



Études théorique et expérimentale des effets singuliers induits par les muons atmosphériques sur les technologies numériques d'échelle nanométrique

Pierre LI CAVOLI

Doctorant 1 ère année

ONERA, Département Environnement Spatial

Directeur de thèse : José BUSTO (CPPM, Marseille)

Encadrant ONERA : Guillaume HUBERT (ONERA, Toulouse)



retour sur innovation

Co-financé Onera/Région PACA



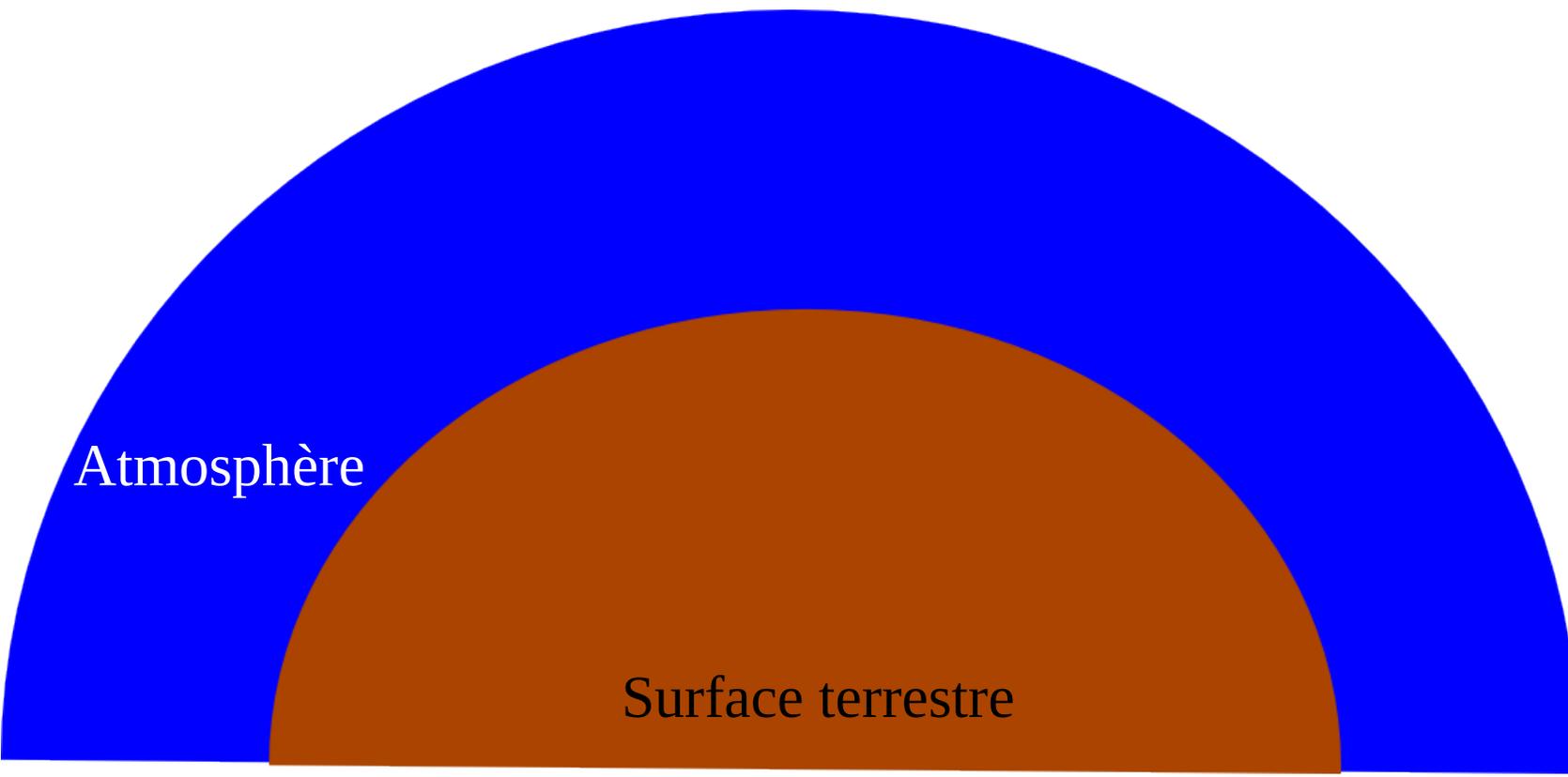
I) Contexte et problématique

II) Objectif de la thèse et démarche

III) Méthodes

IV) Résultats 1ère année

V) Prochaine étape

A diagram showing a cross-section of the Earth's atmosphere and surface. It consists of two concentric semi-circles. The inner semi-circle is brown and represents the land surface. The outer semi-circle is blue and represents the atmosphere. The labels 'Atmosphère' and 'Surface terrestre' are placed within their respective regions.

