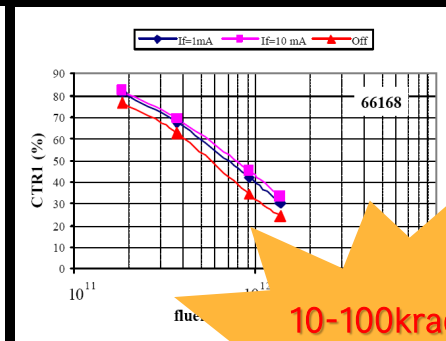
Fort effet du blindage

Dose ionisante

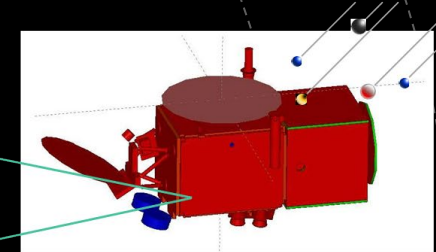
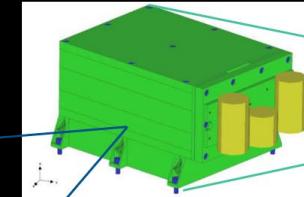
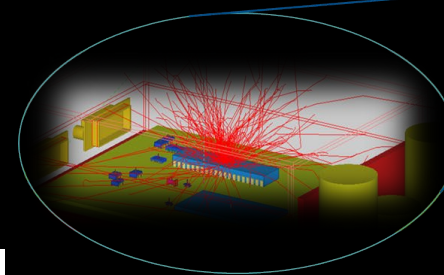
Dose de déplacement



©CNES/TRAD



10-100krad
0,1-1kGy



10Mrad-1Grad
0,1-10MGy

LES EFFETS DE DOSES DANS LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

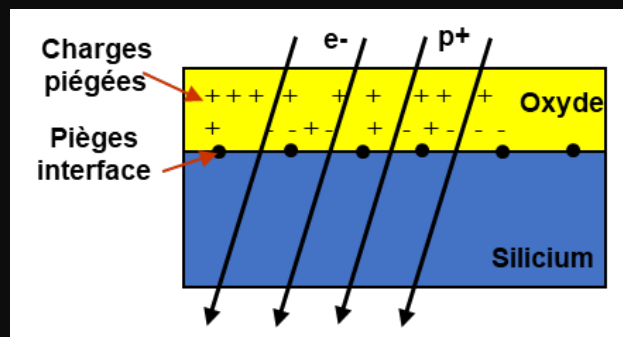
EFFETS
REDOUTÉS

Dose = Effet résultant de la contribution de nombreuses particules:

Dégradation progressive et vieillissement prématuré jusqu'à perte de fonctionnalité

Dose Ionisante: TID

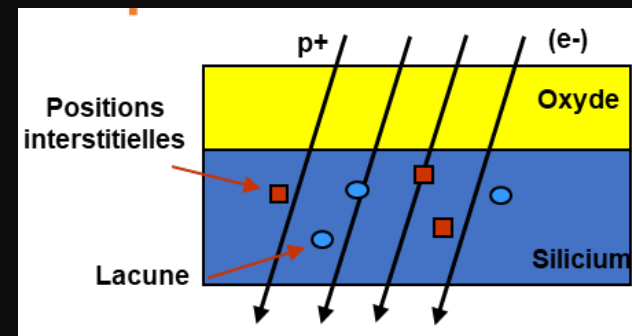
Total Ionizing Dose



⇒ Accumulation de charges dans les oxydes

Dose non Ionisante: TNID/DDD

Total Non Ionizing dose
/ Displacement Damage Dose



⇒ Apparition de défauts de déplacements dans les zones actives

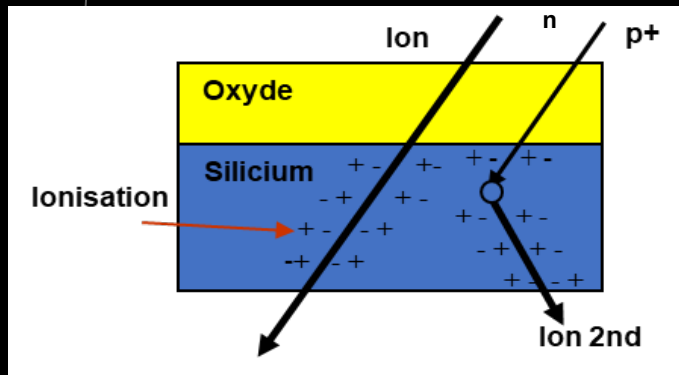
LES EFFETS SINGULIERS (SEE) DANS LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

EFFETS
REDOUTÉS

Effet résultant du passage d'une particule unique:

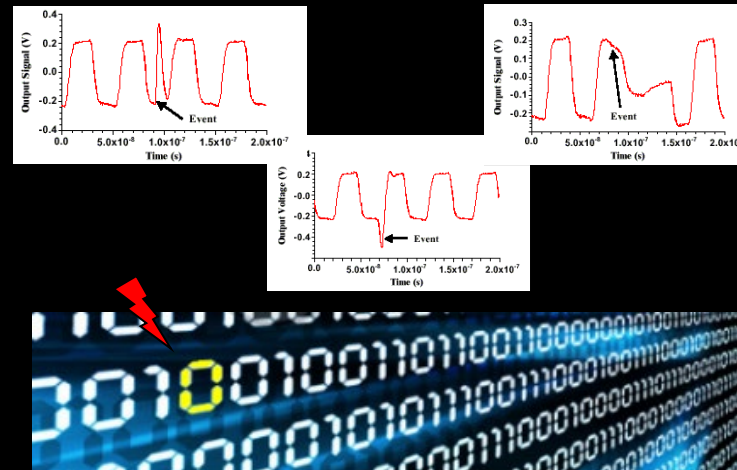
Effet immédiat, probabiliste

Ionisation directe ou indirecte



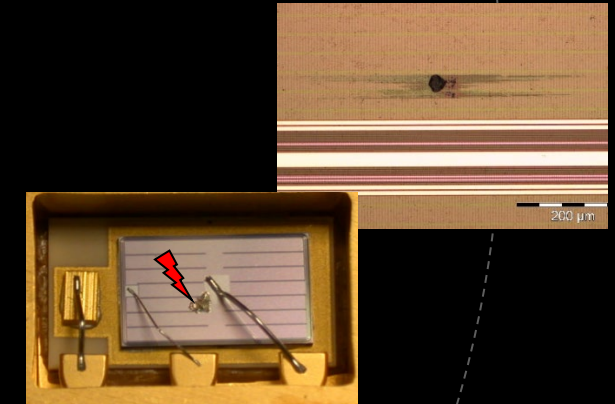
- ⇒ Collection de charge dans les zones actives
- ⇒ Perturbation de nature électronique

