

Validation d'un nouveau logiciel de simulation tridimensionnel du multipactor par le calcul et l'expérimentation

Thibault Hamelin

- I. Introduction du multipactor**
- II. Logiciel de simulation du multipactor : Musicc3D**
- III. Etudes d'influences et validation de Musicc3D**
- IV. Véhicule Test pour l'étude du multipactor**
- V. Simulations de cavités accélératrices de l'IPNO**
- VI. Conclusions et perspectives**

I. Introduction du multipactor

1. Principes
2. Domaines et conséquences
3. Calculs

II. Logiciel de simulation du multipactor : Musicc3D

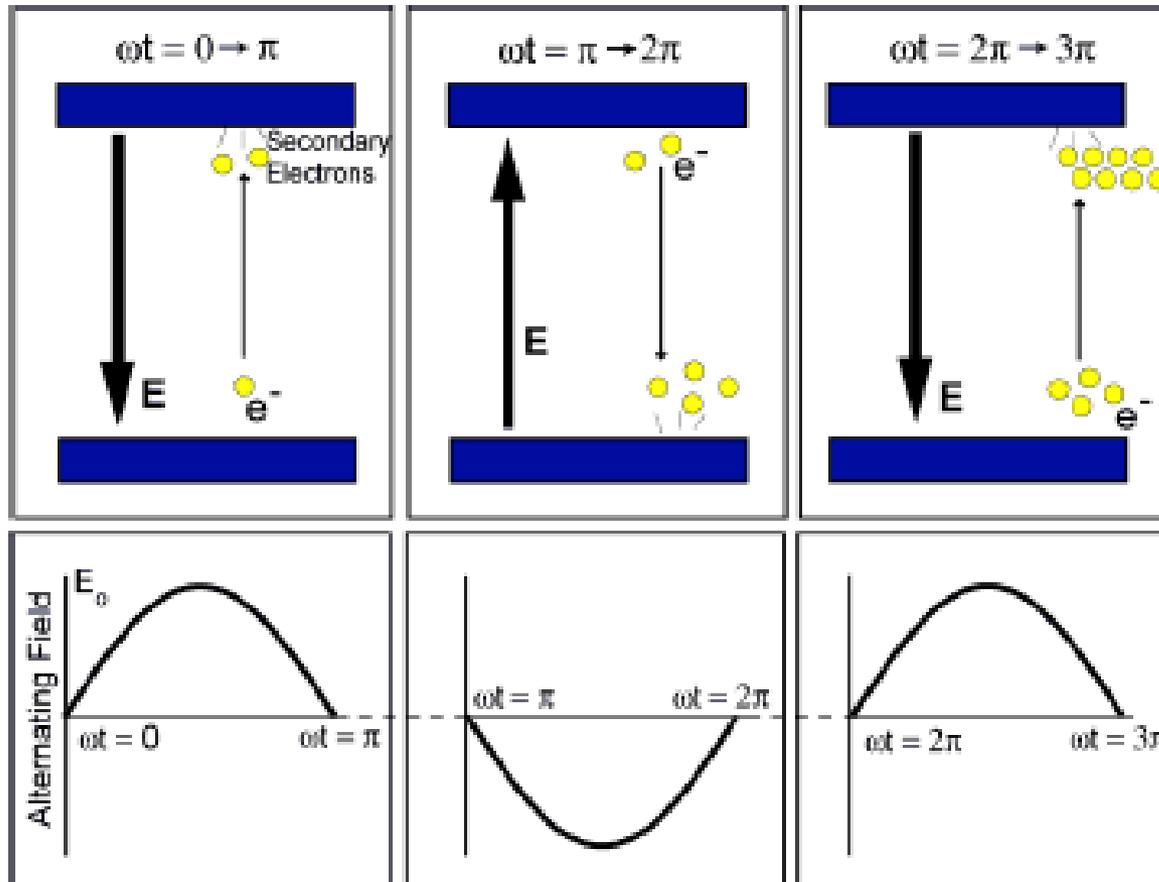
III. Etudes d'influences et validation de Musicc3D

IV. Véhicule Test pour l'étude du multipactor

V. Simulations de cavités accélératrices de l'IPNO

VI. Conclusions et perspectives

- Création d'une avalanche d'électrons dans un dispositif haute-fréquence (HF) résonnant sous vide



- **Ordre du multipactor**

↳ Nombre de périodes HF entre deux collisions

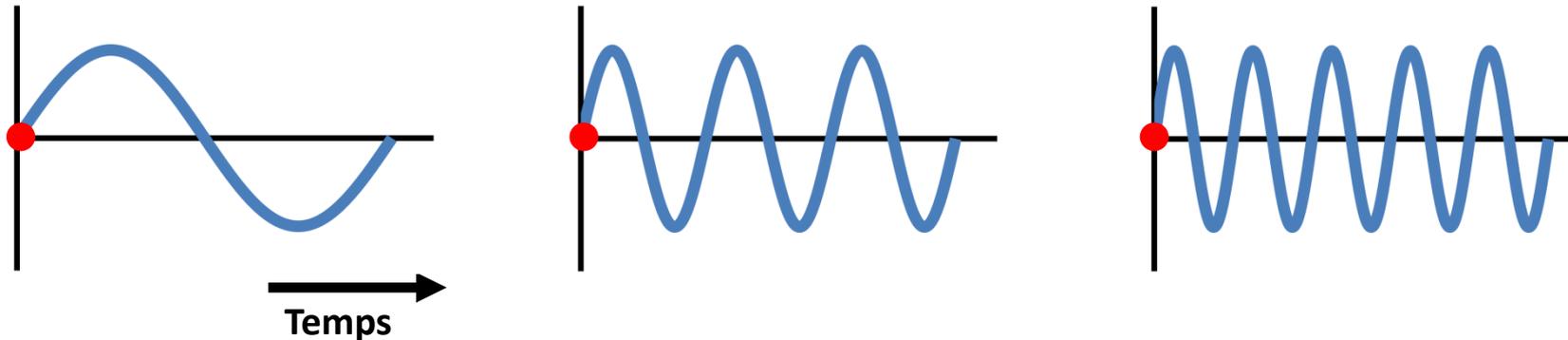
Ordre 1

Ordre 2

Ordre 3

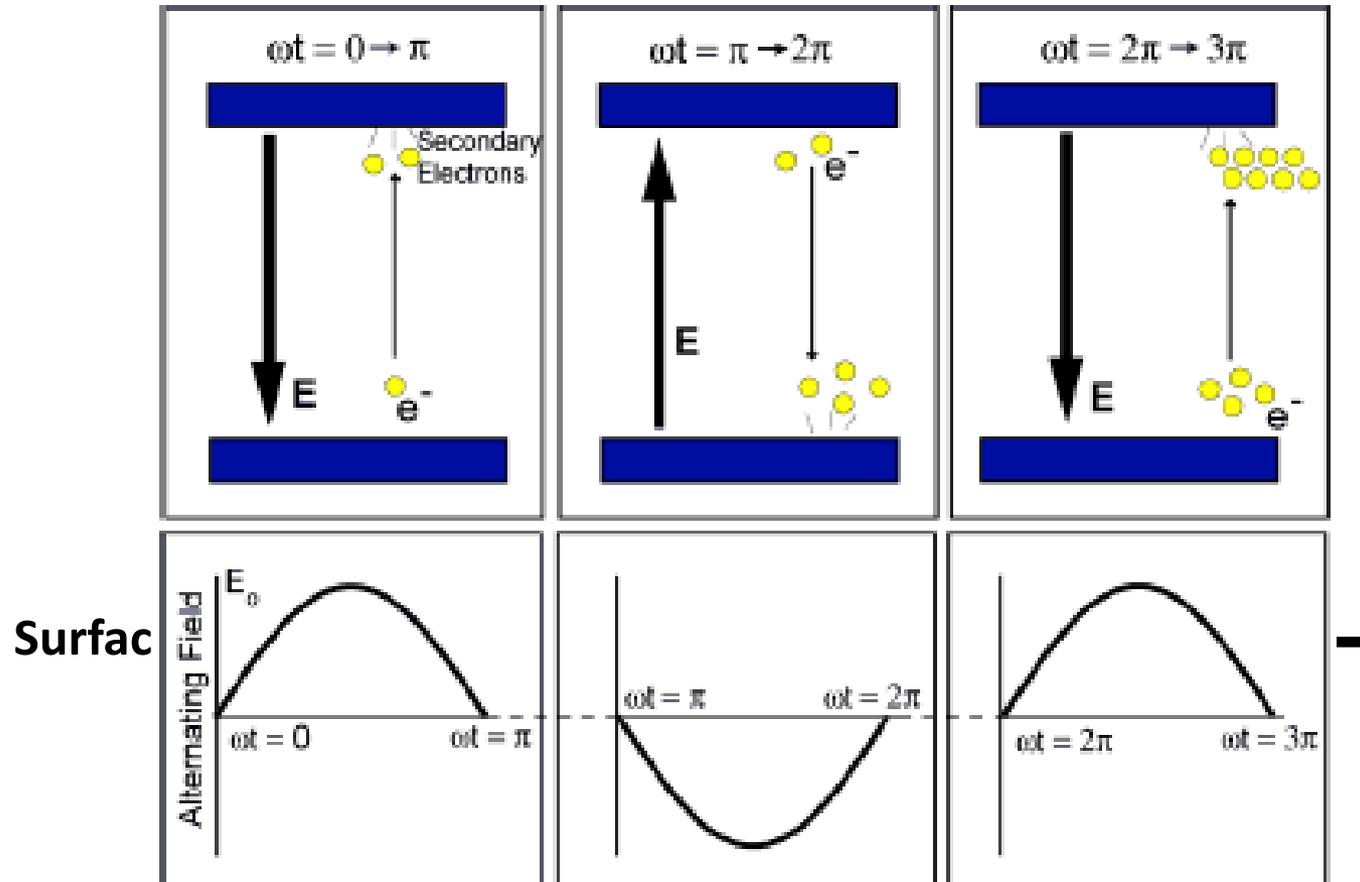
Surface

Amplitude du champ



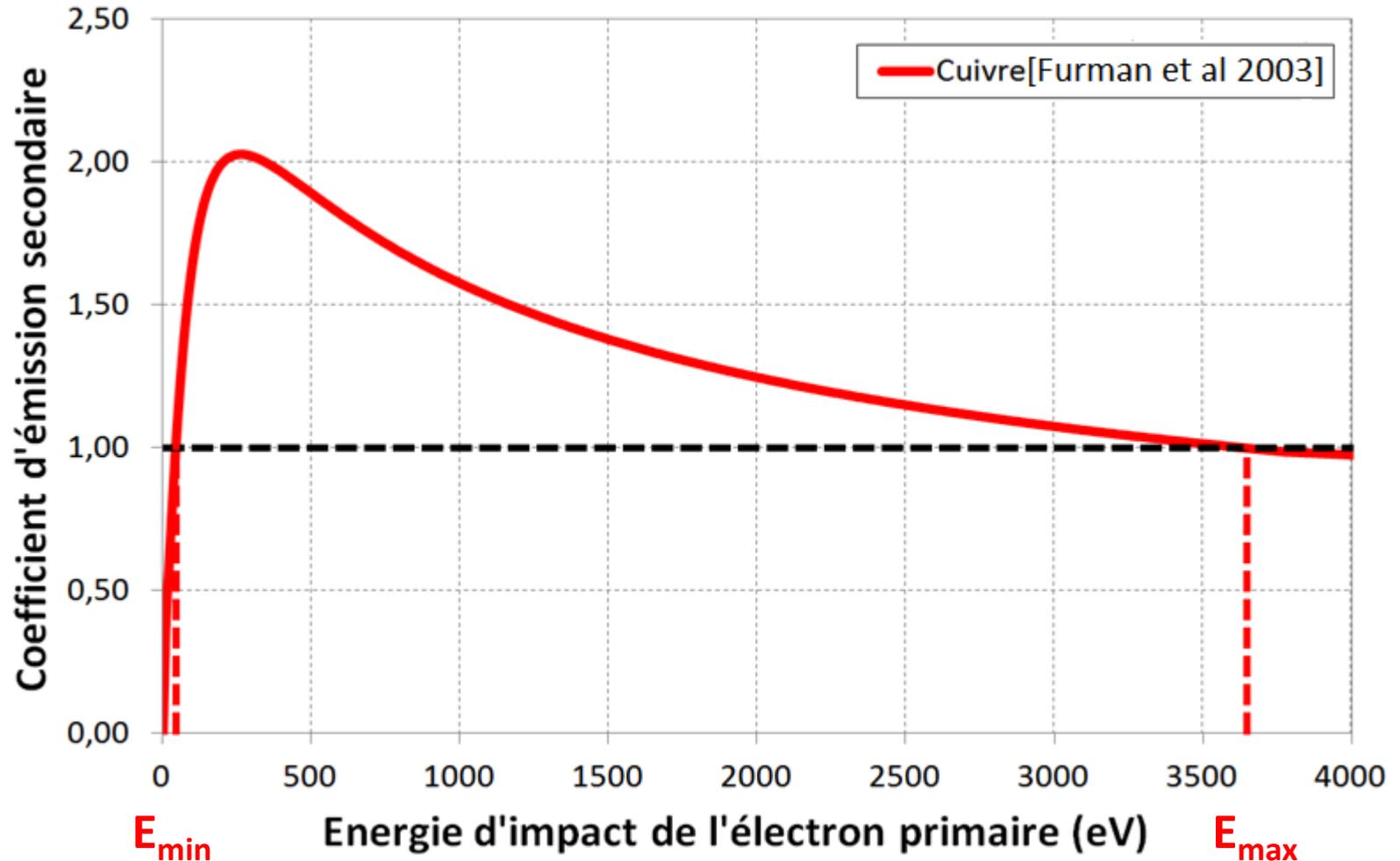
- Emission d'électrons secondaires

↳ Phénomène aléatoire



- Emission d'électrons secondaires

↳ Coefficient d'émission secondaire



- **Connu depuis les années 1930**

Amplificateur HF



Cavité HF (par exemple pour les accélérateurs de particules)



Circuit micro-onde dans les satellites



- **Conséquences**

- ↳ Pertes d'énergies / puissances
- ↳ Limitation du champ accélérateur
- ↳ Déréglage de la fréquence de résonance
- ↳ Dégazage et claquage de la structure HF
- ↳ Echauffement de la structure HF
- ↳ Altération des surfaces



Destruction de la structure HF

- **Connu depuis les années 1930**
- **Préoccupation majeur dans les dispositifs HF**
 - ↳ **Calculs analytiques 1D (plaques parallèles)**
 - **Vaughan**
 - **Hatch et Williams...**
 - ↳ **Lois d'échelles et logiciels de simulation 2D (ligne coaxiale, cavité elliptique...)**
 - **MUPAC**
 - **Multipac 2D...**
 - ↳ **Logiciel de simulation 3D pour les géométries complexes d'aujourd'hui (nouvelle cavité accélératrice (Spoke), klystron multi faisceaux ...)**
 - **Spark 3D**
 - **Musicc3D...**



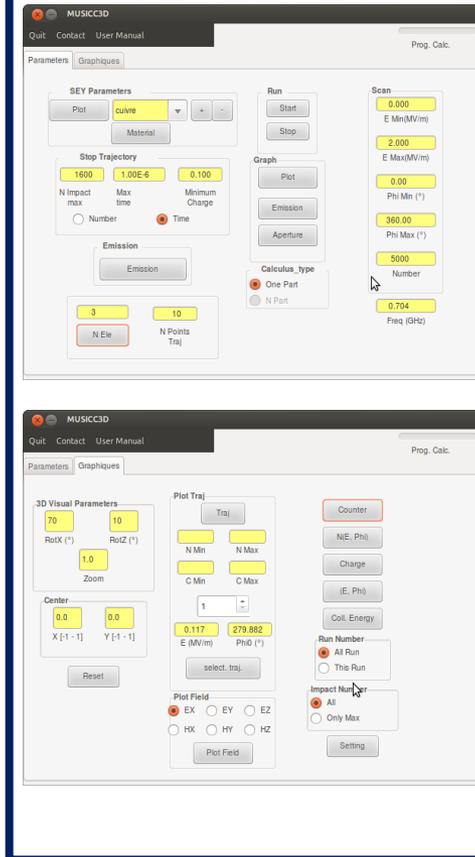
- I. Introduction du multipactor
- II. Logiciel de simulation du multipactor : Musicc3D**
 - 1. Logiciel Musicc3D
 - 2. Principes
 - 3. Exemples de sorties
- III. Etudes d'influences et validation de Musicc3D
- IV. Véhicule Test pour l'étude du multipactor
- V. Simulations de cavités accélératrices de l'IPNO
- VI. Conclusions et perspectives

- Développé à l'IPNO par JL. Coacolo

Outil de conversion des fichiers HFSS au format Musicc3D

Meilleur solveur externe (HFSS ...)