Atmosphère

Surface terrestre

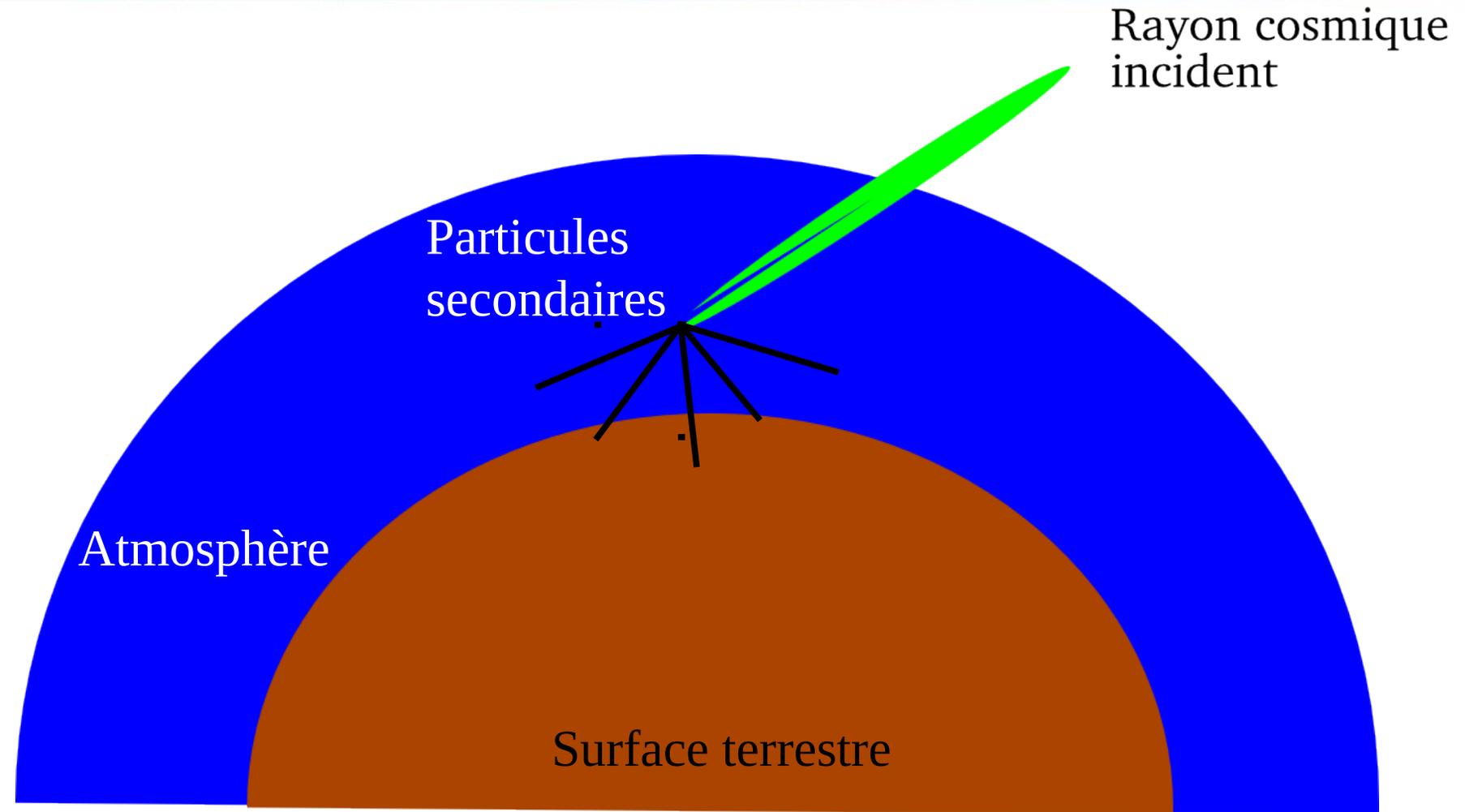
Contexte et problématique

Rayon cosmique incident

Atmosphère

Surface terrestre

Contexte et problématique



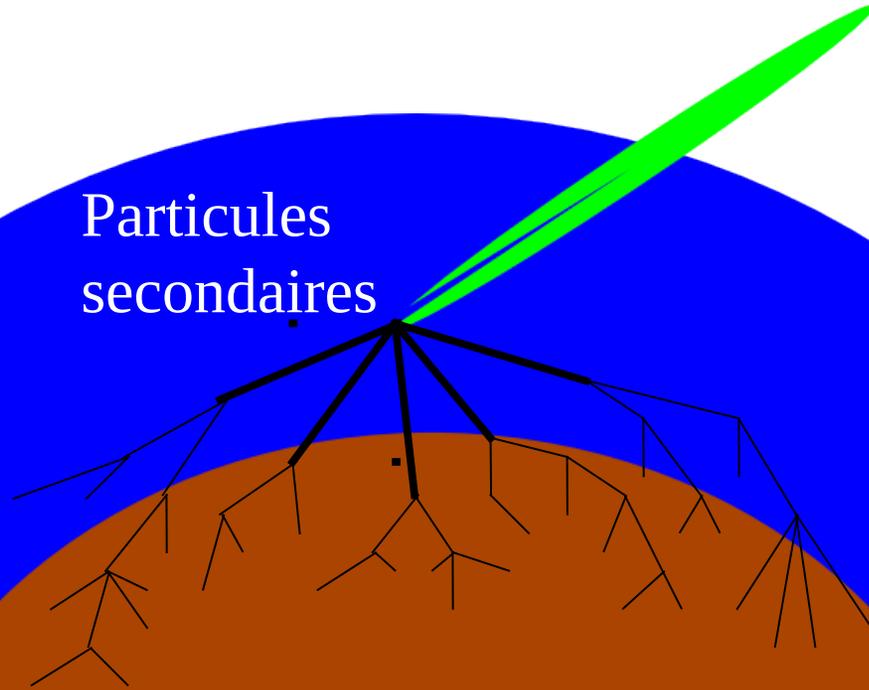
Contexte et problématique

Rayon cosmique incident

Particules secondaires

Atmosphère

Surface terrestre



Contexte et problématique

Rayon cosmique incident

Particules secondaires

Atmosphère

Surface terrestre



Contexte et problématique