SEE non destructifs

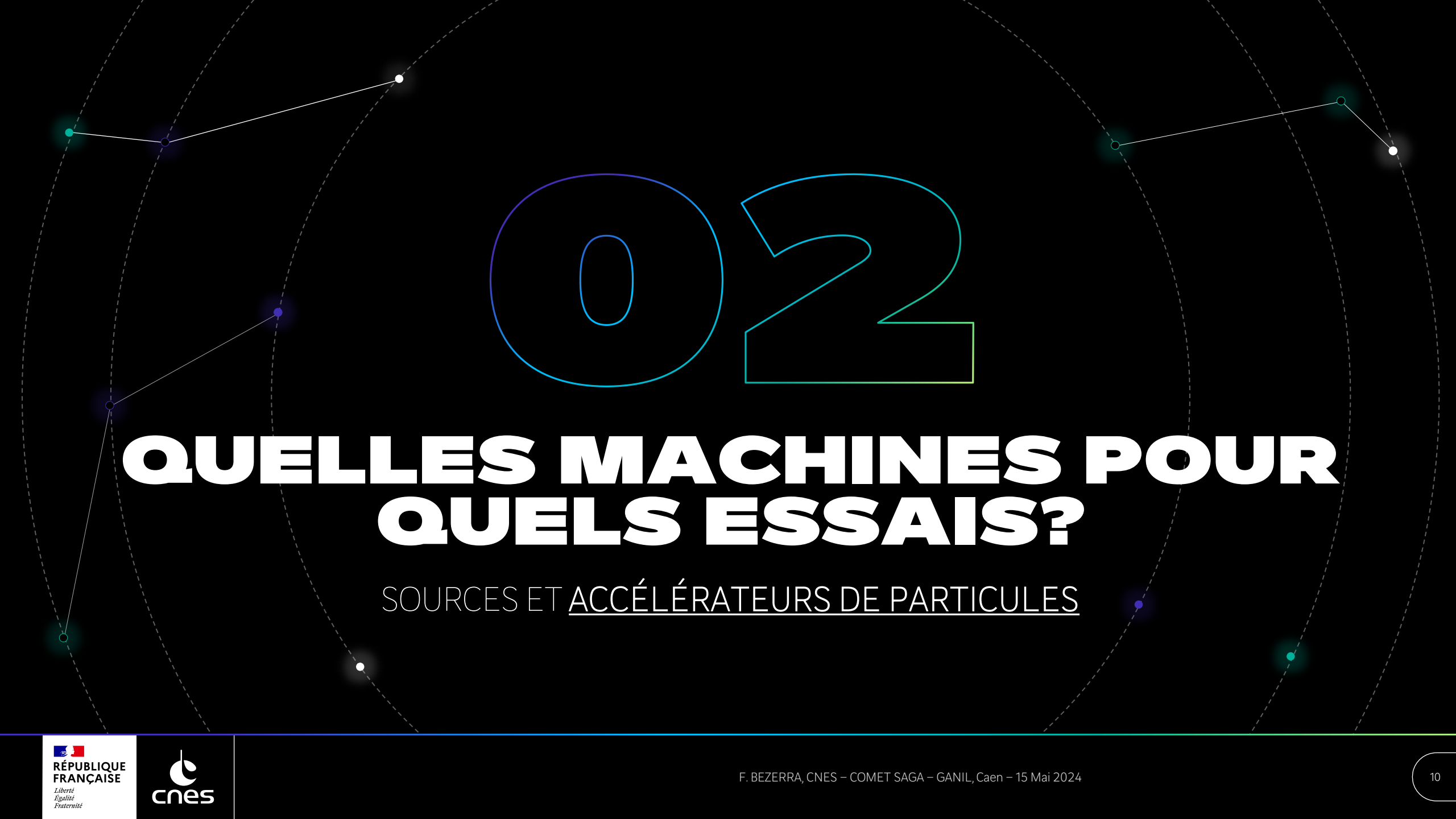


- ⇒ Bruit transitoire
- ⇒ Corruption de données

SEE destructifs



- ⇒ Court circuit
- ⇒ Destruction thermique



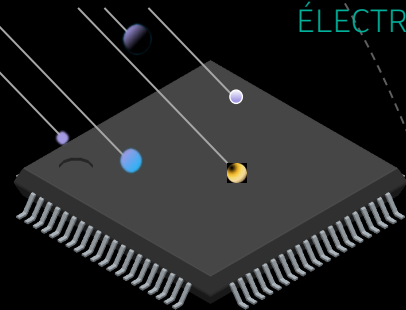
02

QUELLES MACHINES POUR QUELS ESSAIS?