Interface homme-machine



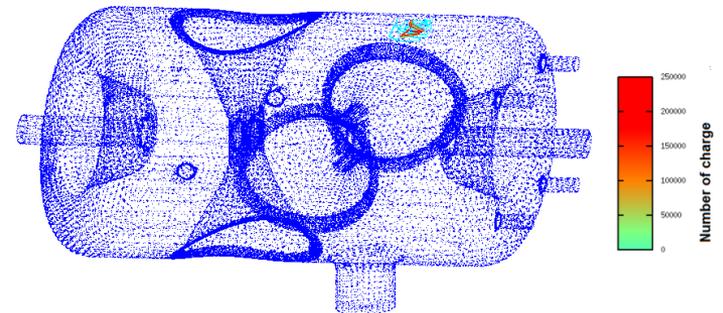
Fichiers textes d'entrée

Calcul multipactor (ADA)

Systeme Linux ordinateur personnel / grille de calcul

Fichiers textes de sortie

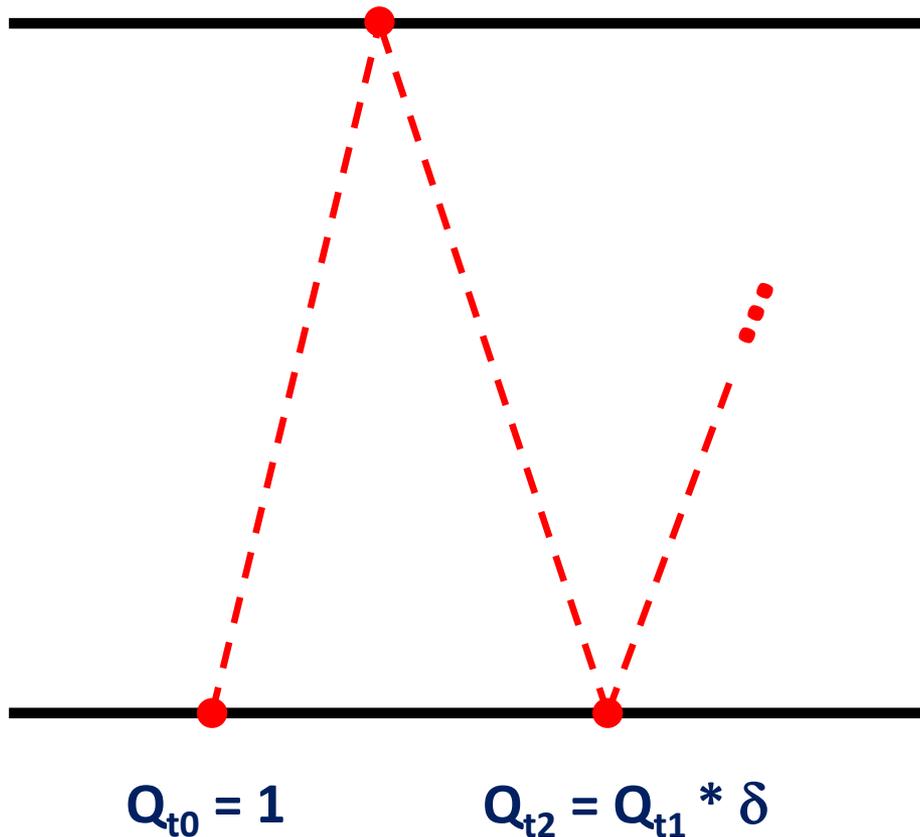
Visualisation des résultats (Gnuplot)



- **Modèle de la charge virtuelle**

↳ Nombre d'électrons créés

$$Q_{t1} = Q_{t0} * \delta$$



$$Q = \prod_1^{nb\text{collisions}} \delta(\zeta, \alpha, E)$$

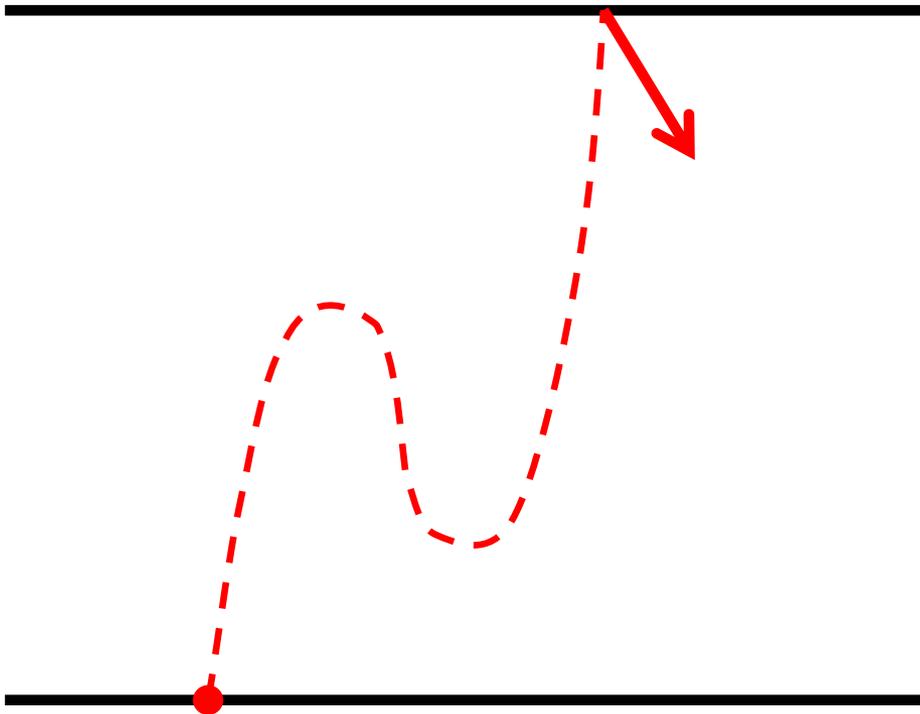
- δ dépend :

↳ ζ : Matériau

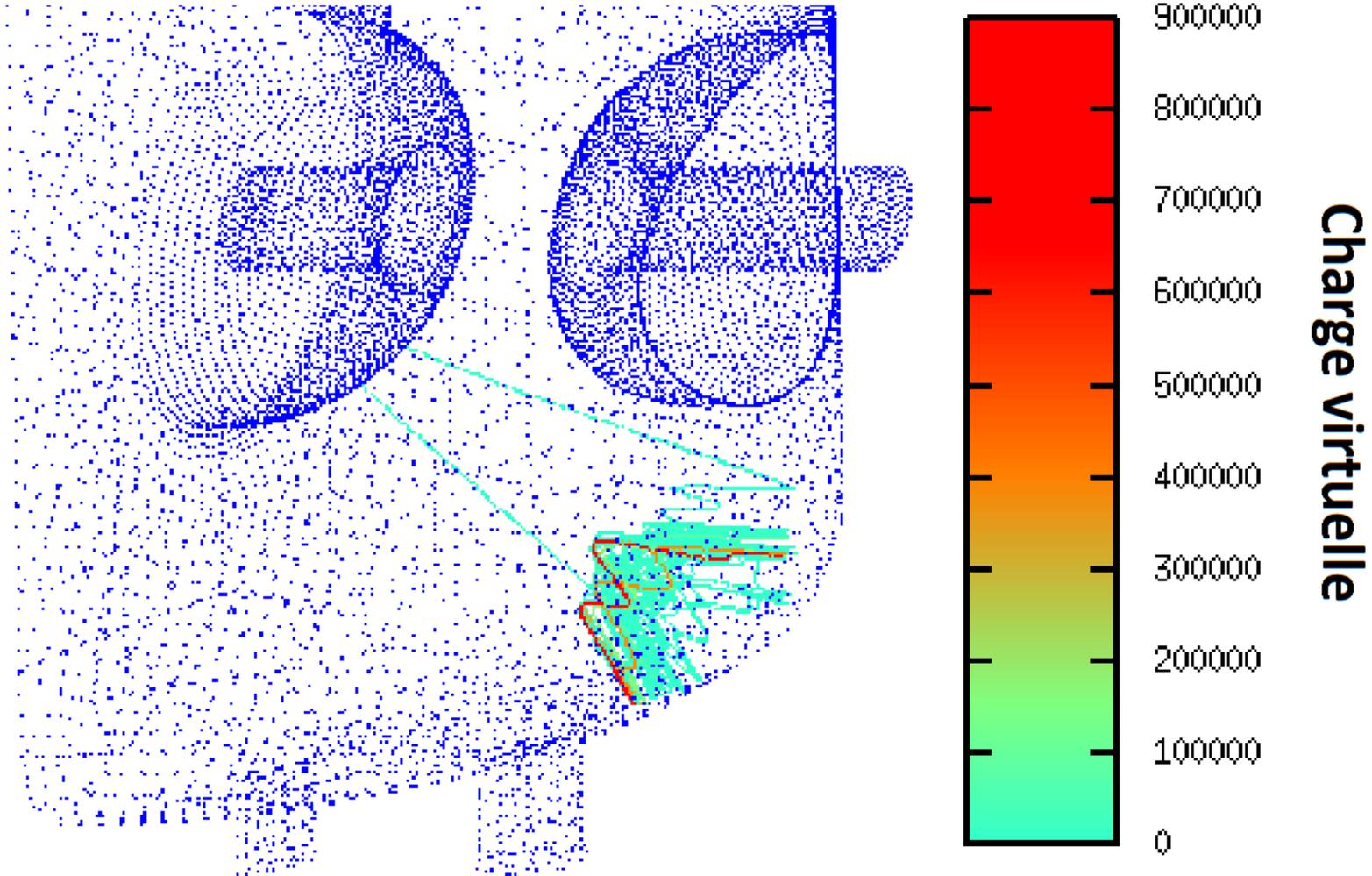
↳ α : angle de collisions

↳ E : énergie de collisions

- **Mouvement des électrons**



- **Trajectoire électronique**
 - ↳ Méthode de Runge Kutta
 - Maillage tétraédrique
- **Emission électronique**
 - ↳ Monte Carlo
 - Energie
 - Angles



- I. Introduction du multipactor
- II. Logiciel de simulation du multipactor : Musicc3D
- III. Etudes d'influences et validation de Musicc3D**
 - 1. Etudes d'influences
 - 2. Validation
- IV. Véhicule Test pour l'étude du multipactor
- V. Simulations de cavités accélératrices de l'IPNO
- VI. Conclusions et perspectives

• Influence du maillage

↳ Dispositif étudié : ligne coaxiale infinie

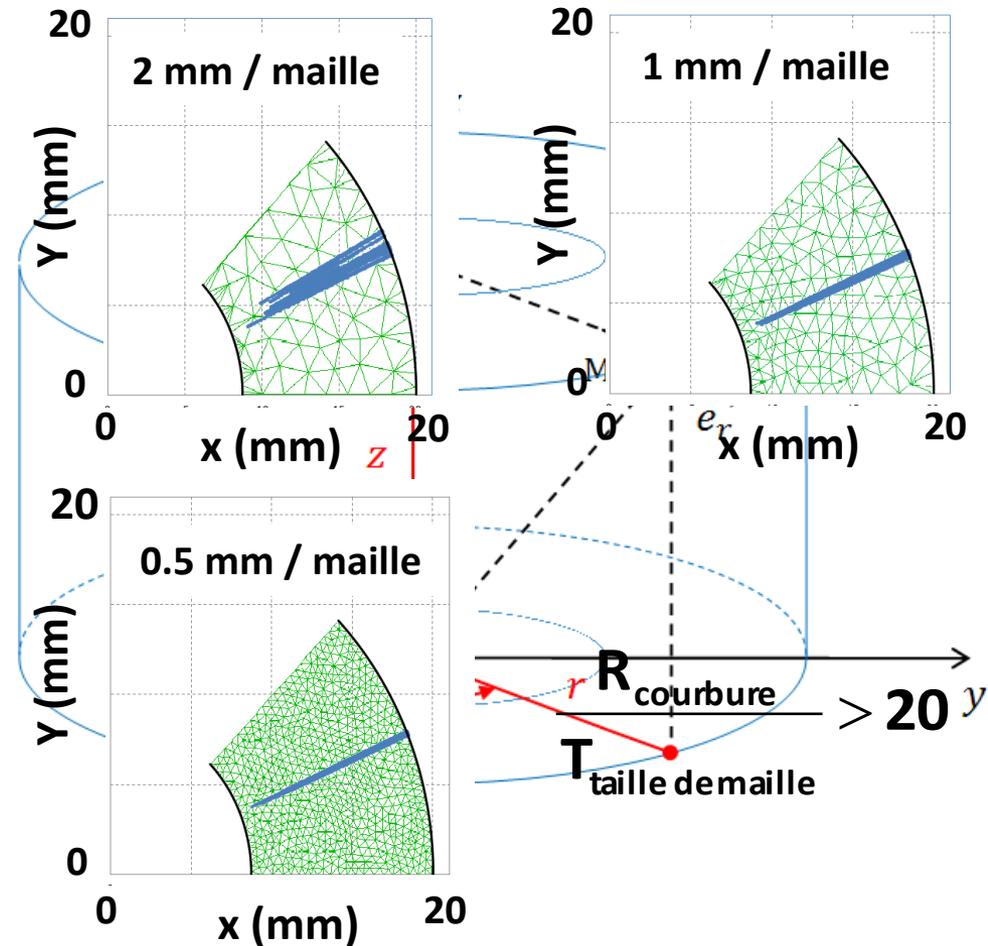
$$\begin{cases} F_r = E_r + (v_\theta B_z - v_z B_\theta) \\ F_\theta = E_\theta + (v_z B_r - v_r B_z) \\ F_z = E_z + (v_r B_\theta - v_\theta B_r) \end{cases}$$