Rayon cosmique incident

Particules secondaires

Atmosphère

Surface terrestre



Contexte et problématique

Rayon cosmique incident

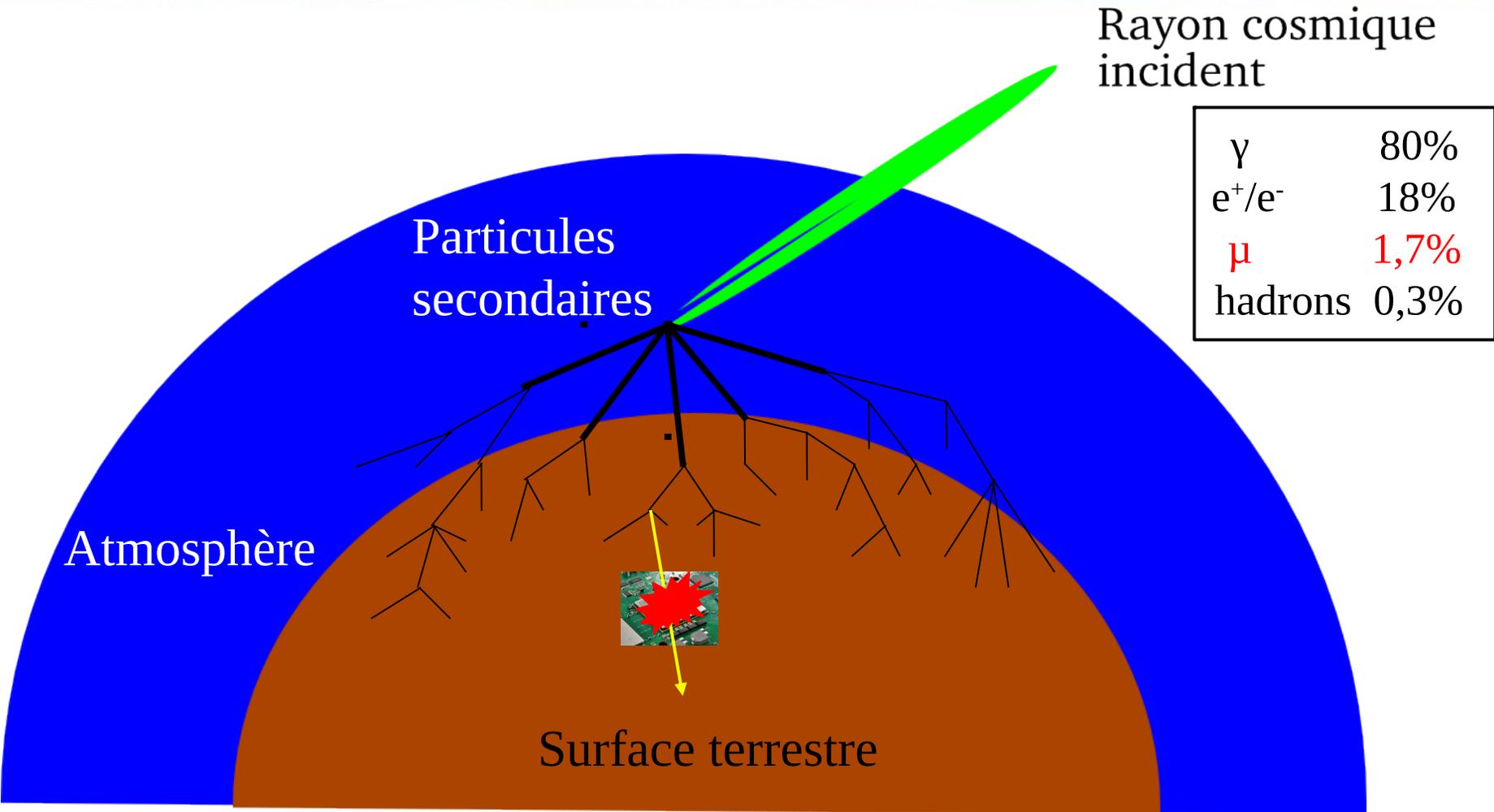
Particules secondaires

Atmosphère

Surface terrestre

 **Single-Event Effect**

Contexte et problématique



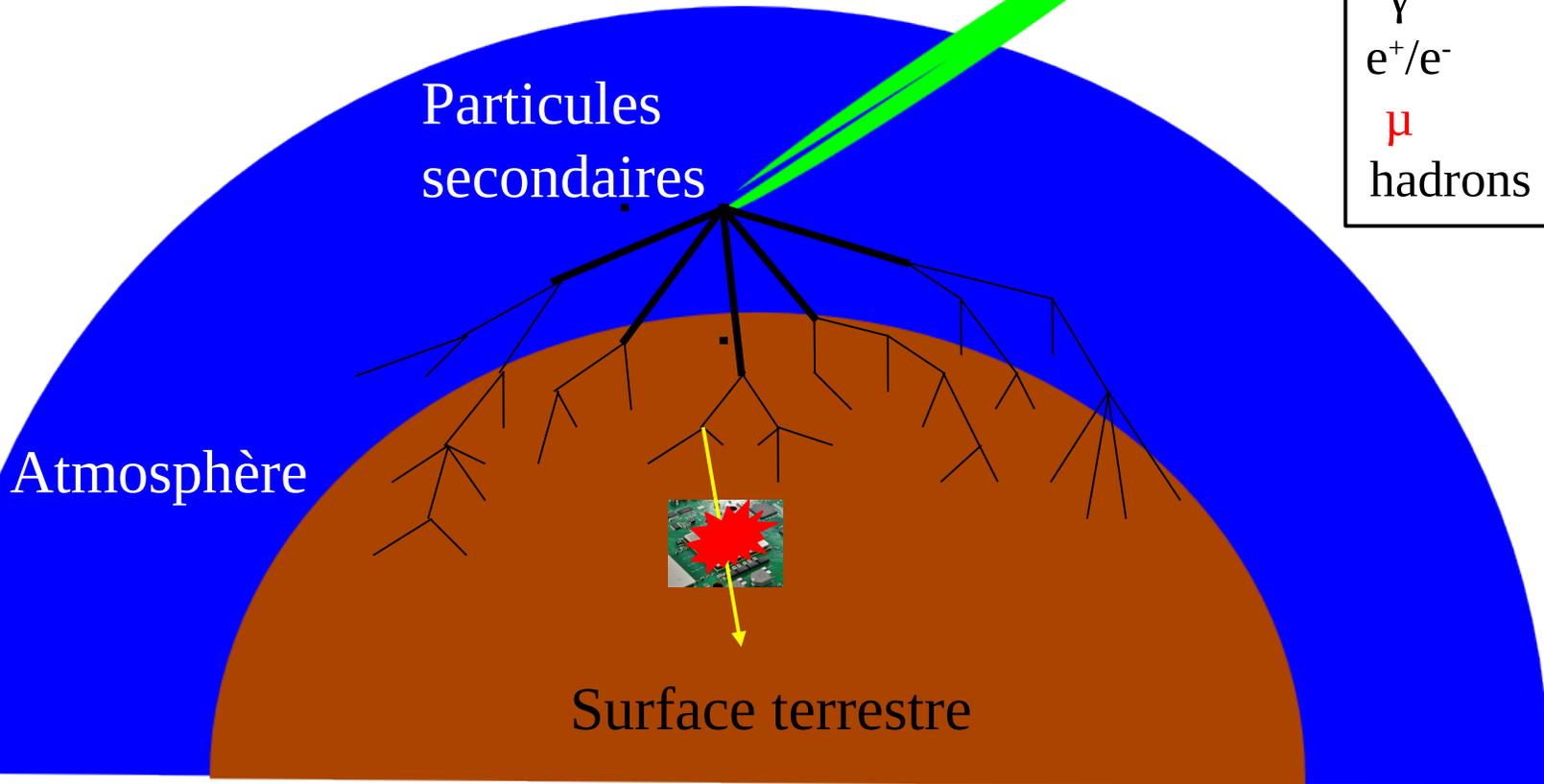
→ Single-Event Effect

Contexte et problématique

Flux muonique incident : $10^4 \text{ m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$