SOURCES ET ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

MOYENS D'ESSAIS POUR LE TEST DE COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

INSTALLATIONS POUR LE TEST DES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES



Moyens d'essais utilisés pour les applications spatiales

	Dose Ionisante (TID)	Dose non Ionisante ou de déplacements (TNID/DDD)	Single Events (SEE)
Source Co60	Gamma 1,17 et 1,33 MeV		
Accélérateurs d'ions lourds			LET équivalent: 0-60MeV/(mg/cm ²) Range >40 ou 60µm
Accélérateurs de protons		NIEL équivalent qq MeV-200MeV * 20-60MeV	20-200MeV * 20-500MeV

* Valeurs autorisées par les normes



Atmosphérique: Faisceaux de neutrons (Spectre ou Quasi monoénergétique)

Homogénéité requise: 10% (énergie et flux)

MOYENS D'ESSAIS POUR LE TEST TNID

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES

Faisceaux de protons Energie 50MeV

Faisceau diffusé ou balayé (dose) - dans l'air

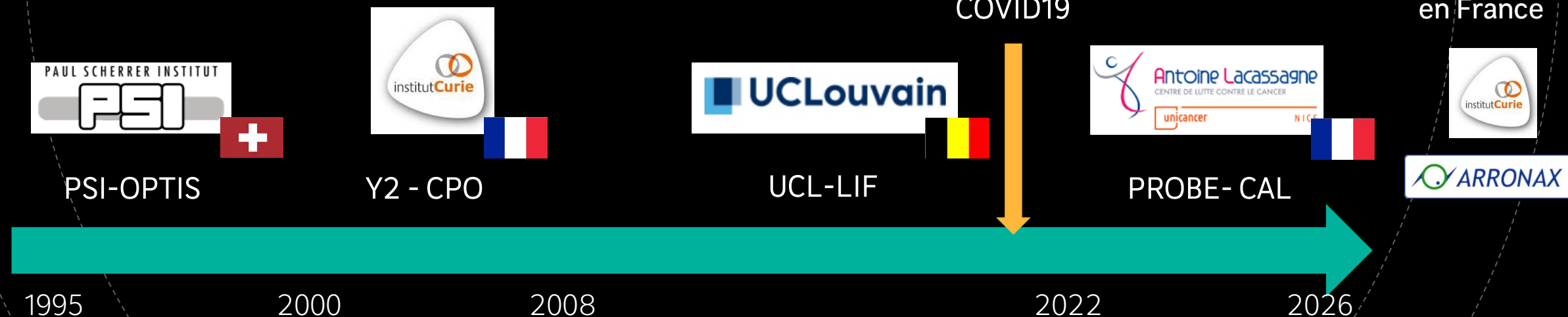
Pas besoin d'ouvrir les DUTs (Devices under Test).

Irradiation passive (sans polarisation) à température ambiante.

NIEL équivalent



Activation => quarantaine



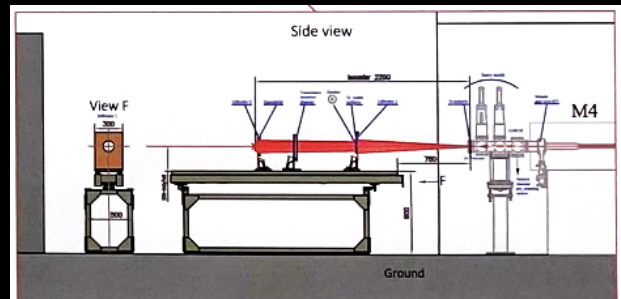
LA LIGNE PROBE AU CAL (Nice)

MEDICYC (1990, in-house)

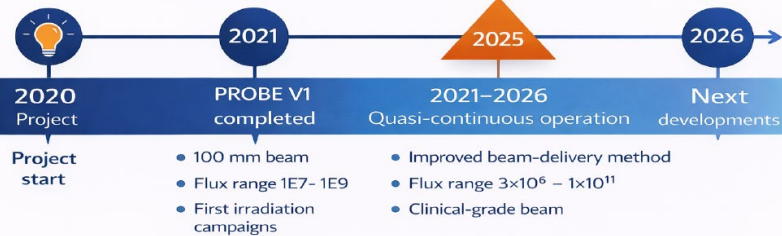
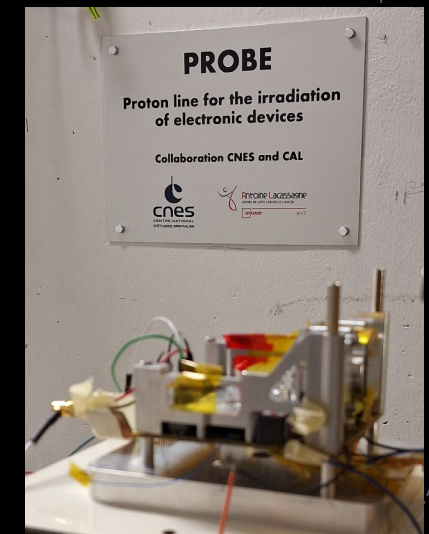
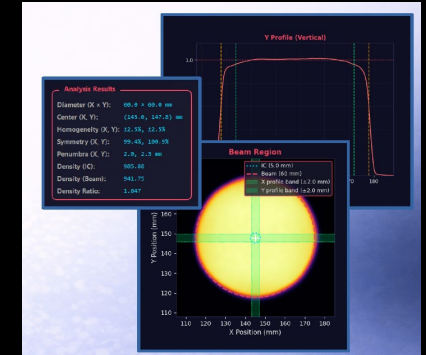
- 65 MeV isochronous cyclotron
- Clinical + R&D beam-lines



Protons 10-63 MeV
Diamètre faisceau 50/100 mm
Monoenergetique – Pulsé
Monitoring fluence
Accès type: Lundi en journée



INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES



MOYENS D'ESSAIS POUR LE TEST SEE PROTONS

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES

Faisceaux de protons Energie 20-200MeV

Faisceau diffusé obligatoire - dans l'air

Pas besoin d'ouvrir les composants.