P_{xy}

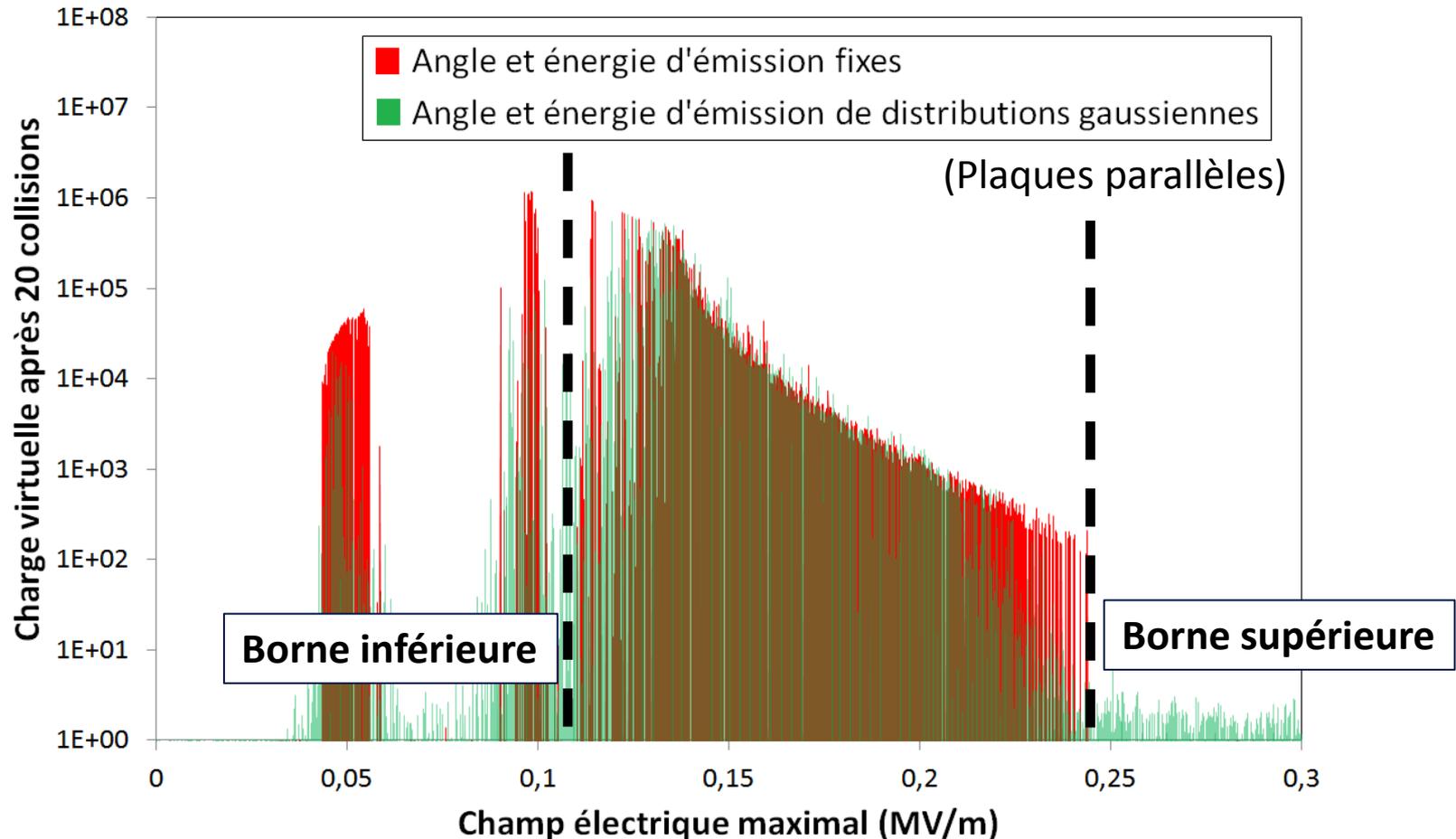
$E (E_r, E_\theta = 0, E_z = 0)$

$B (B_r = 0, B_\theta, B_z = 0)$

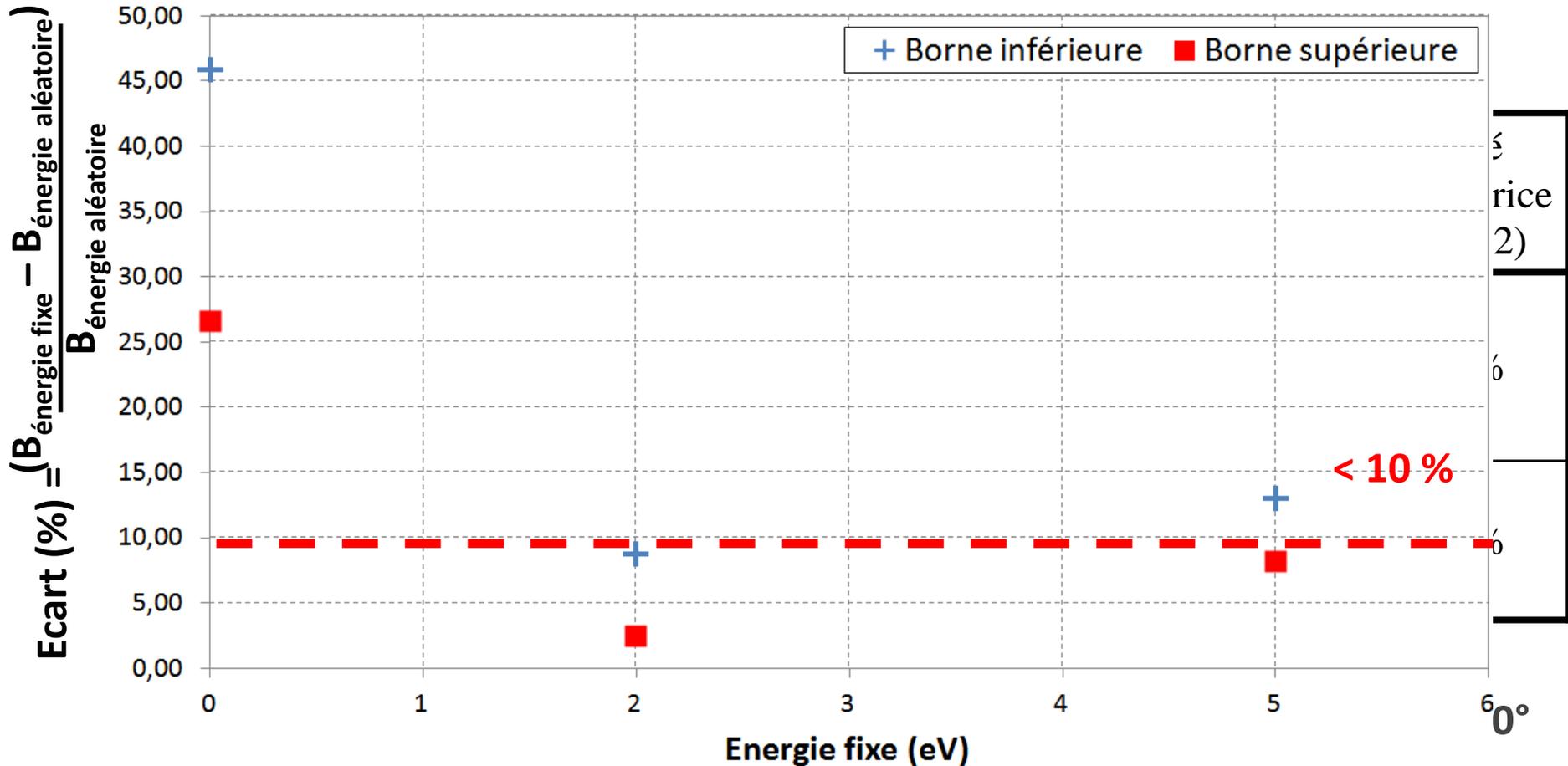
$F_\theta = 0$



- Influence des angles et énergie d'émission électronique
 - ↳ Utilisation d'angles et d'énergie d'émission électronique fixes permet de réduire les temps de calculs (~~calcul Monte-Carlo~~, élimination des électrons ne participant pas au multipactor)



• Influence des angles et énergie d'émission électronique

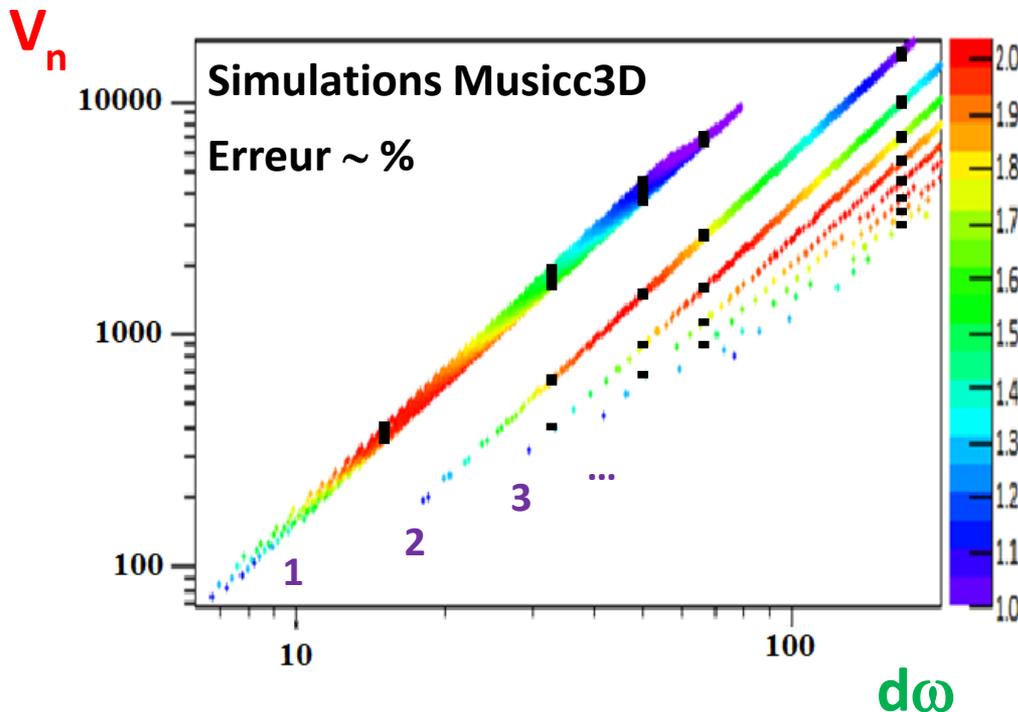


Distribution aléatoire (gaussienne : écart type de 5 eV et centrée à 2 eV [typique pour les métaux à surface « propre »])

- Comparaison entre la simulation et un calcul analytique 1D (Hatch et Williams)

↳ Dispositif étudié : plaques parallèles

$$V_n = \frac{m d\omega}{2e} \sqrt{(v_f - v_0)^2 + \left(d\omega - \frac{(2n-1) \times \pi}{2} (v_f + v_0) \right)^2}$$



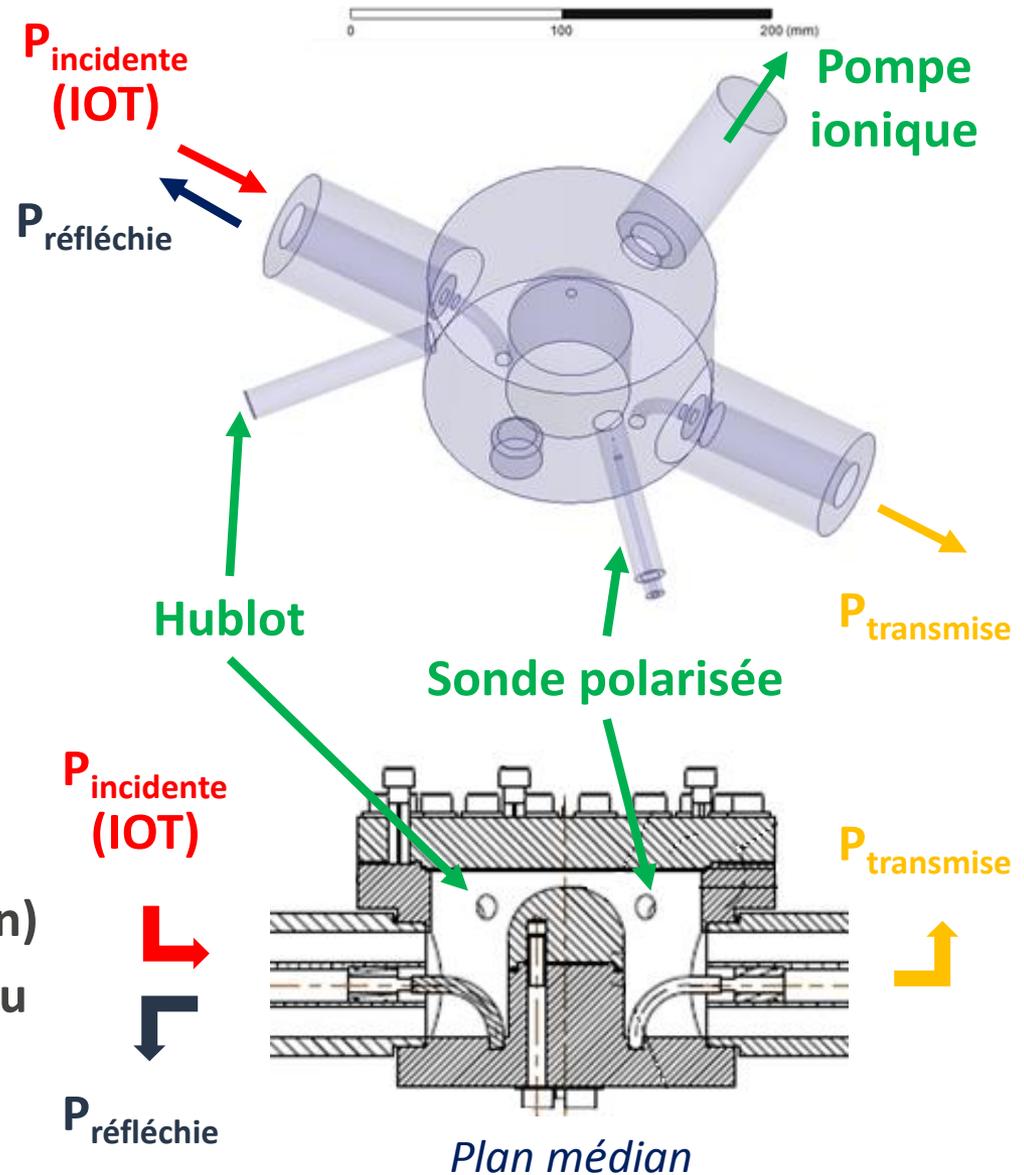
Coefficient d'émission secondaire

- V_n Tension entre les deux plaques provoquant du multipactor
- $d\omega$ Produit fréquence gap
- n Ordre du multipactor
- v_0 Vitesse initiale des électrons
- v_f Vitesse de collision des électrons