Rayon cosmique incident

γ	80%
e^+/e^-	18%
μ	1,7%
hadrons	0,3%



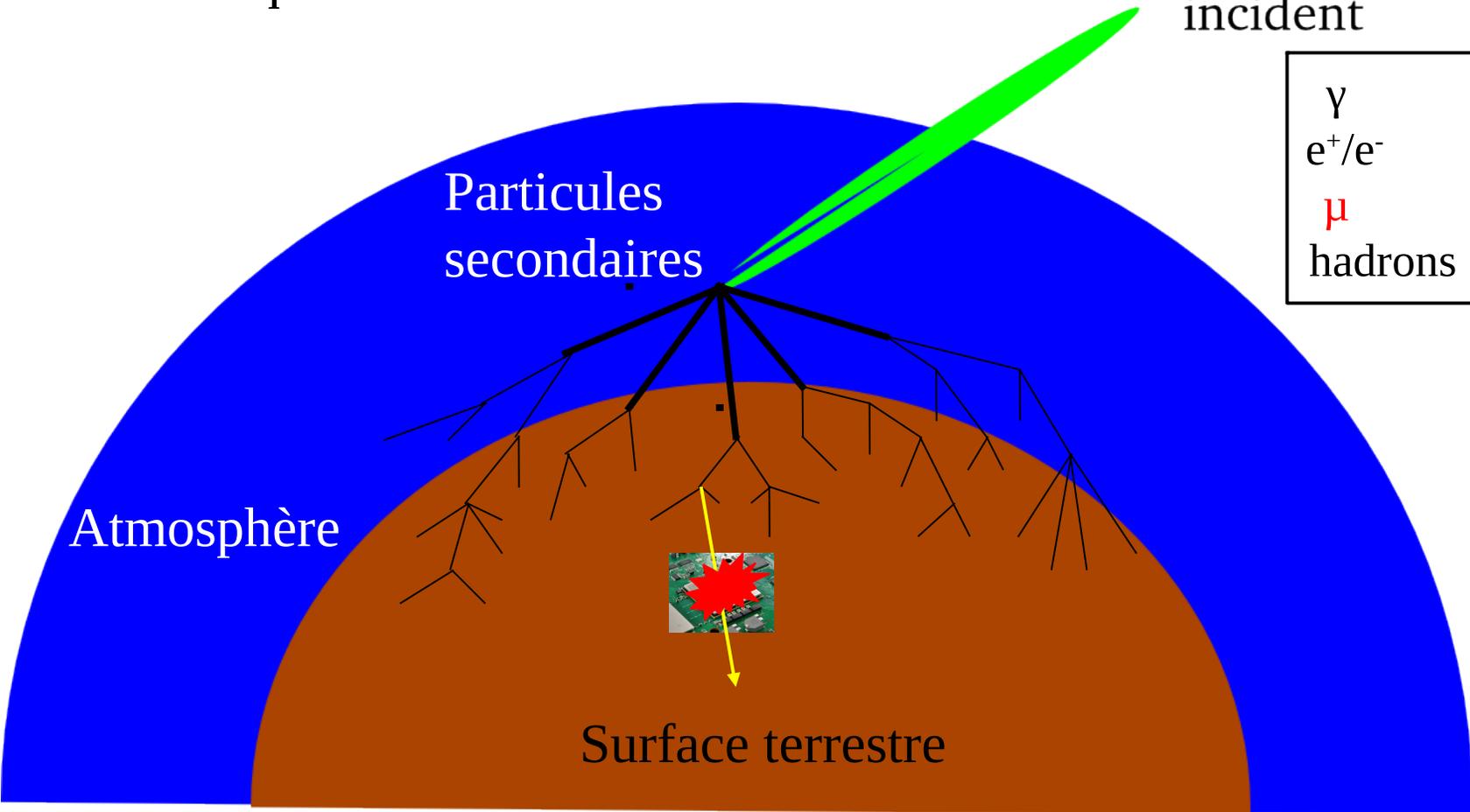
 **Single-Event Effect**

Contexte et problématique

Flux muonique incident : $10^4 \text{ m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$

Rayon cosmique incident

γ	80%
e^+/e^-	18%
μ	1,7%
hadrons	0,3%



→ Single-Event Effect

Effets Singuliers (SEE)

```
graph TD; A[Effets Singuliers (SEE)] --> B[Basculement de portes logiques (SET)]; A --> C[Basculement de point mémoire (SEU)]; A --> D[Court-circuit (SEL)]; A --> E[Rupture de la grille du transistor (SEGR)]; A --> F[Destruction du composant (SEB)];
```

Basculement de
portes logiques
(SET)

Basculement de
point mémoire
(SEU)

Court-circuit
(SEL)

Rupture de la
grille du
transistor
(SEGR)

Destruction
du composant
(SEB)

Contexte et problématique



Intégration des transistors



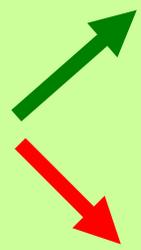
Diminution du seuil de sensibilité

TRANSISTORS

The Essential Element of Innovation



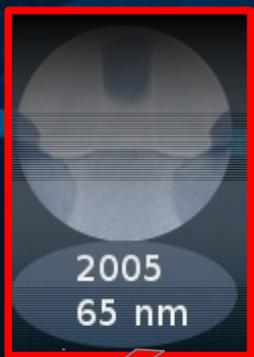
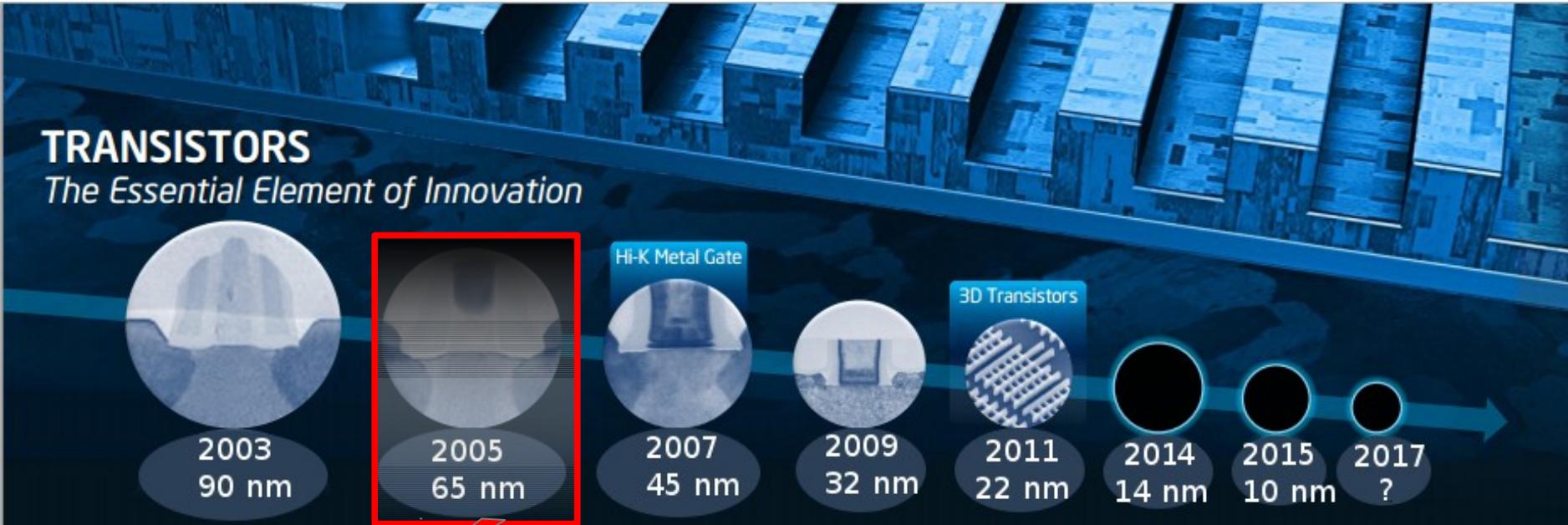
Contexte et problématique