Irradiation active: le composant doit fonctionner pendant qu'il est irradié

Température variable

Représentatifs des protons de l'ERN



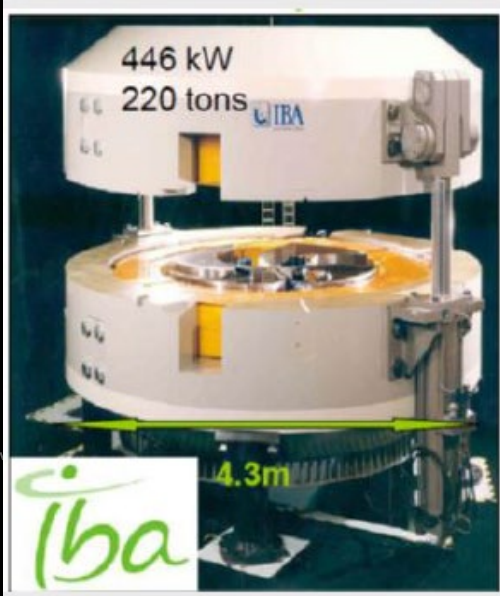
Activation => quarantaine

Distance opérateur/Banc de test/DUT



LA LIGNE Y1 DE L'INSTITUT CURIE (Orsay)

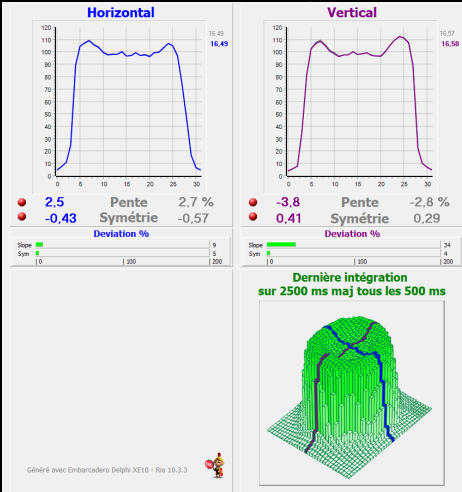
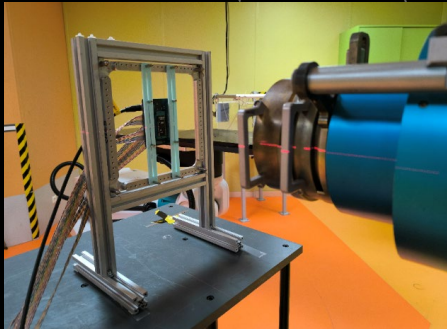
INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES



Room	Y1
Beam conformation	Broad beam - Brass collimators adapted to any diameter/shape.
Diameter	5 mm to 130 mm
Energy of protons	60 MeV < E < 194 MeV
Delta E	<1MeV
Flux*	10 ⁶ – 5.10 ⁸ p/cm ² /s (10 – 2000 rad/min in water)

Accès type: En semaine, après les soins aux patients pour 8h

230 MeV IBA cyclotron (C235)
isochronous– quasi-continuous proton beams with RF frequency ~106 MHz
Energy Selection System (ESS) using degraders



AUTRES MOYENS D'ESSAIS PROTONS POUR LE TEST SEE

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES

Très ponctuellement pour les SEE (R&D):



BL1B

Energie 220-500MeV

**Très hautes
énergies (GCR)**

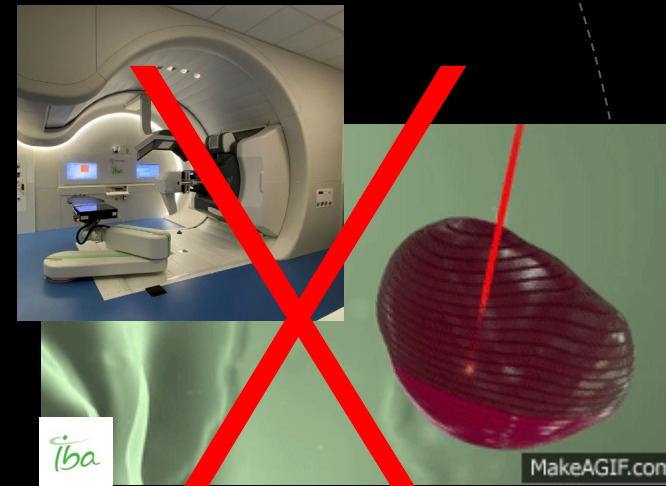


0,1-3MeV



0,1-2MeV

**Etude de l'ionisation
directe des protons**



**Pencil Beam Scanning
inadapté aux tests SEE**

MOYENS D'ESSAIS POUR LE TEST SEE IONS LOURDS

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES

Faisceaux d'ions mono-énergétiques d'énergie 1~100 MeV/u

LET équivalent aux GCR

L'énergie doit permettre un faisceau suffisamment pénétrant pour maîtriser le LET au niveau des volumes sensibles.

Range >40µm pour SEE non destructifs, >60µm pour SEE destructifs (ESCC25100)

Préparation des composants nécessaire (retrait du boîtier / amincissement de puce).

Irradiation active: le composant doit fonctionner pendant qu'il est irradié

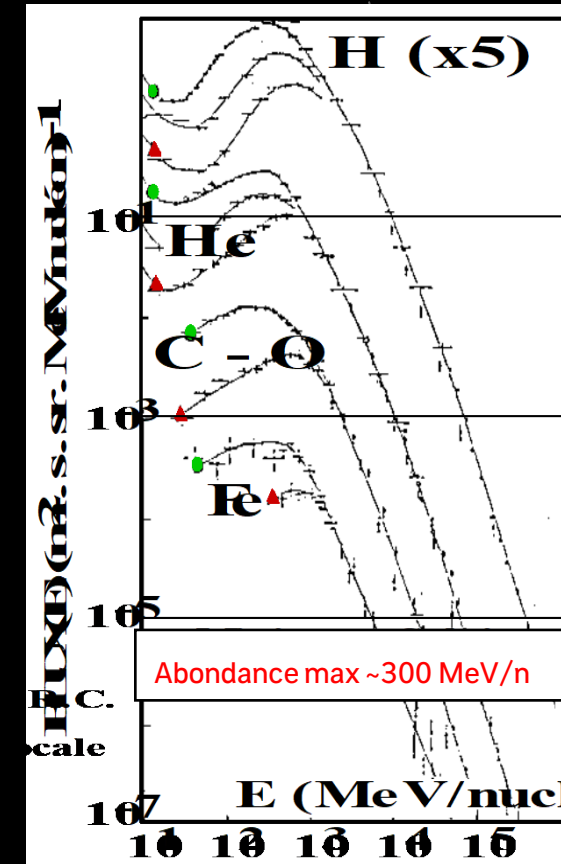
Température variable.