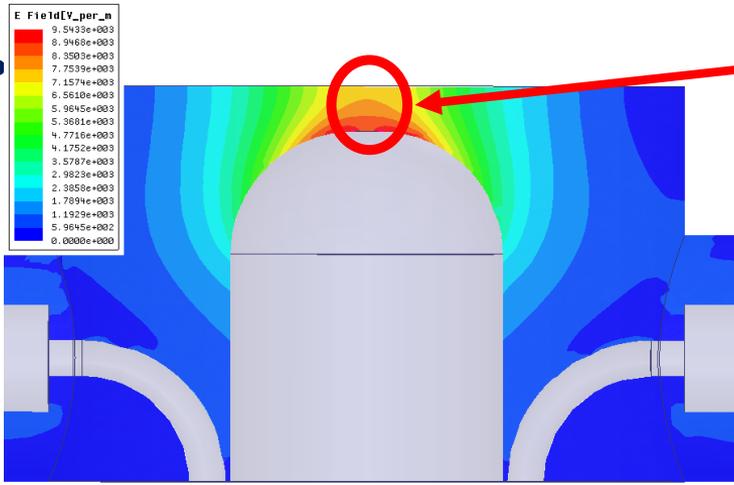
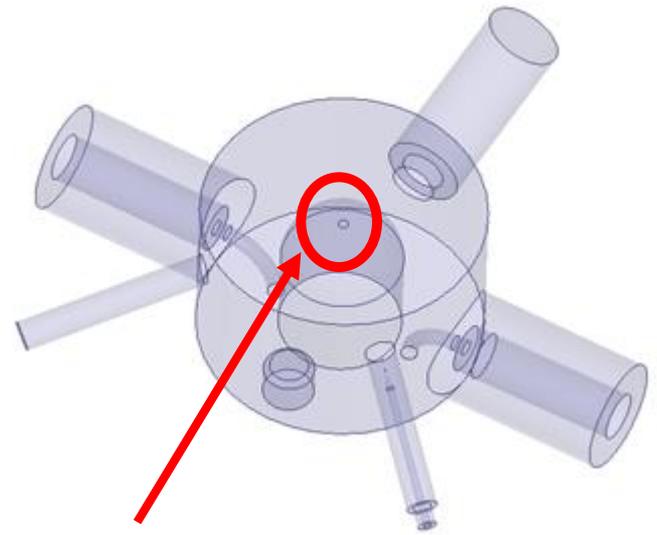
- I. Introduction du multipactor
- II. Logiciel de simulation du multipactor : Musicc3D
- III. Etudes d'influences et validation de Musicc3D
- IV. Véhicule Test pour l'étude du multipactor**
 - 1. Objectifs
 - 2. Principes
 - 3. Banc de test
 - 4. Simulations et mesures
- V. Simulations de cavités accélératrices de l'IPNO
- VI. Conclusions et perspectives

- **Conception et fabrication d'un Véhicule Test permettant l'étude du multipactor (Thales)**
- **Validation des simulations Musicc3D**
- **Caractérisation de divers coefficients d'émissions secondaires (matériaux)**
- **Etude du multipactor en fonction de l'état de surface et de sa géométrie**

- Cavity en transmission (fréquence de résonance = 704.4 MHz)
 - ↳ Source de puissance : IOT Thales à 704.4 MHz, 80 kW continu
- Mesures de puissances incidente, réfléchie et transmise
- Appareils de détections
 - ↳ Hublot
 - ↳ Sonde polarisée (mesure d'électron) (nouveau design)
 - ↳ Pompe ionique (mesure du vide)

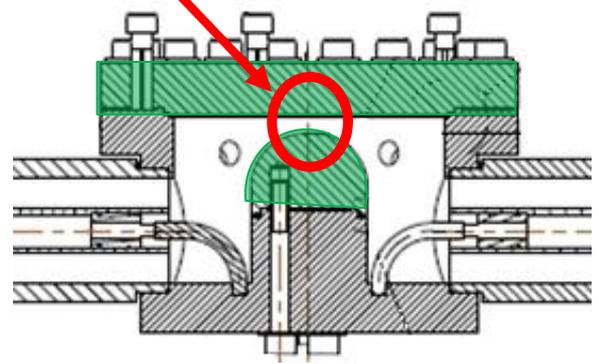


- Zone de multipactor déterminée
↳ Champ électrique maximal

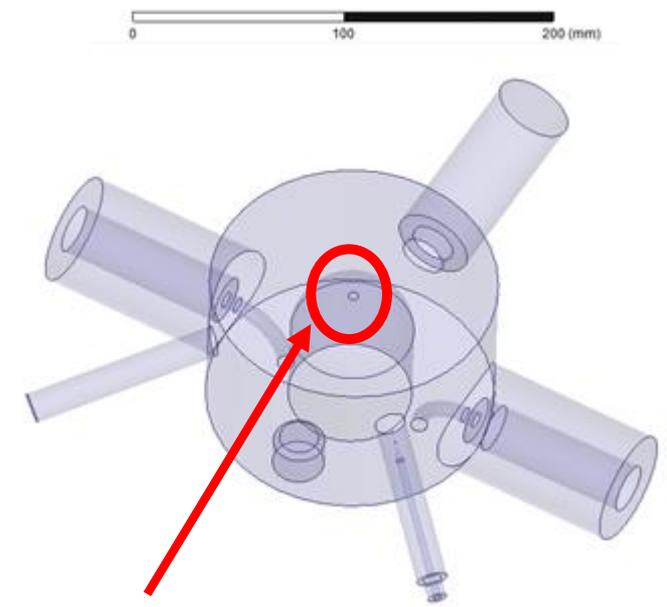
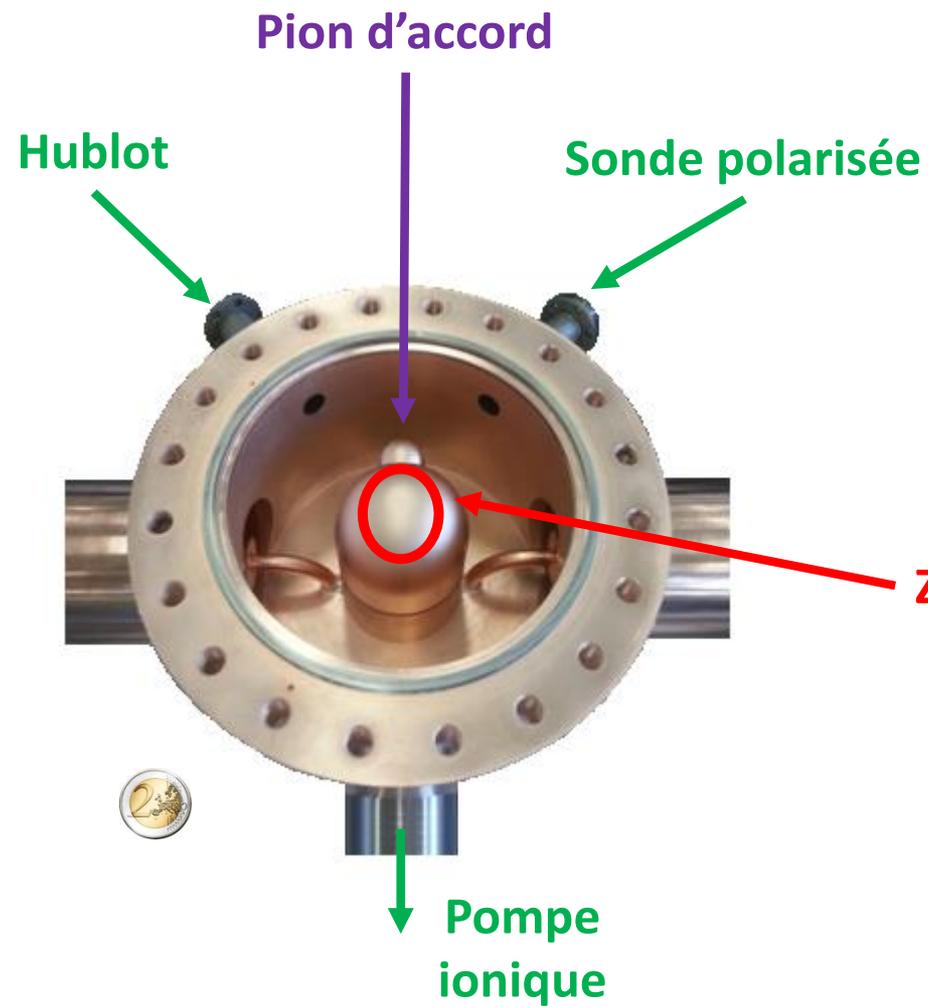