Intégration des transistors

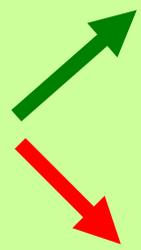


Diminution du seuil de sensibilité



Seuil de sensibilité aux muons

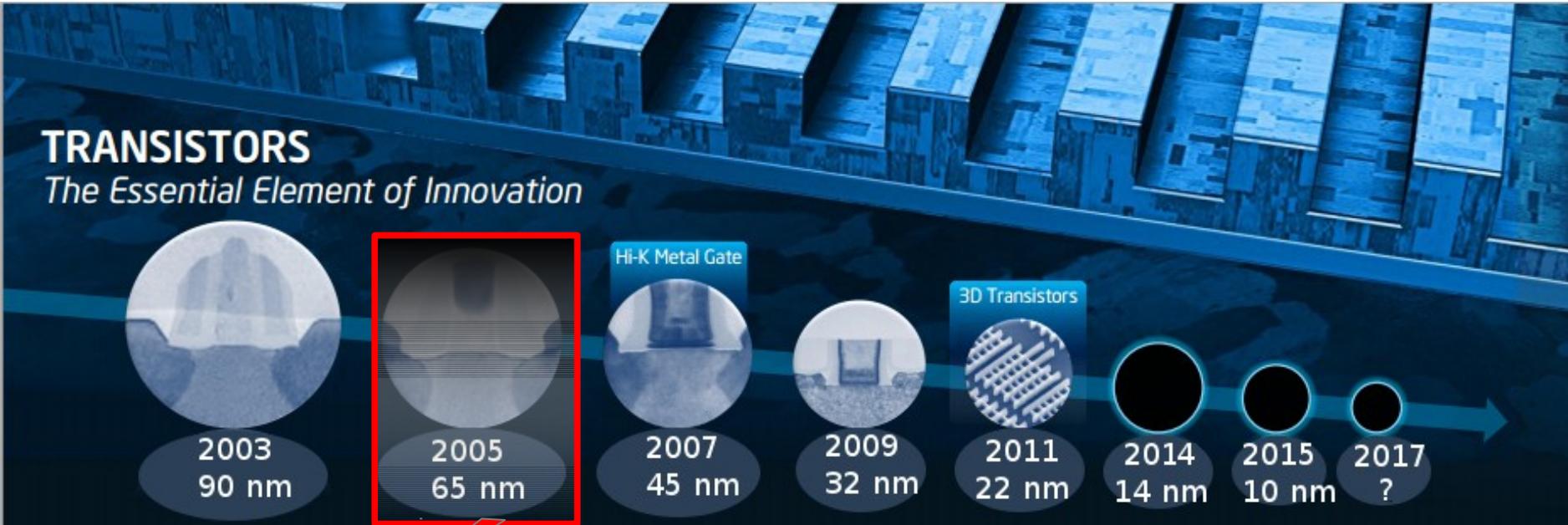
Contexte et problématique



Intégration des transistors

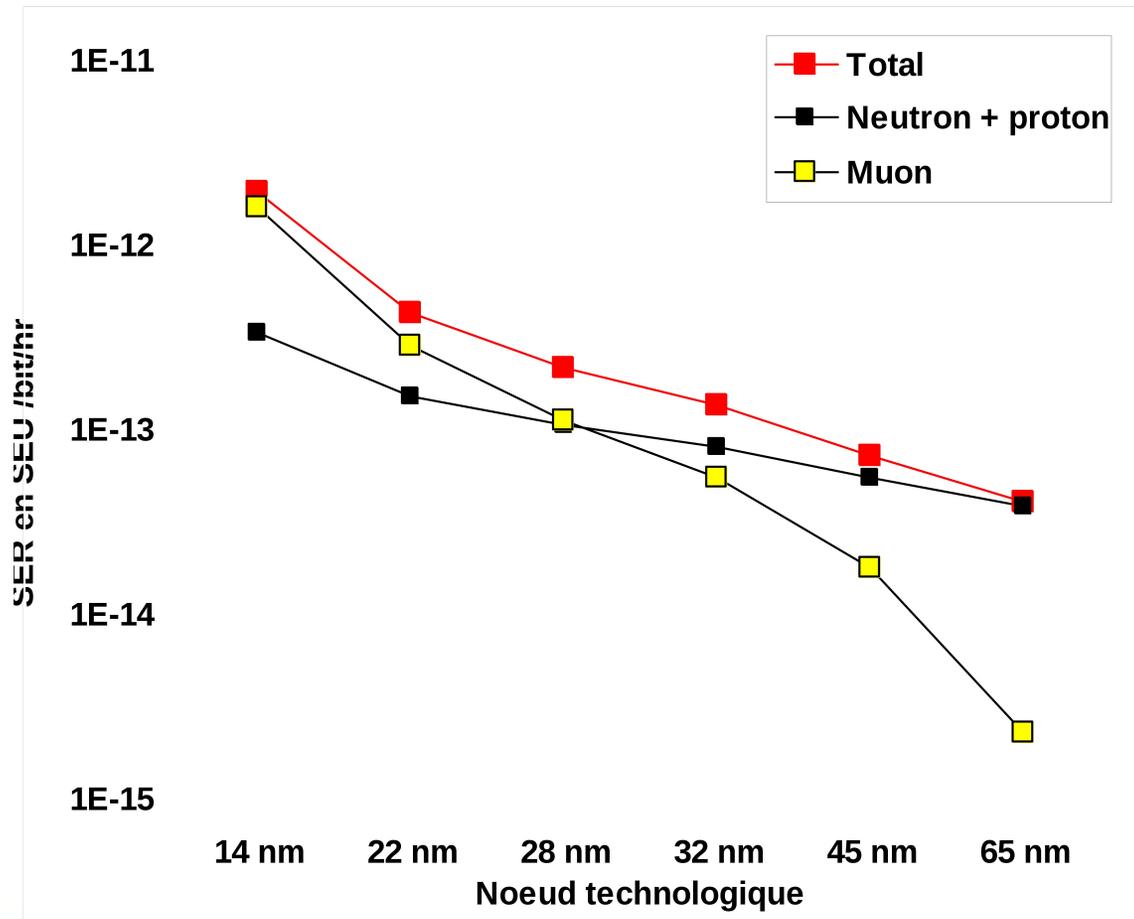


Diminution du seuil de sensibilité



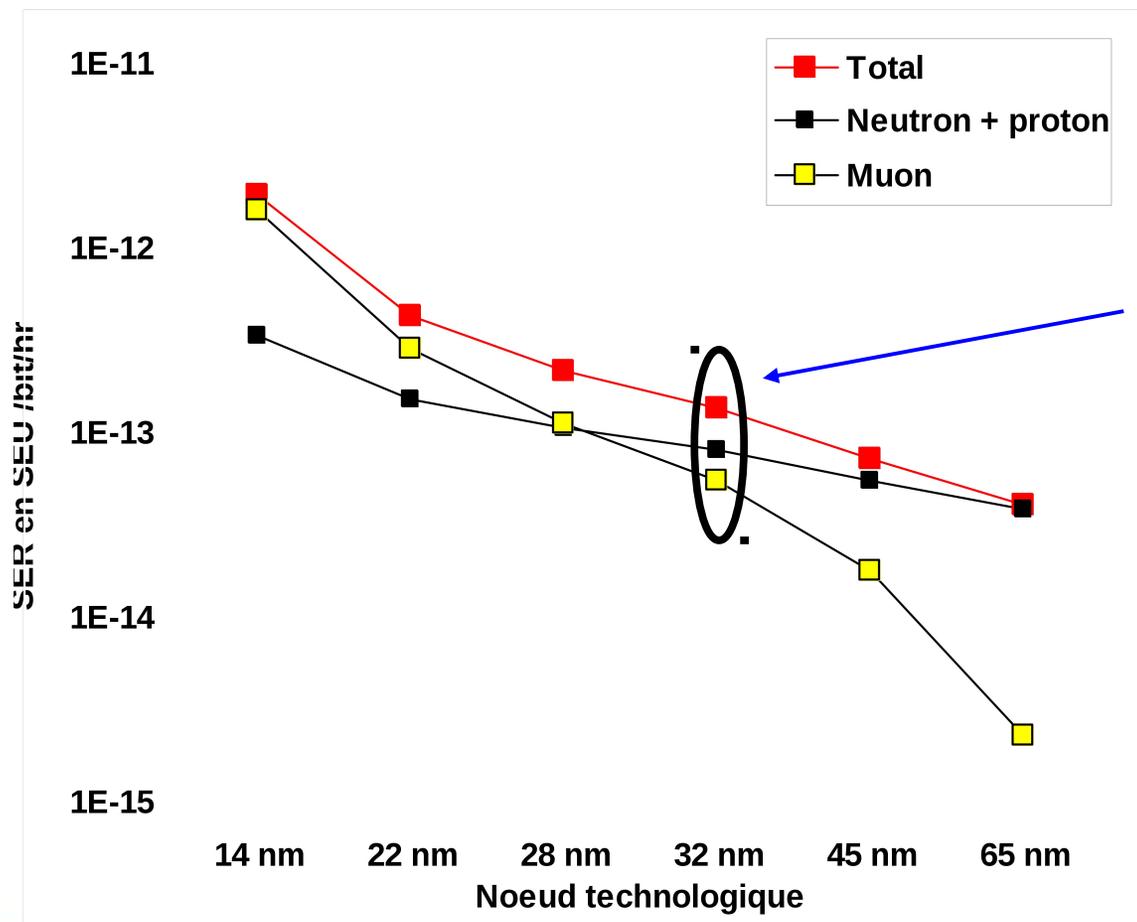
Seuil de sensibilité aux muons → Quel est l'impact opérationnel de la contribution muon ?

Résultats préliminaires (2012) : risque SEE vs roadmap



Contexte et problématique

Résultats préliminaires (2012) : risque SEE vs roadmap



A partir de 32 nm, le taux de SEE induit par les muons est supérieur à celui induit par les neutrons et protons

Objectif de la thèse et démarche

Etudier **l'impact des muons** sur les systèmes électroniques en **environnement atmosphérique** (terrestre et avionique) avec une approche **théorique** et **expérimentale**

- Développer et valider un **modèle d'interaction** muon/semi-conducteur
- Développer une instrumentation pour réaliser des mesures expérimentales
- Combiner les résultats issus de la modélisation et des mesures expérimentales
- Développer deux axes prospectifs visant à étudier la contribution muon dans le cas d'environnements opérationnels et évaluer les tendances de ces contributions pour les futures technologies

Position de l'ONERA



Département Environnement Spatial



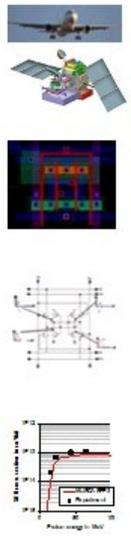
Plate-forme MUSCA SEP³ : prédiction des SEE