$E < 10 \text{ MeV/u}$:

- Enceinte sous vide
- Travail à proximité
- Passages de câbles

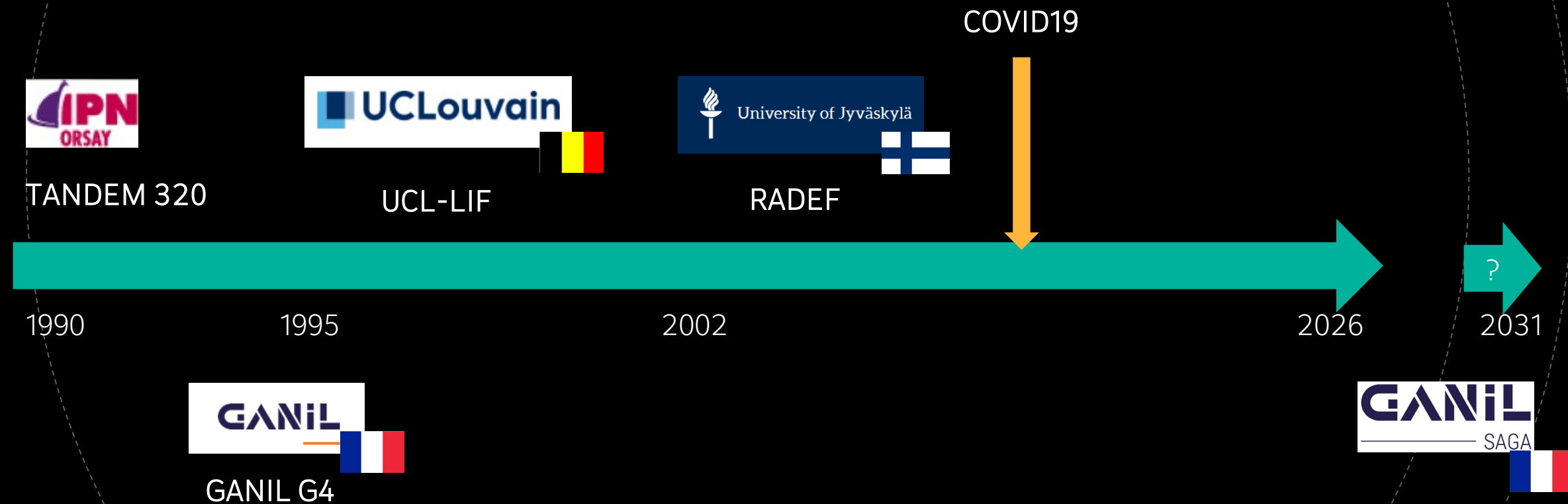
$E > 10 \text{ MeV/u}$:

- Dans l'air
- Activation => quarantaine
- Distance opérateur/Banc de test/DUT



MOYENS D'ESSAIS POUR LE TEST SEE IONS LOURDS

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES

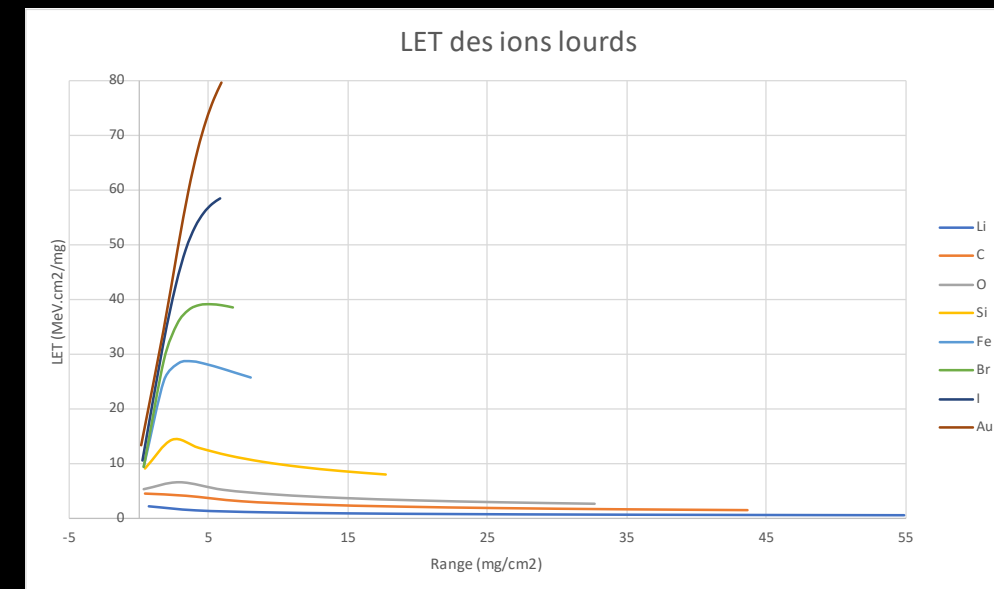
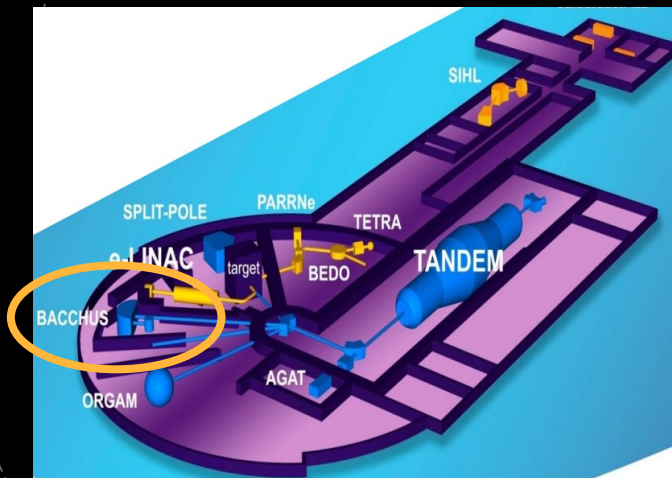