le
de
ce

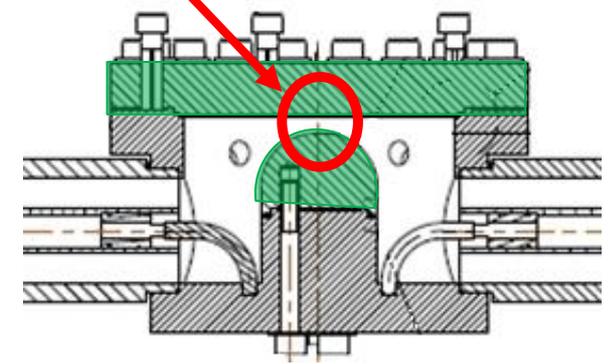
Zone de multipactor



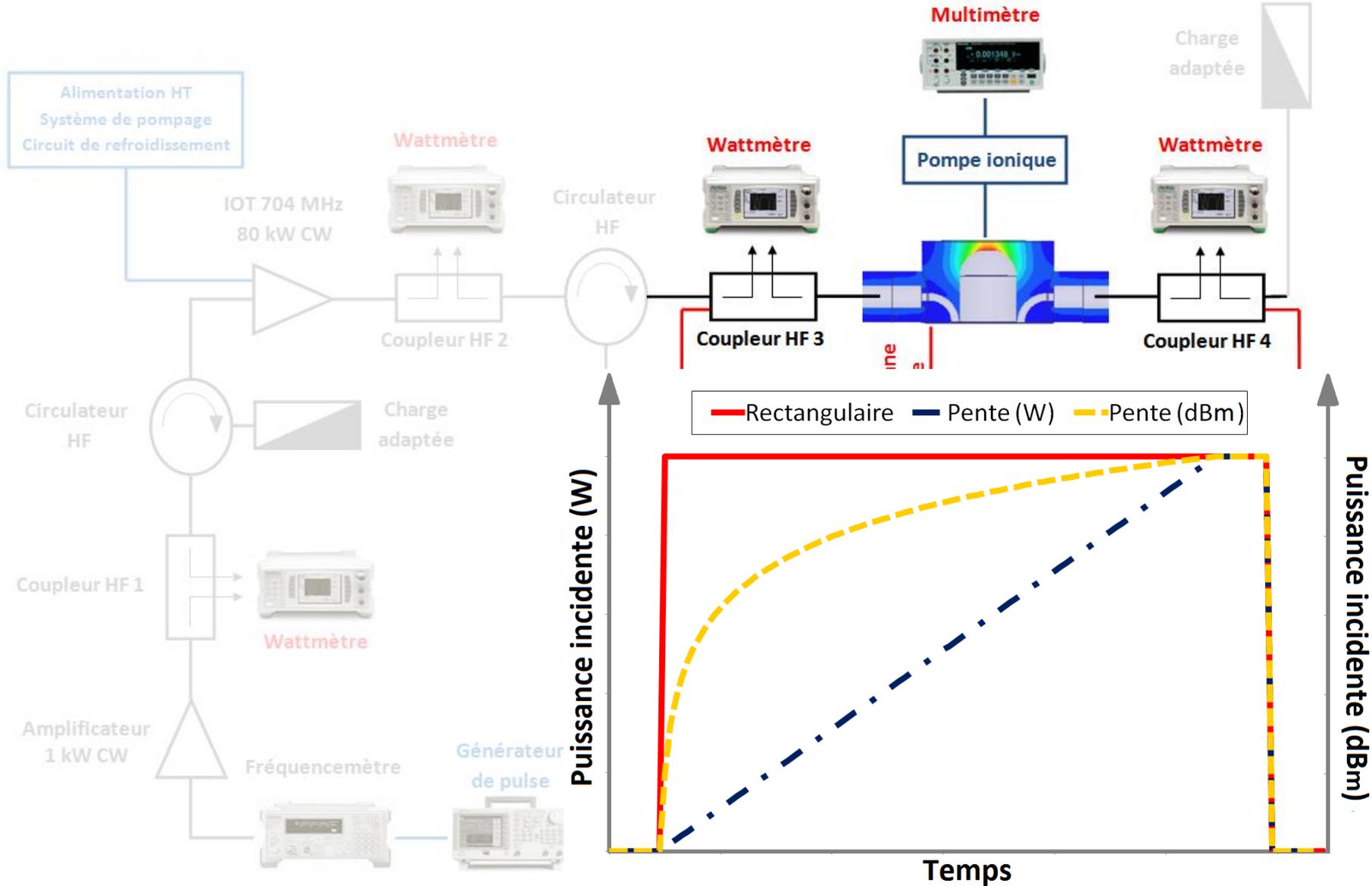
Plan médian



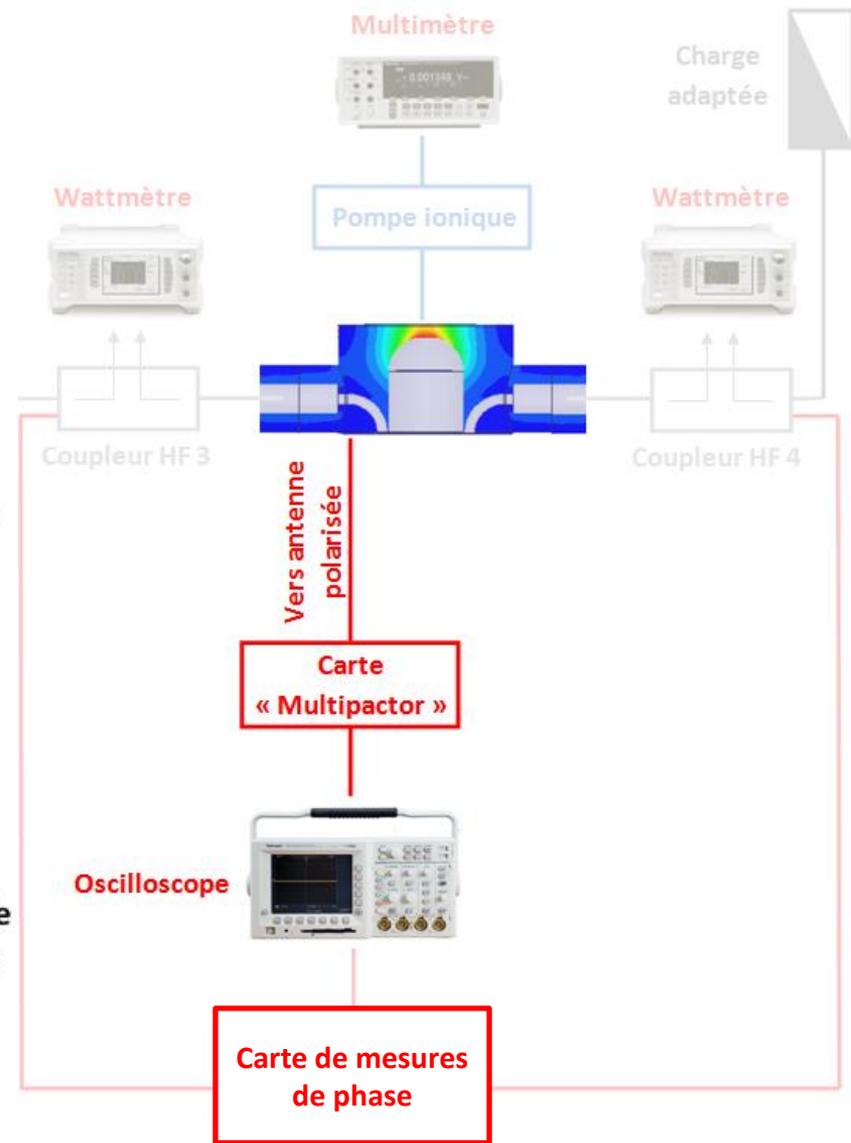
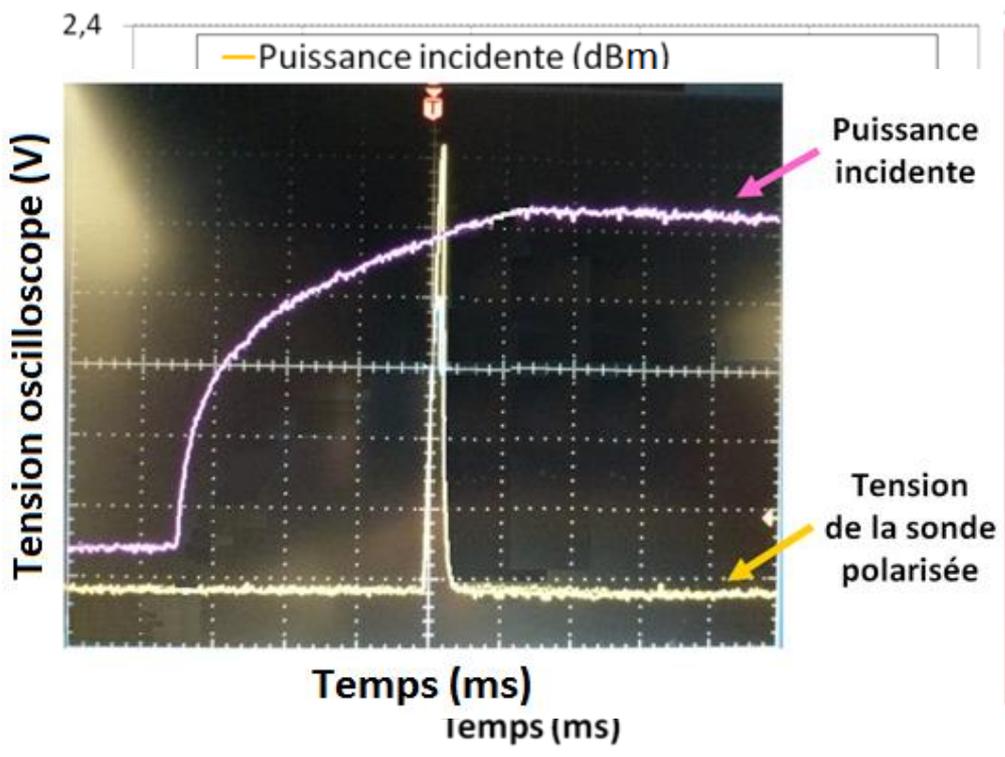
Zone de multipactor



Plan médian

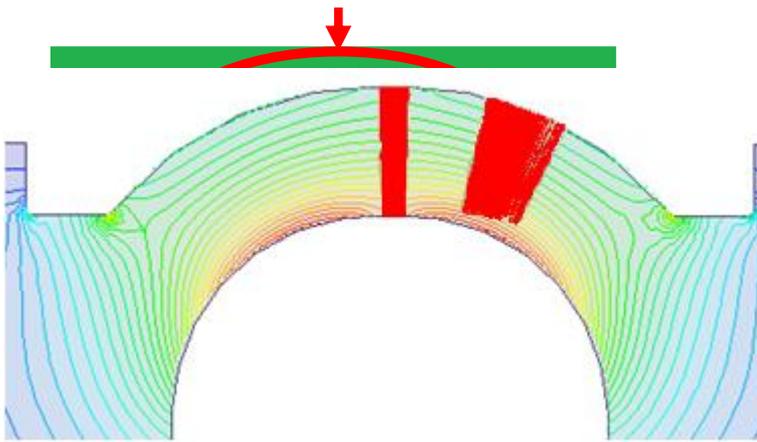


- Mesure d'électron
 - ↳ Sonde polarisée associée à une carte « multipactor »



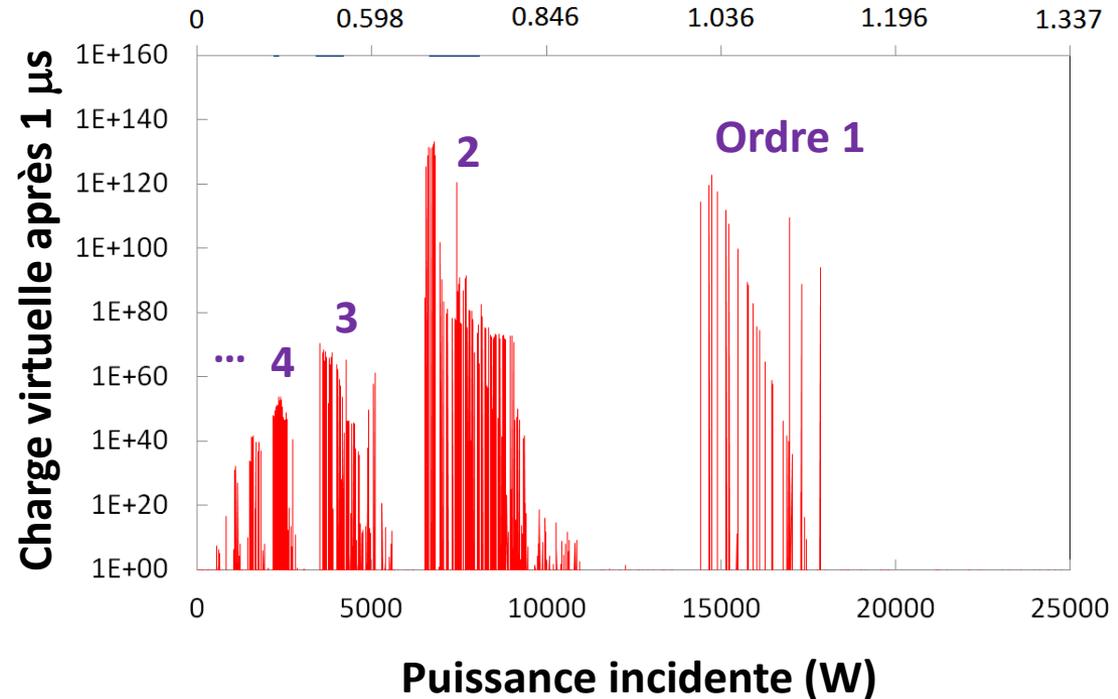
- Simulation Musicc3D

Confinement des électrons dans
la zone de multipactor



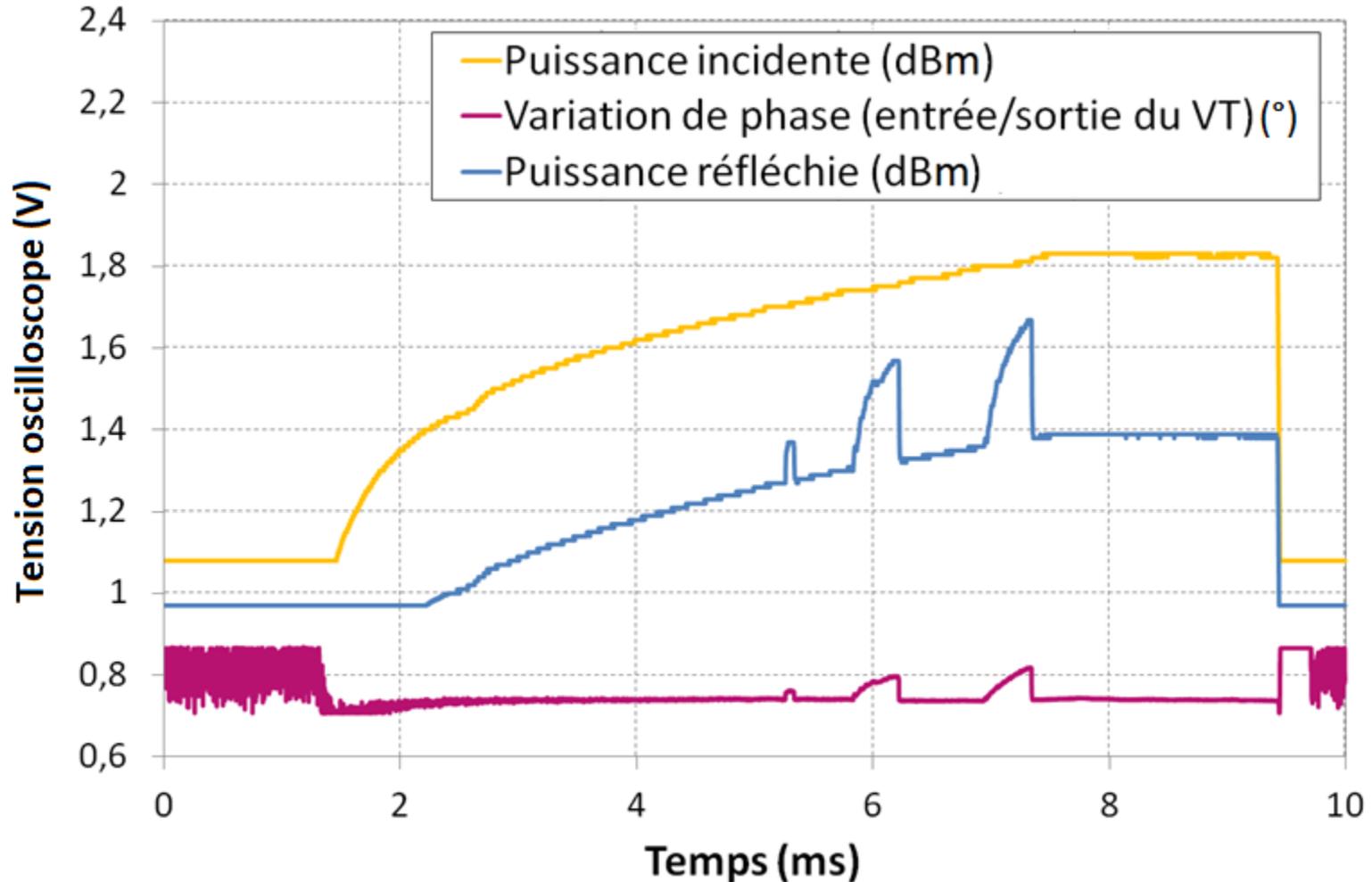
0 35 70 (mm)

Champ électrique maximal (MV/m)

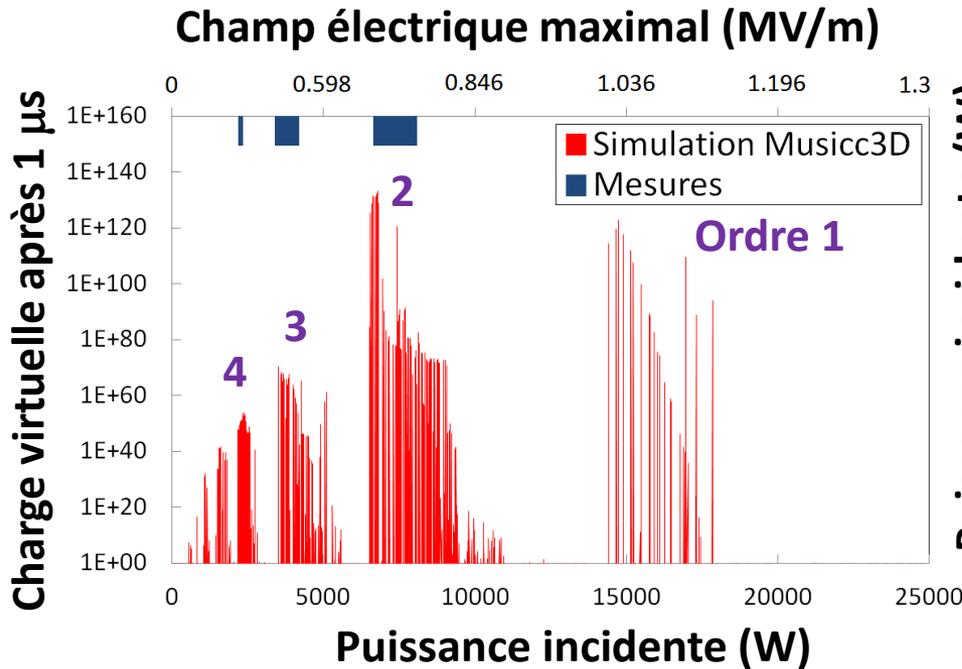


• Mesures

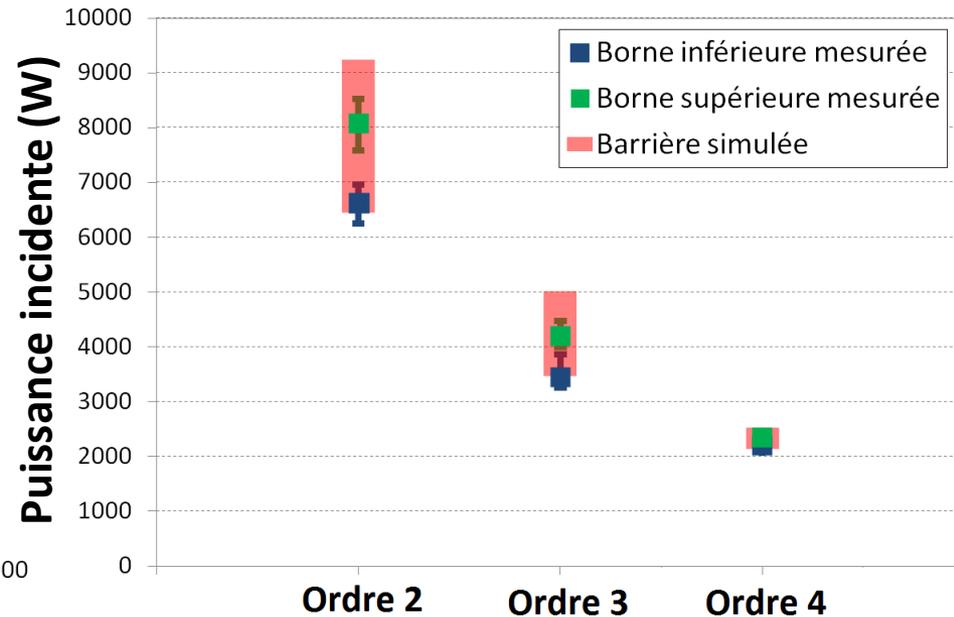
↳ Pente sur la puissance incidente (de 0 à 10 kW sur 6 ms)