Méthodes

MUSCA SEP³

Design & description

DESP activities

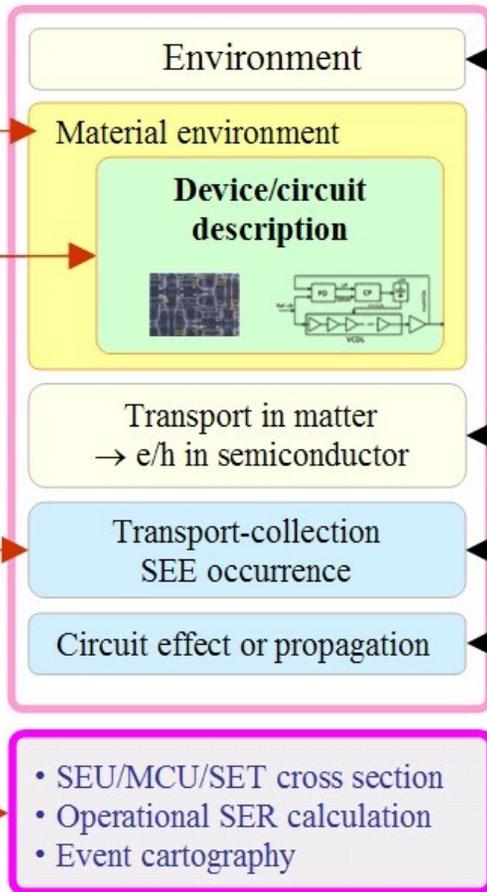


Materials

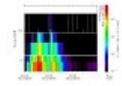
Cell/design layout
Reverse, ITRS, GDS

Circuit level
Circuit schematic
Physical Design Kit

SEE ground test
Validation or calibration



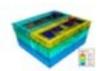
Environment



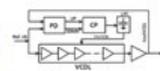
Interaction



Transport/collection
from: TCAD, ITRS



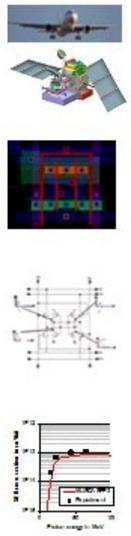
Electrical simulation



MUSCA SEP³

Design & description

DESP activities

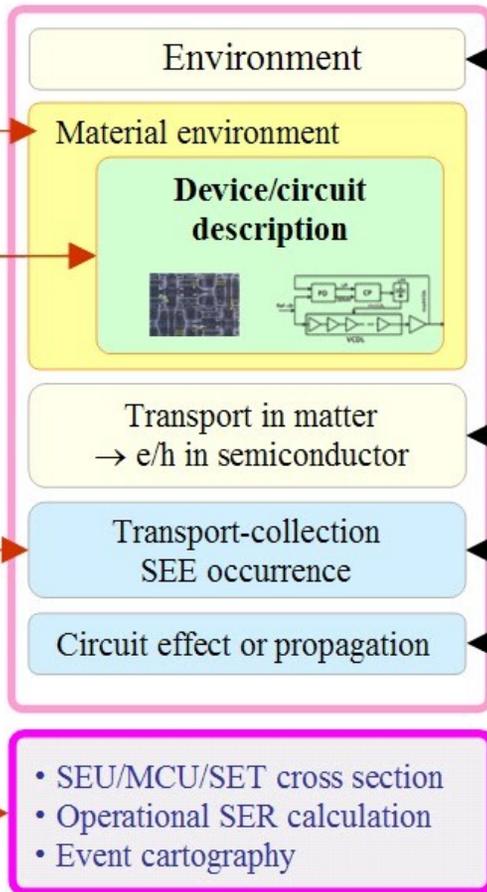


Materials

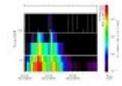
Cell/design layout
Reverse, ITRS, GDS

Circuit level
Circuit schematic
Physical Design Kit

SEE ground test
Validation or calibration



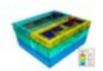
Environment



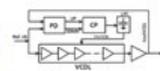
Interaction



Transport/collection
from: TCAD, ITRS



Electrical simulation

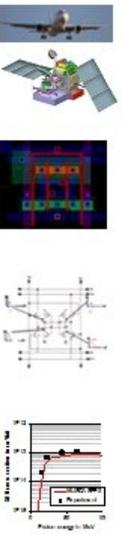


- SEU/MCU/SET cross section
- Operational SER calculation
- Event cartography

MUSCA SEP³

Design & description

DESP activities

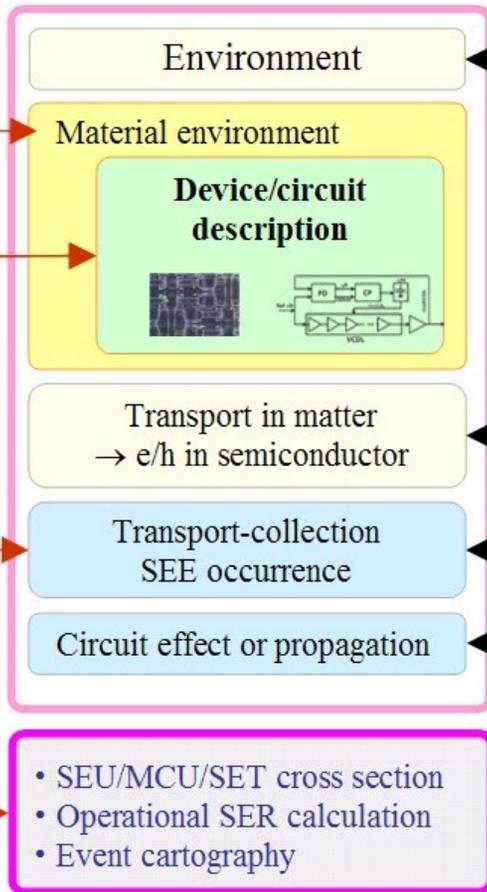


Materials

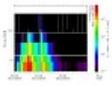
Cell/design layout
Reverse, ITRS, GDS

Circuit level
Circuit schematic
Physical Design Kit

SEE ground test
Validation or calibration



Environment



Interaction



Transport/collection
from: TCAD, ITRS

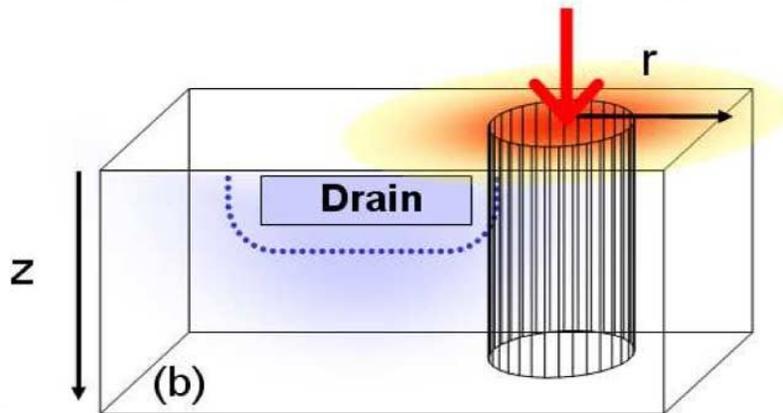
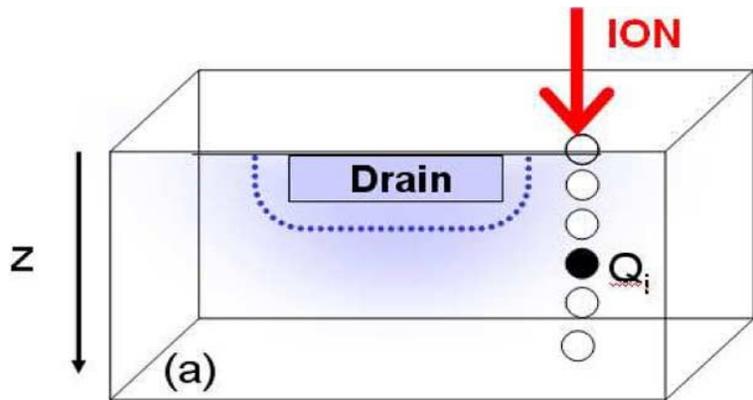