TANDEM DE L'IPN (ORSAY): ALTO

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES



Faisceau dans le vide
Différents ions
Energie max réduite => Range limité



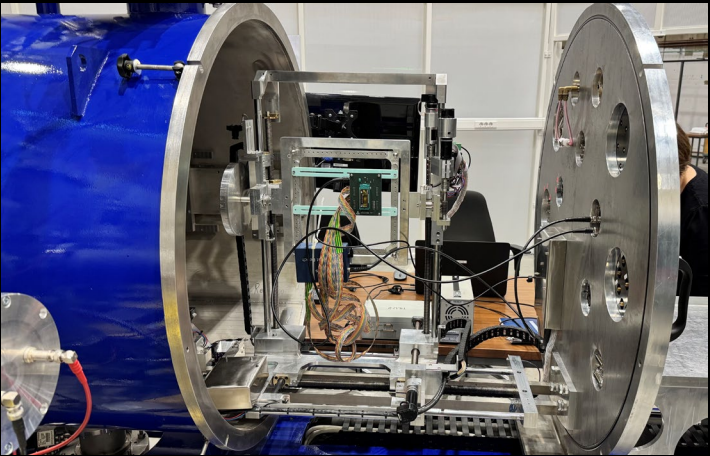
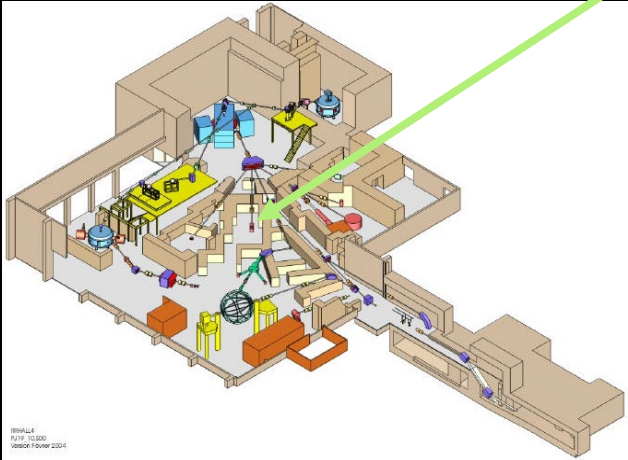
Abandonné fin des années 90.
Peut servir ponctuellement pour de la R&D

UCLouvain: HEAVY ION FACILITY

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES

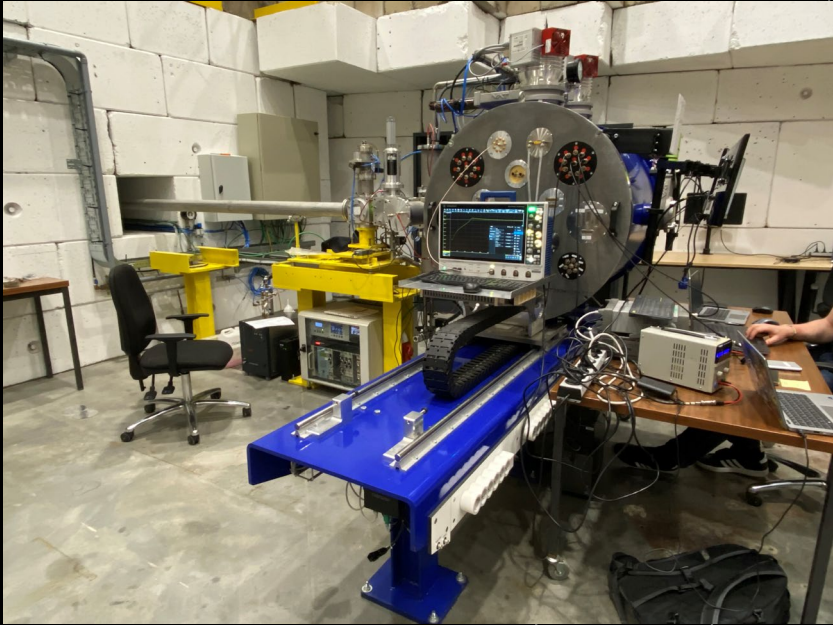


HIF line



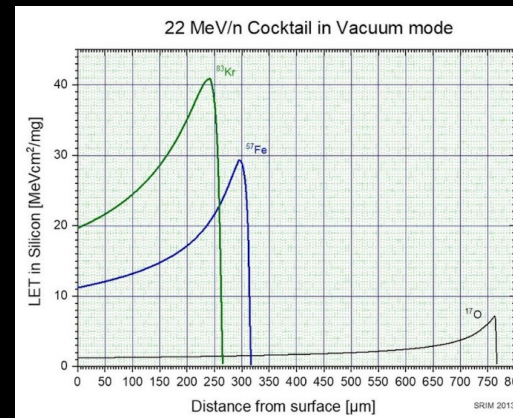
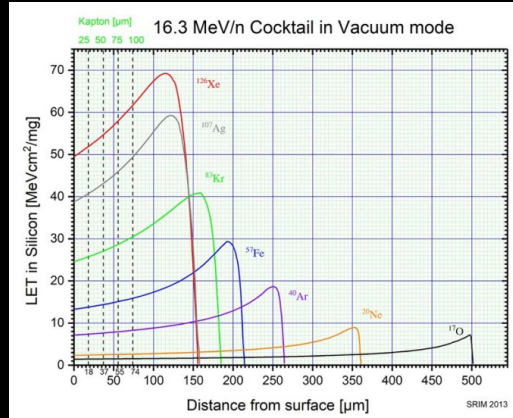
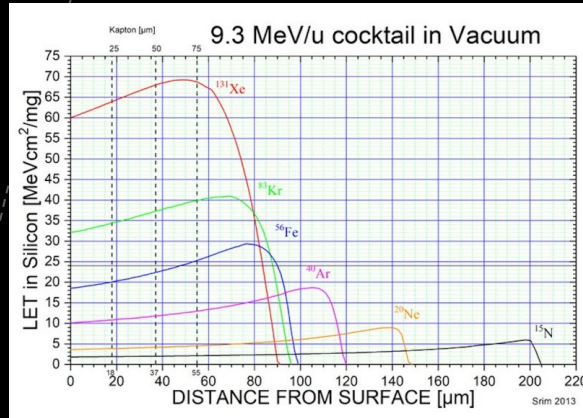
Faisceau dans le vide
Cocktail d'ions
Energie max 9,3MeV/u
Accès: 20 semaines /an, 24h/24
Délai: ~6 mois