- Comparaison mesures / simulation Musicc3D

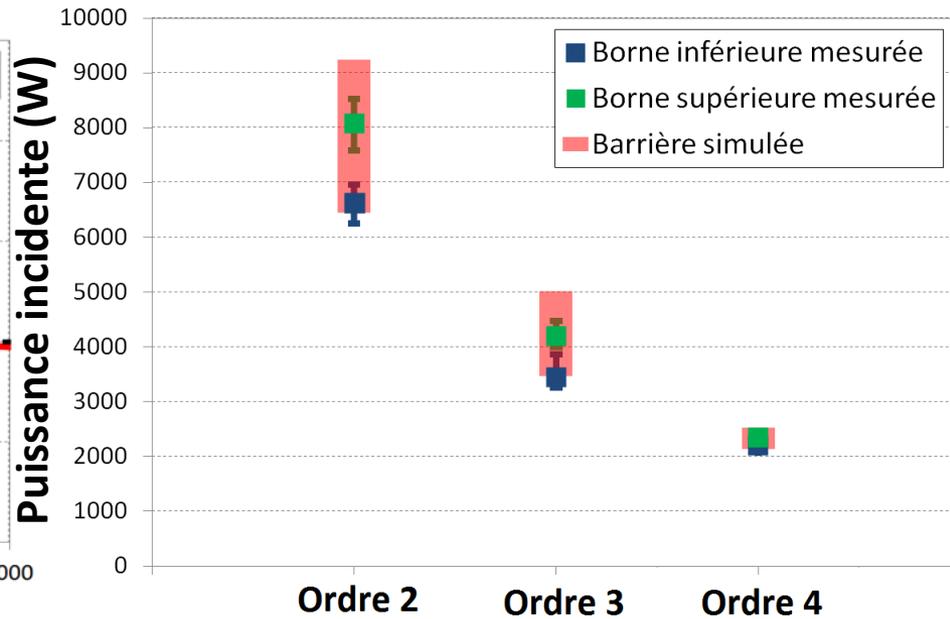
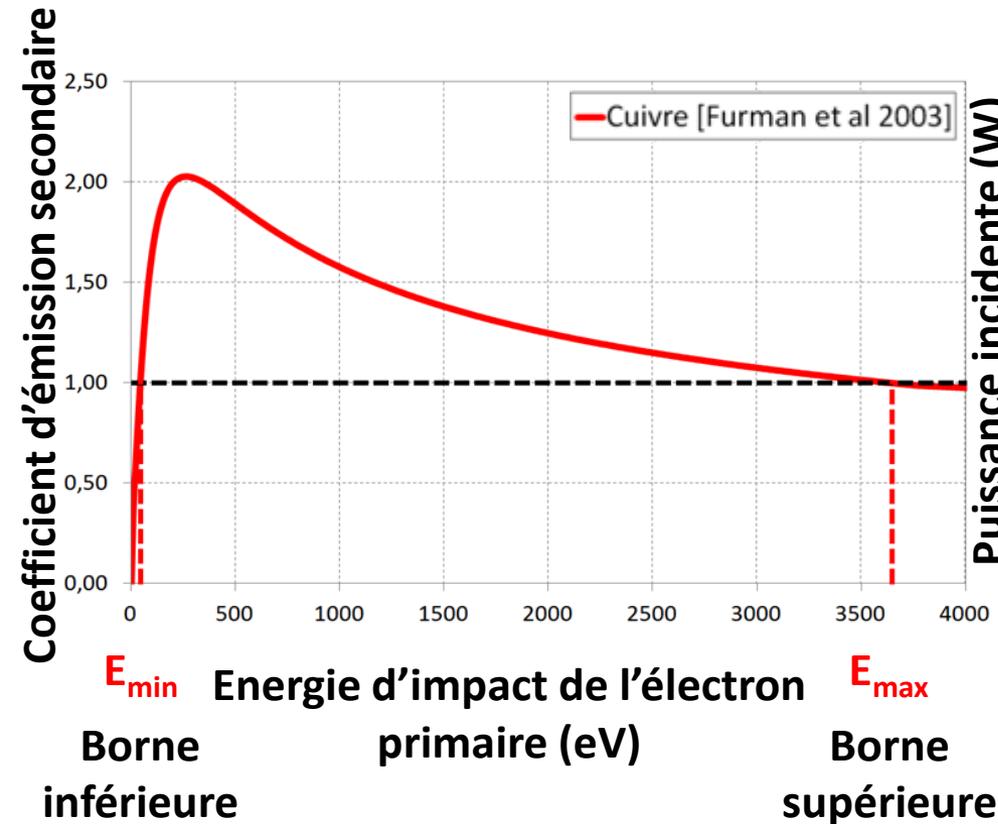


Barrières de multipactor simulées et mesurées

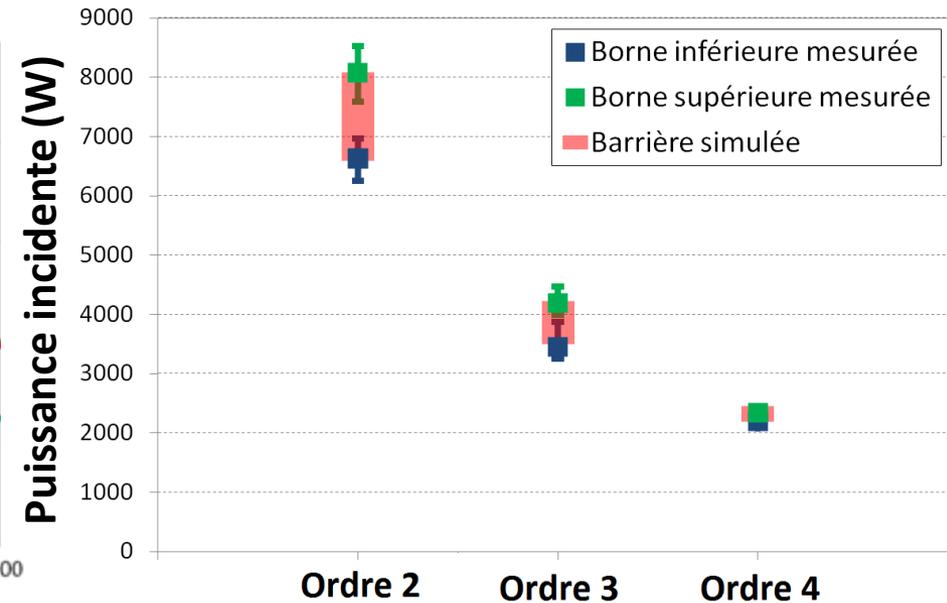
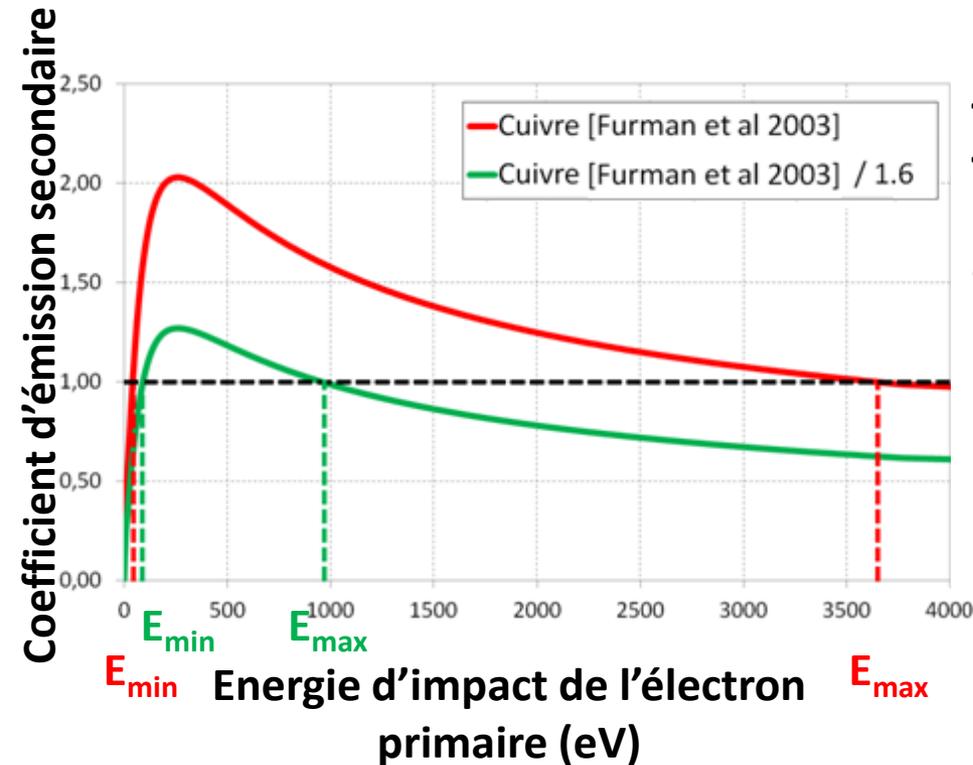


Bornes d'apparition et d'extinction des barrières de multipactor

- Coefficient d'émission secondaire utilisé

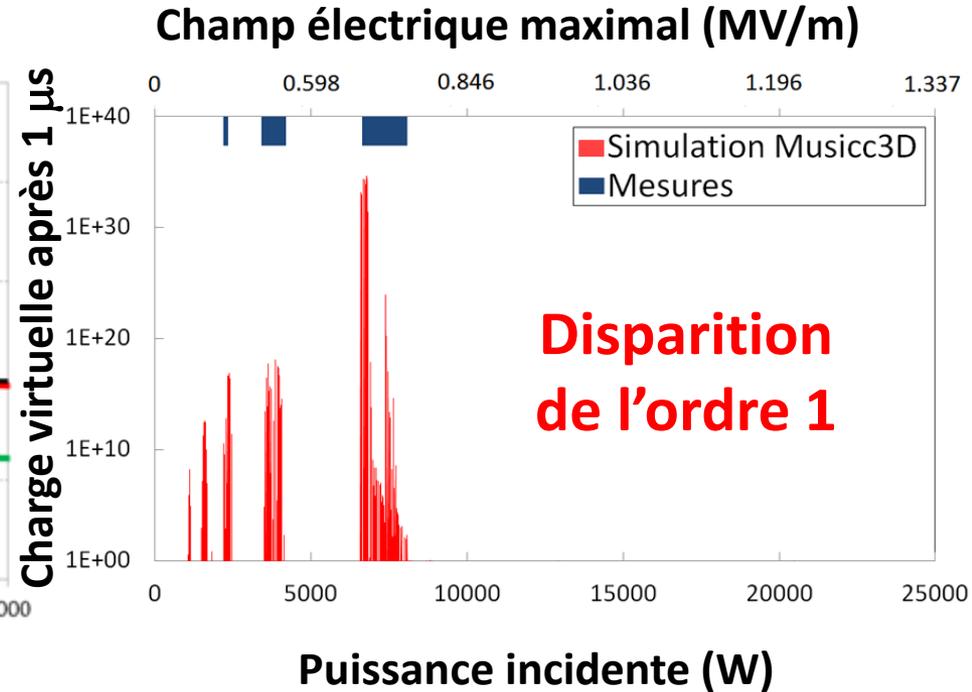
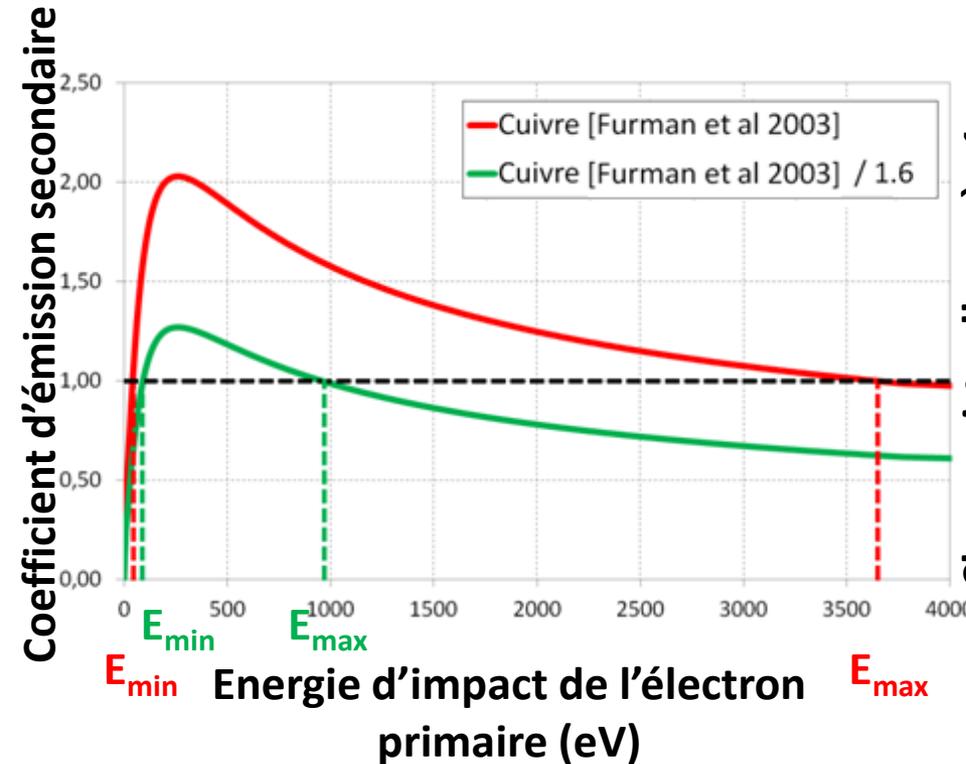