Electrical simulation



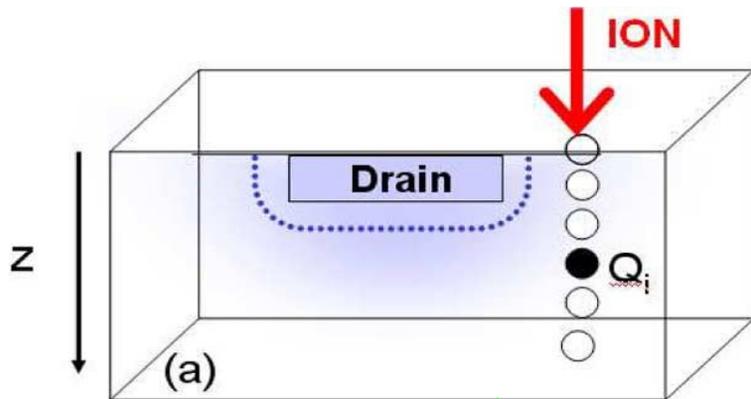
Geant 4

Forme du dépôt d'énergie de la particule incidente

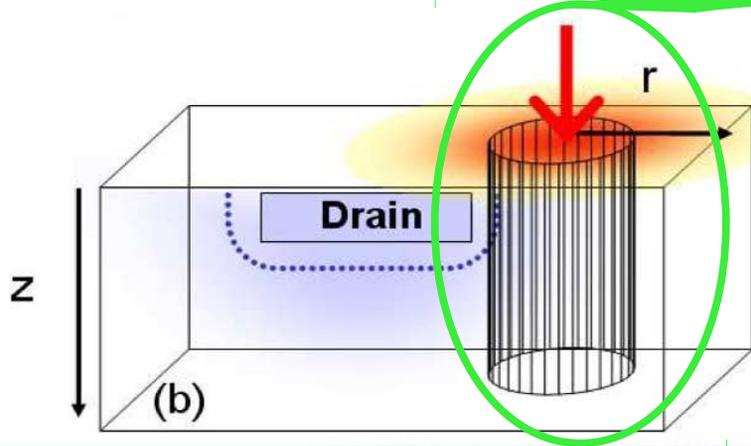


M. Raine et al., "Impact of the Radial Ionization Profile on SEE Prediction for SOI Transistors and SRAMs Beyond the 32-nm Technological Node", IEEE TNS, vol. 58, no. 3, june 2011

Forme du dépôt d'énergie de la particule incidente



M. Raine et al., "Impact of the Radial Ionization Profile on SEE Prediction for SOI Transistors and SRAMs Beyond the 32-nm Technological Node", IEEE TNS, vol. 58, no. 3, june 2011



Nécessité de considérer la dimension radiale du dépôt d'énergie par un ion et non comme une série de charges ponctuelles

Visualisation de GEANT4

The screenshot displays the MuonMicro visualization environment. On the left, a 3D viewer window titled "viewer-0 (OpenGLStoredQt)" shows a yellow rectangular detector volume with several colored lines representing particle trajectories. The scene tree on the left lists "viewer-0 (OpenGLStoredQt)" and "Axes". Below the viewer, an "Output" window shows the following text:

```
Visualization verbosity changed to errors (2)
/tracking/storeTrajectory 2
Attributes available for modeling and filtering with
"/vis/modeling/trajectories/create/drawByAttribute"
and
```

Below the output window, there is a "clear output" button and a "Filter:" input field. At the bottom left, a "Touchable slider" is set to "Show all".

On the right, a code editor window titled "PhysicsList.cc (~/Documents/G4/Projets/MuonMicro/src) - gedit" shows the following C++ code:

```
    } else if ( particleName == "proton" ) {

        // STANDARD msc is active in the world
        G4hMultipleScattering* msc = new G4hMultipleScattering();
        pmanager->AddProcess(msc, -1, 1, 1);

        // STANDARD ionisation is active in the world
        G4hIonisation* hion = new G4hIonisation();
        pmanager->AddProcess(hion, -1, 2, 2);

        // MicroElec ionisation is not active in the world
        G4MicroElecInelastic* microelecioni = new G4MicroElecInelastic
("p_G4MicroElecInelastic");
        microelecioni->SetEmModel(new G4DummyModel(),1);
        microelecioni->SetEmModel(new G4DummyModel(),2);
        pmanager->AddDiscreteProcess(microelecioni);

    } else if (particleName == "mu-" || particleName == "mu+") {

        //STANDARD msc is active in the world
        G4MuMultipleScattering* msc = new G4MuMultipleScattering();
        pmanager->AddProcess(msc, -1, 1, 1);

        //STANDARD ionisation is active in the world
        G4MuIonisation* muion = new G4MuIonisation();
        pmanager->AddProcess(muion, -1, 2, 2);

        //STANDARD brems is active in the world
        G4MuBremsstrahlung* mubrems = new G4MuBremsstrahlung();
        pmanager->AddProcess(mubrems, -1, -1, 3);

        //STANDARD pair production is active in the world
        G4MuPairProduction* mupair = new G4MuPairProduction();
        pmanager->AddProcess(mupair, -1, 2, 2);

        //STANDARD muon nuclear process is active in the world
        G4MuonNuclearProcess* muNucProcess = new G4MuonNuclearProcess();
        G4MuonVDNuclearModel* muNucModel = new G4MuonVDNuclearModel();
```

Utilisation du module de GEANT4:
\$G4/examples/advanced/**microelectronics**



Simuler les traces des protons dans le silicium



Extension de la physique du module aux muons



Est-il nécessaire de considérer le dépôt comme radial ?

Simulations des traces du dépôt d'énergie des protons dans le silicium

Simulations des traces du dépôt d'énergie des protons dans le silicium

→ Nécessité de considérer le dépôt radial !

Simulations des traces du dépôt d'énergie des protons dans le silicium

→ Nécessité de considérer le dépôt radial !

↳ Rédaction d'une publication en cours

Simulations des traces du dépôt d'énergie des protons dans le silicium

→ Nécessité de considérer le dépôt radial !

↪ Rédaction d'une publication en cours

Simulations des traces du dépôt d'énergie des muons dans le silicium

Simulations des traces du dépôt d'énergie des protons dans le silicium

→ Nécessité de considérer le dépôt radial !

→ Rédaction d'une publication en cours

Simulations des traces du dépôt d'énergie des muons dans le silicium

→ *Analyse en cours*

Simulations des traces du dépôt d'énergie des protons dans le silicium

→ Nécessité de considérer le dépôt radial !

→ Rédaction d'une publication en cours

Simulations des traces du dépôt d'énergie des muons dans le silicium

→ *Analyse en cours*

→ *2 publications potentielles
(méthodologie + résultats)*

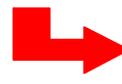
Continuer analyse des simulations muons

Continuer analyse des simulations muons

Développer une **instrumentation** pour réaliser mesures muons

Continuer analyse des simulations muons

Développer une **instrumentation** pour réaliser mesures muons

 Utilisation des équipements du **CPPM**

Merci à tous pour votre attention !