Ion	Energy on device	Range on device	LET on device
	[MeV]	[μm]	[MeV/(mg/cm ²)]
⁷ Li ²⁺	62	448,0	0,35
¹³ C ⁴⁺	133	276,2	1,2
²² Ne ⁷⁺	242	207,7	3,2
²⁷ Al ⁸⁺	257	137,2	5,6
³⁶ Ar ¹¹⁺	365	119,3	9,7
⁵³ Cr ¹⁶⁺	525	110,9	15,8
⁵⁸ Ni ¹⁸⁺	607	106,8	19,9
⁸⁴ Kr ²⁵⁺	808	99,5	31,7
¹⁰³ Rh ³¹⁺	1013	92,6	45,0
¹²⁴ Xe ³⁵⁺	1073	78,5	61,3

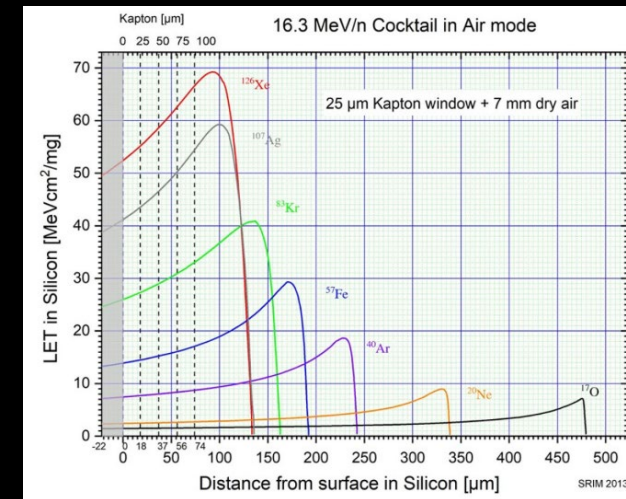


RADEF: RADIATION FACILITY

INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES



Faisceau dans air ou le vide
Cocktails d'ions
Energie max 22MeV/u
Accès: variable, difficile, en journée
Délai: plusieurs mois



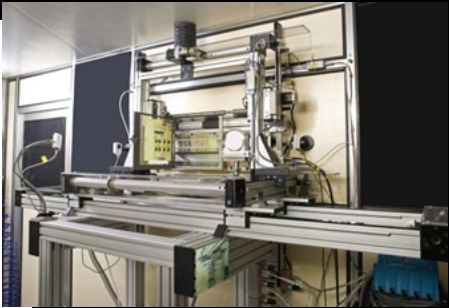
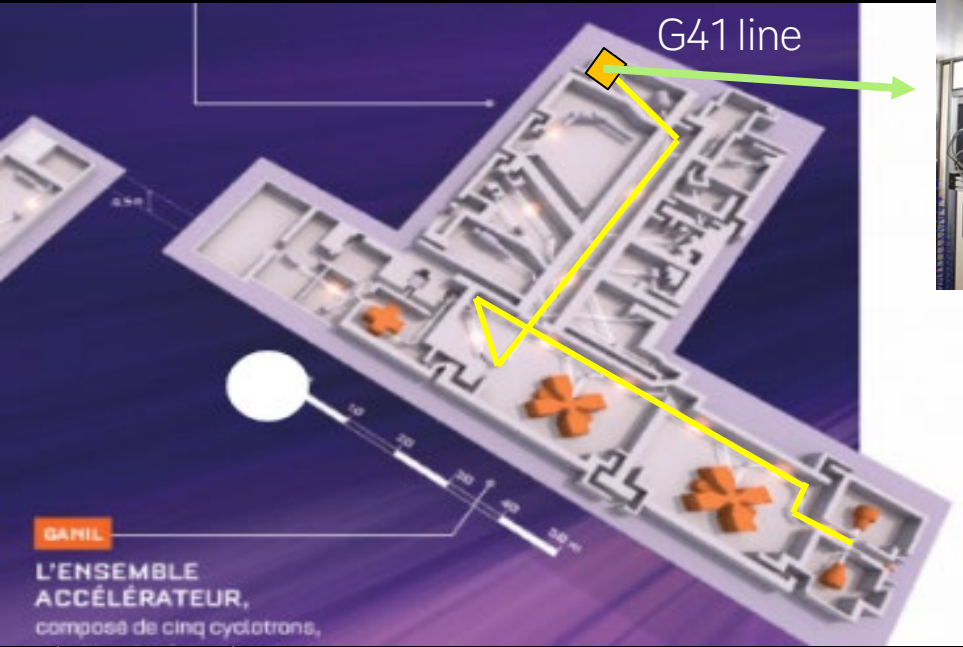
University of Jyväskylä

GANIL: GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS

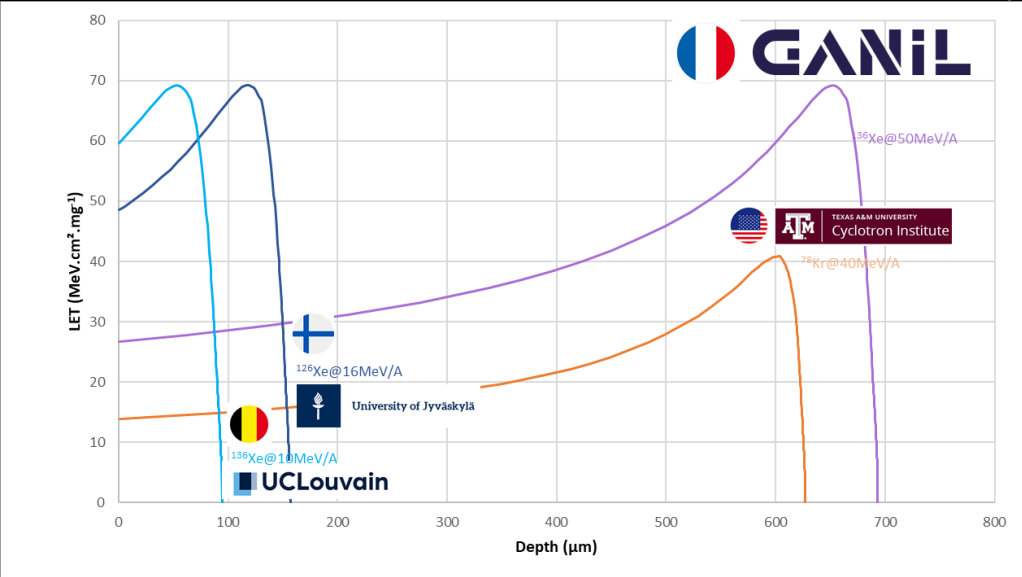
INSTALLATIONS POUR LE
TEST DES COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES



Faisceau dans l'air mais pas de cocktail d'ions
Energie max 95MeV/u
Accès: rare 200-400h/an (Semaine H24)
Délai: plusieurs mois



Ion	Energy (MeV/u)	LET MIN (MeV.cm ² /mg)	Range (µm)	LET MAX (MeV.cm ² /mg)	Range (µm)
³⁶ Ar	27	5,4	445	9,9	113
⁸⁶ Kr	60	11,0	1223	42,1	27
¹²⁹ Xe	50	26,5	685	64,3	35
²⁰⁸ Pb	29	72,7	258	97,6	64





04

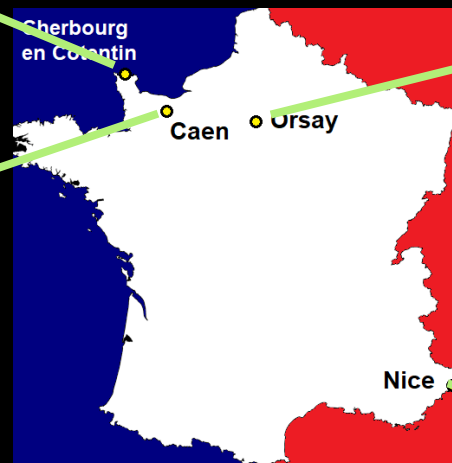
PERSPECTIVES

CNES SUPPORT OU PARTENAIRE DES INSTALLATIONS FRANÇAISES:

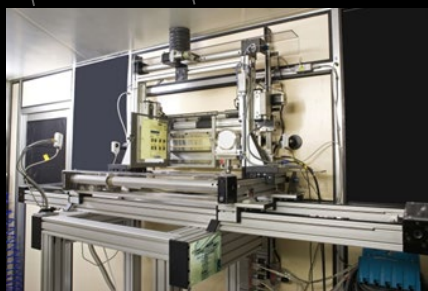
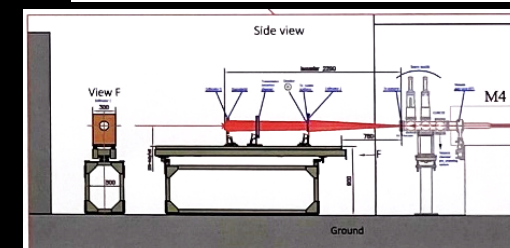
PERSPECTIVES



Campagnes de test et de Validation des installations



Amélioration des lignes pour le test de composants électroniques



LE PROJET SAGA: SPACE APPLICATIONS ON GANIL ACCELERATORS

PERSPECTIVES

Très hautes énergies:

G4x: Création de lignes additionnelles
Mêmes caractéristiques que G41
Possible irradiation de cartes

G41 Rénovation

1 ion ou bi-faisceau (Kr-Xe)
Energie : 50 à 100 MeV/u
Zone irradi: 25x4cm



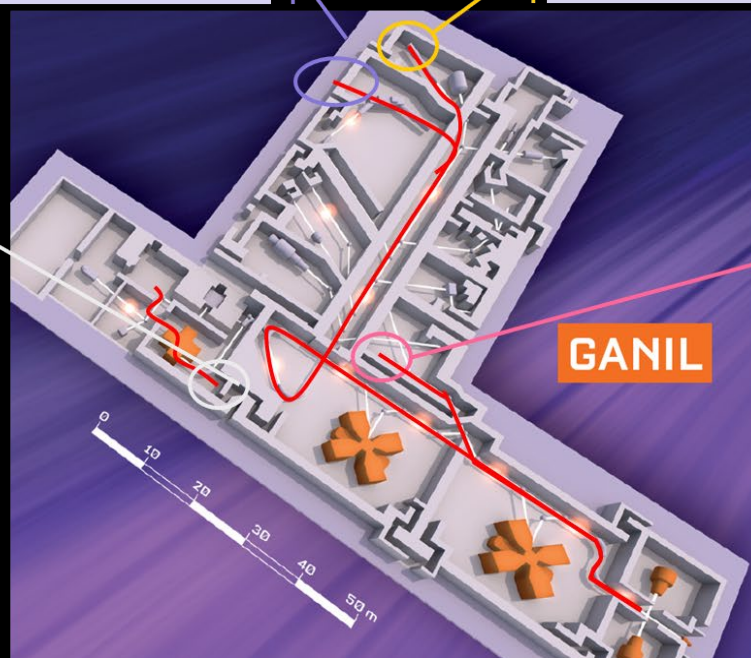
Financement:



Hautes énergies:

Creation de CIME-0°

Cocktail d'ions
Energie : 16,5 MeV/u
Zone irradi: 4x4 cm
Irradiation dans vide ou atm. contrôlée



>Energies moyennes

Adaptation D1

1 ion
Energie : 5 à 14 MeV/u
Zone irradi: 5x5 cm
Irradiation dans le vide

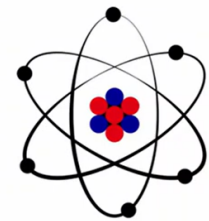
Partenaires:



Supports:



MERCI POUR VOTRE ATTENTION



FRI
*France
Rayonnements
Ionisants*

© FRI/VS Remita

Échanger – Former – Orienter



<https://france-ri.fr>



contact@france-ri.fr



www.linkedin.com/company/france-ri



www.youtube.com/@FRI-n4j

© ESA/NASA, 2016



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Insérez dans la zone de pieds de page, si besoin, vos informations annexes (légendes, sources, crédits, restrictions, logos partenaires, etc).