- Changement du coefficient d'émission secondaire utilisé



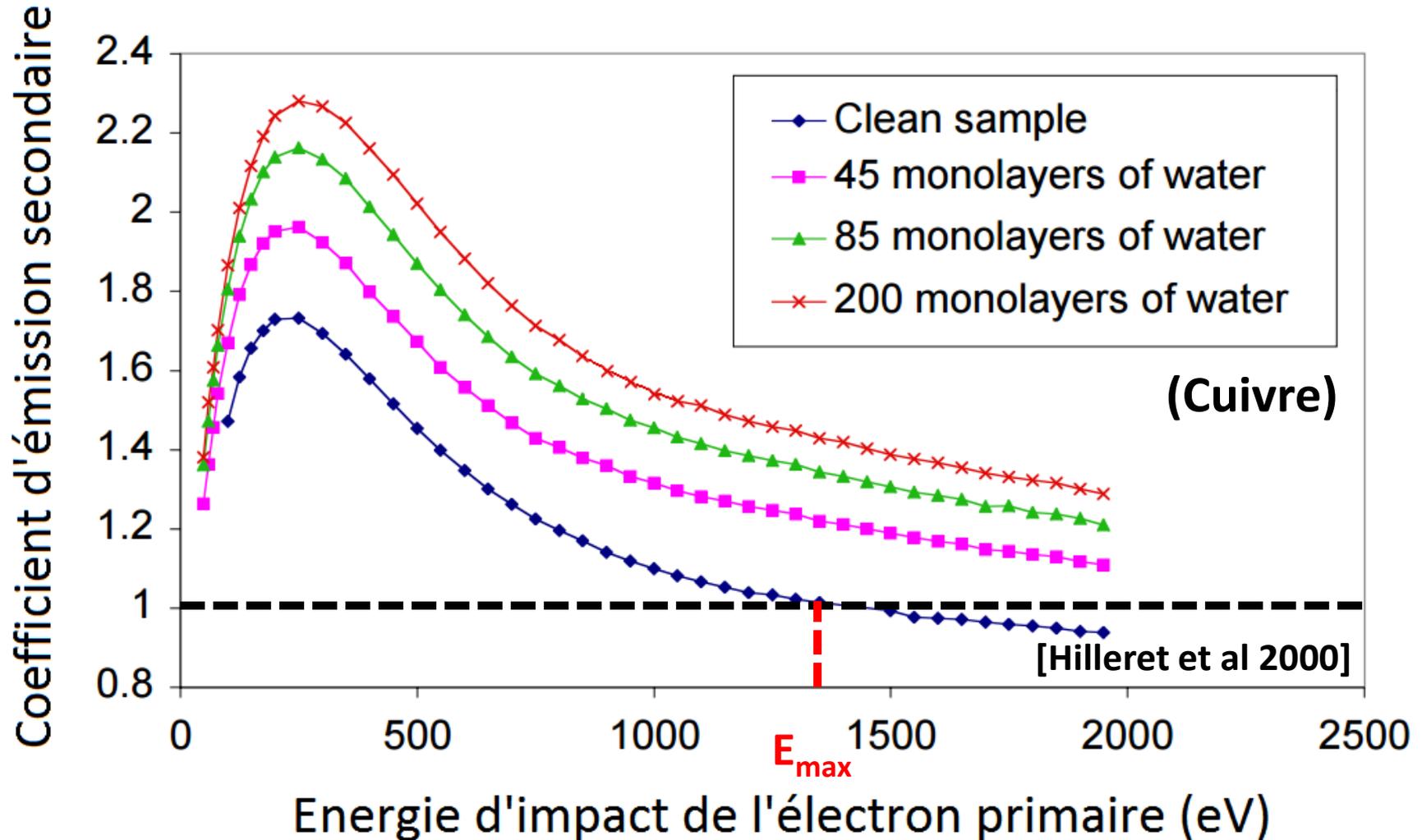
Bornes d'apparition et d'extinction des barrières de multipactor

- Comparaison mesures / simulation Musicc3D



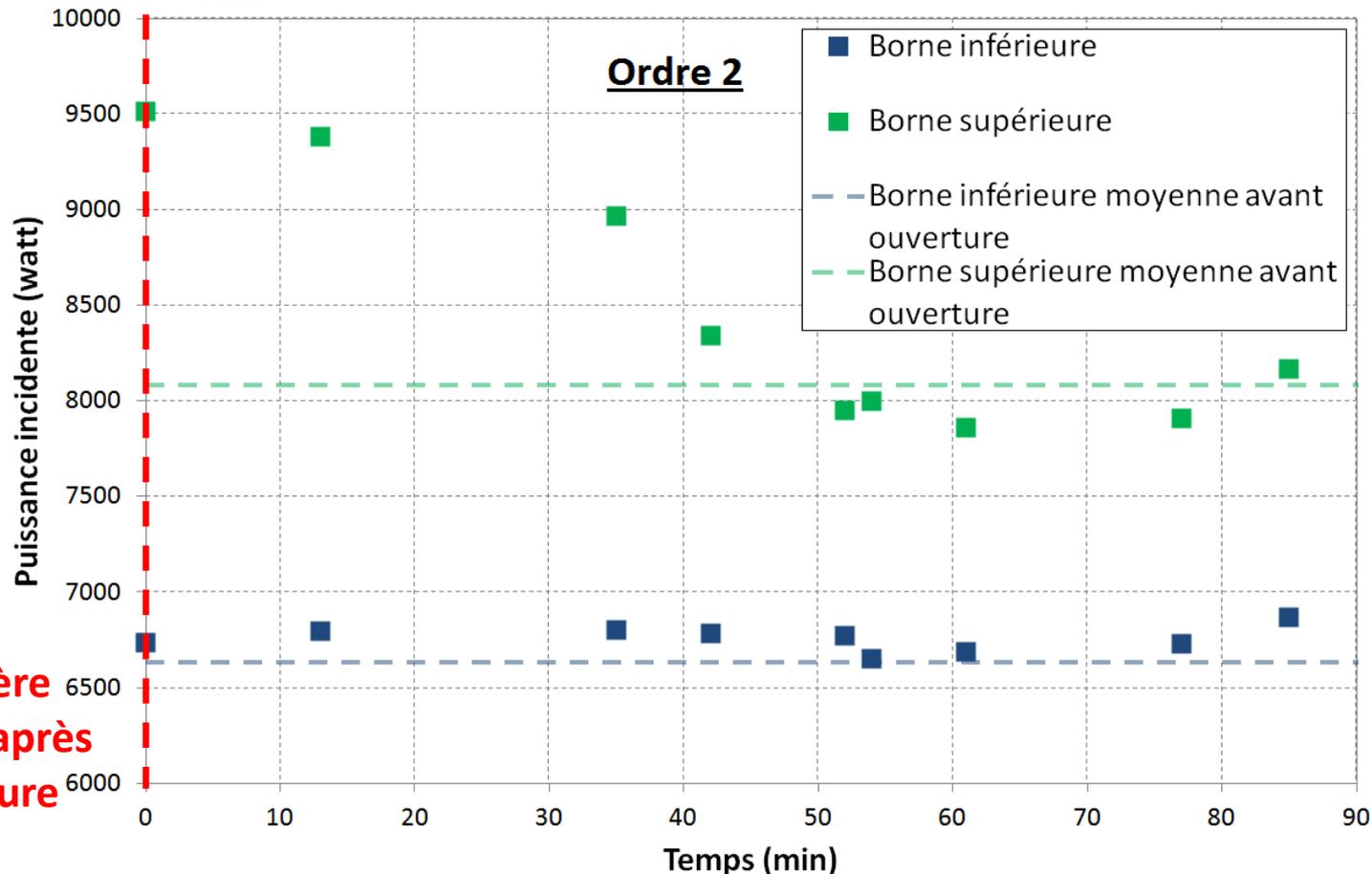
Barrières de multipactor simulées et mesurées

• Coefficient d'émission secondaire



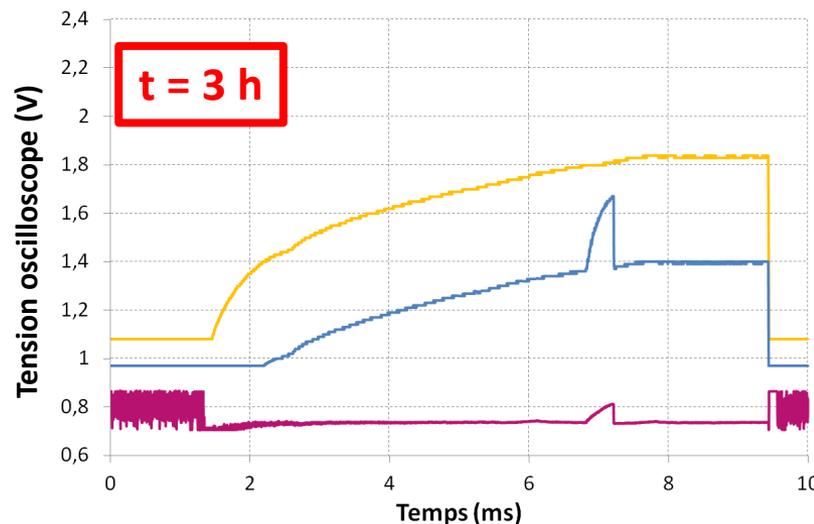
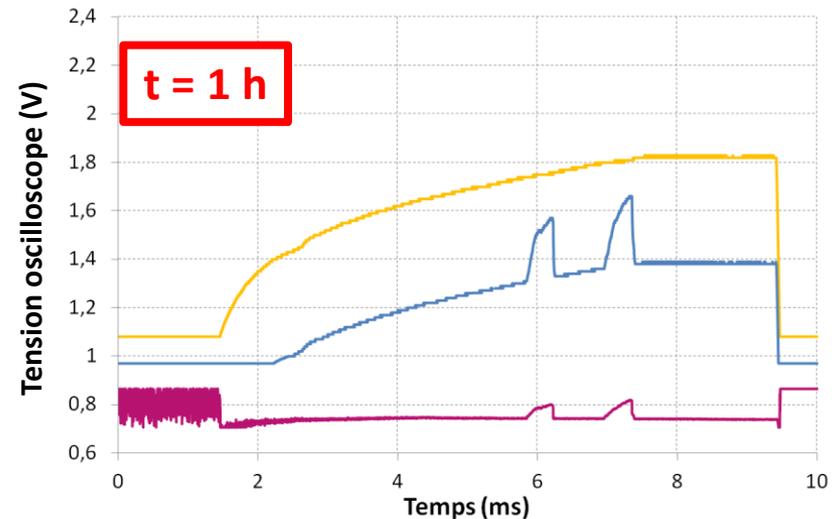
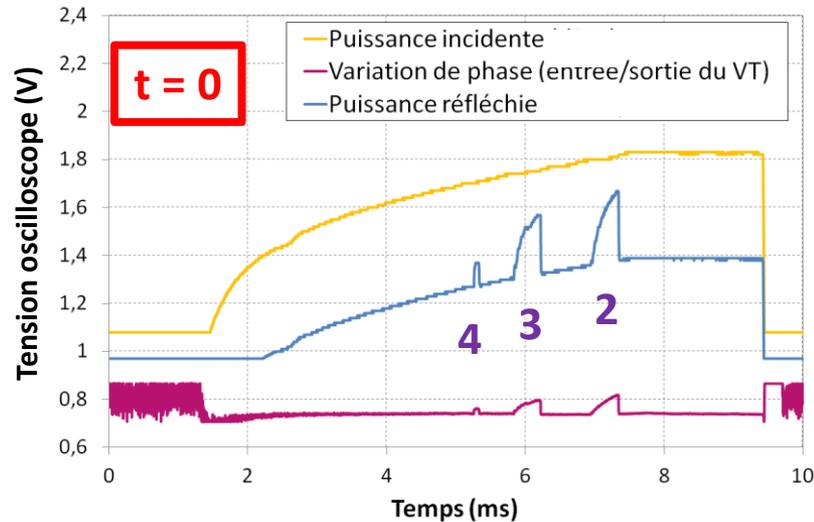
• Mesure de l'évolution du coefficient d'émission secondaire

- ↳ Mise à la pression atmosphérique puis au vide.
- ↳ Altération de la « propreté » des surfaces -> augmentation de la limite E_{max} -> augmentation de la borne supérieure



Première
mesure après
ouverture

• Conditionnement du multipactor (1 Hz)



↳ Disparition des barrières de multipactor de la moins à la plus intense

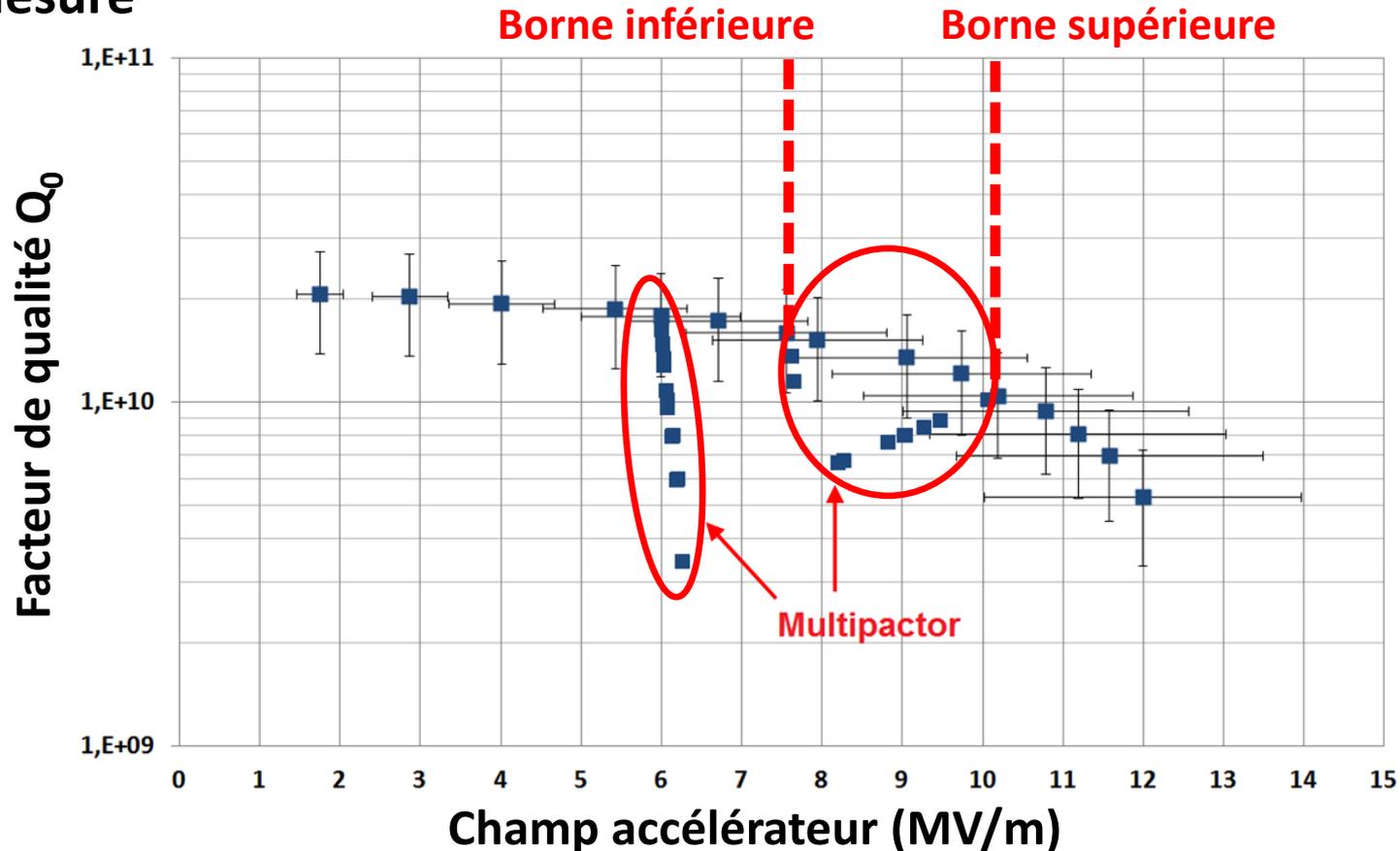
- Correspondance entre l'ordre et le champ électrique (ordre élevé \rightarrow champ faible)
- Correspondance entre le champ électrique et la probabilité d'émettre un électron primaire (champ faible \rightarrow probabilité faible)

- I. Introduction du multipactor
- II. Logiciel de simulation du multipactor : Musicc3D
- III. Etudes d'influences et validation de Musicc3D
- IV. Véhicule Test pour l'étude du multipactor
- V. Simulations de cavités accélératrices de l'IPNO**
 - 1. Principe de mesure
 - 2. Cavité Spiral 2
 - 3. Cavité elliptique MAX
 - 4. Cavité triple Spoke EURISOL
- VI. Conclusions et perspectives

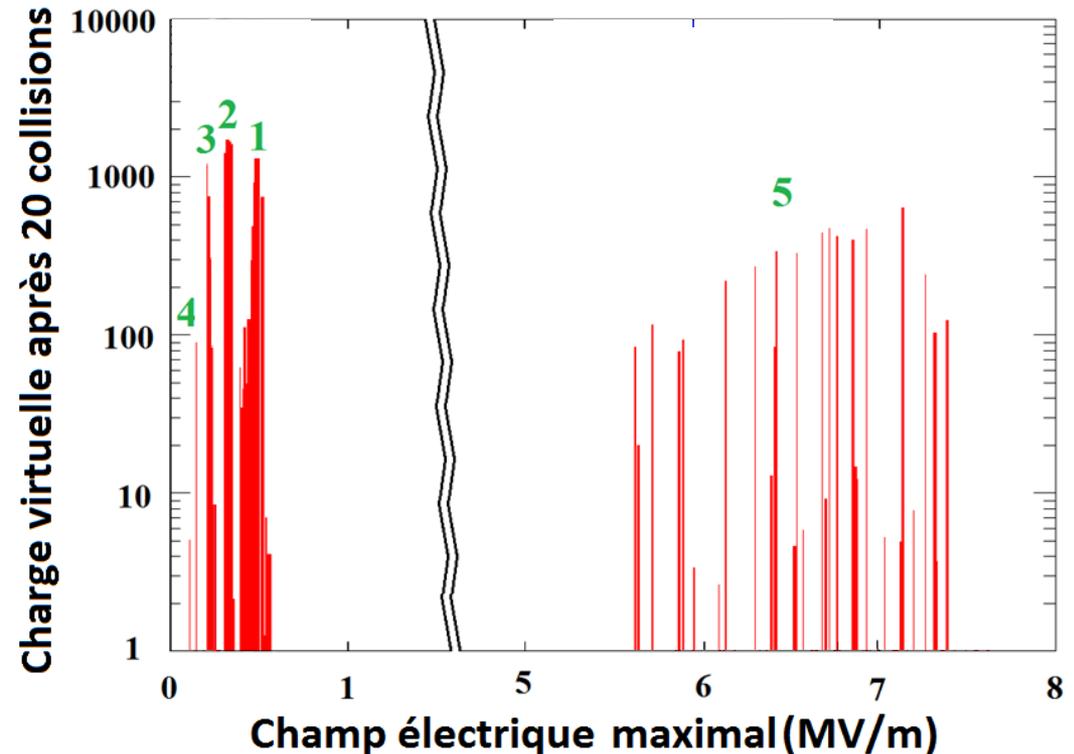
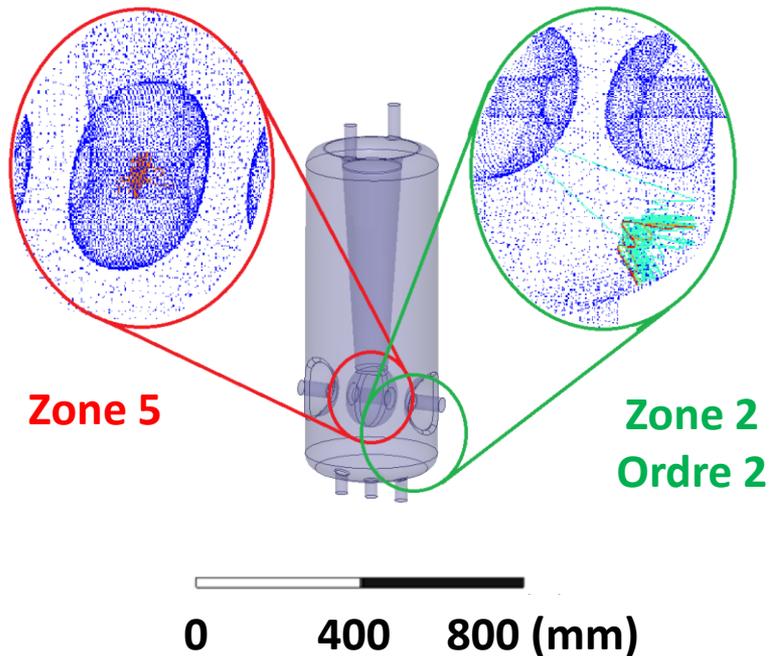
- Comparaisons entre la simulation et des mesures sur des cavités accélératrices de l'IPNO

↳ Cavités Spiral 2, elliptique MAX et triple Spoke EURISOL

- Mesure



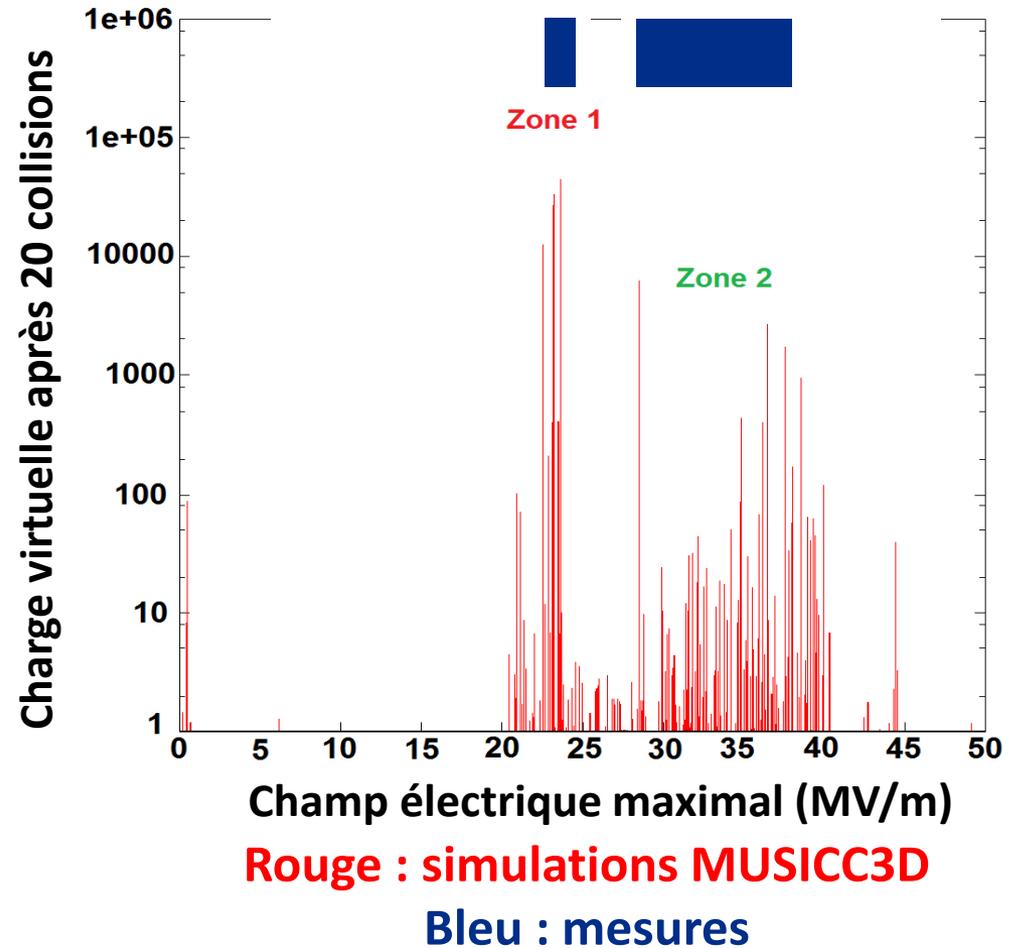
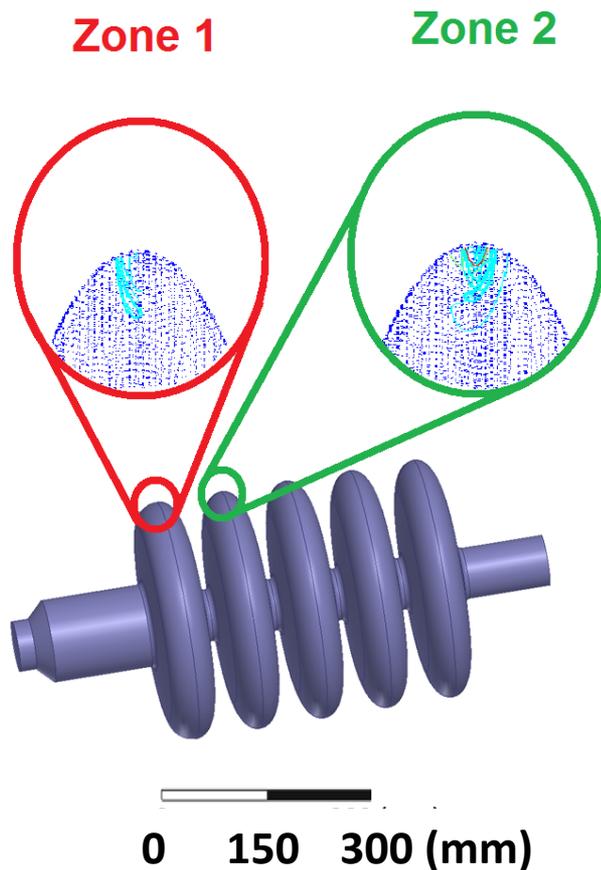
- Cavité ($\lambda/4$) testée à l'IPNO pour un nouveau accélérateur de particule à GANIL ($f = 88$ MHz) ($\beta = 0.12$)



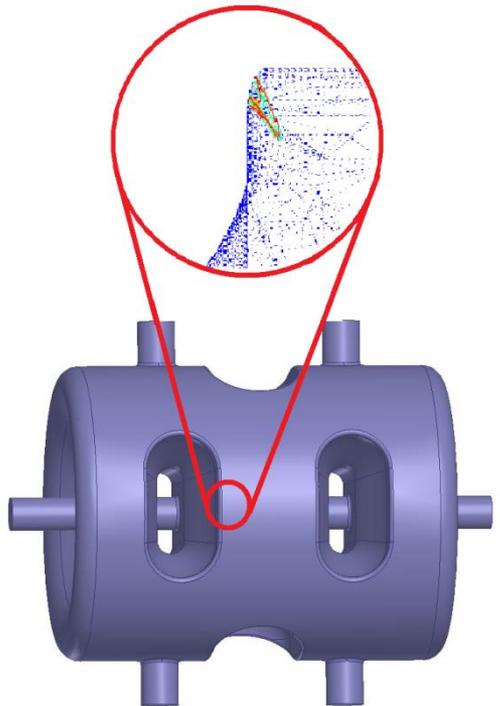
Rouge : simulations MUSICC3D

Bleu : mesures

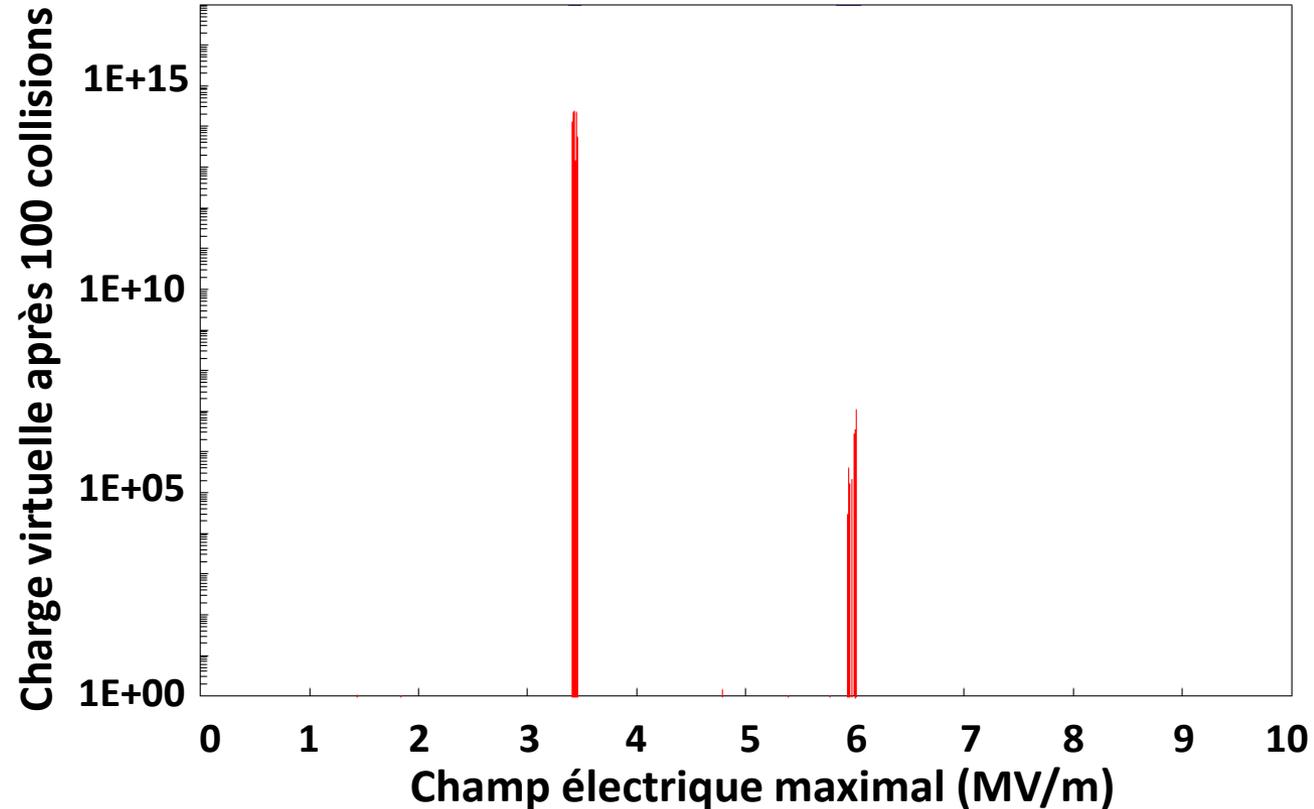
- Cavité elliptique testée à l'IPNO pour un nouveau accélérateur de proton MAX ($f = 700$ MHz) ($\beta = 0.47$)



- Cavité triple Spoke testée à l'IPNO pour le projet EURISOL ($f = 352$ MHz) ($\beta = 0.3$)



0 200 400 (mm)

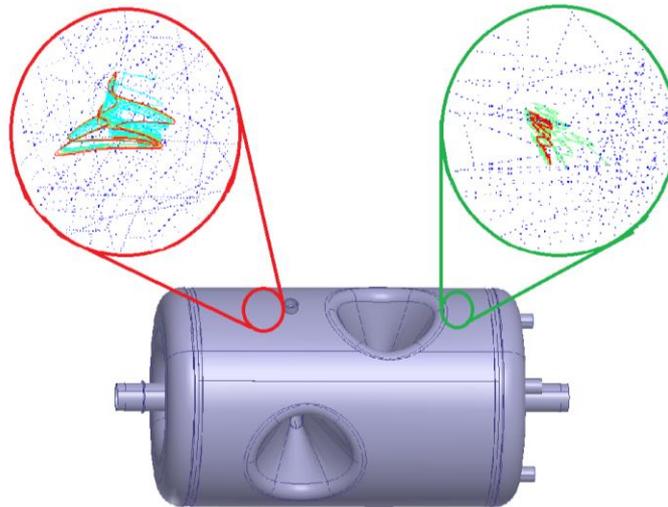


Rouge : simulations MUSICC3D

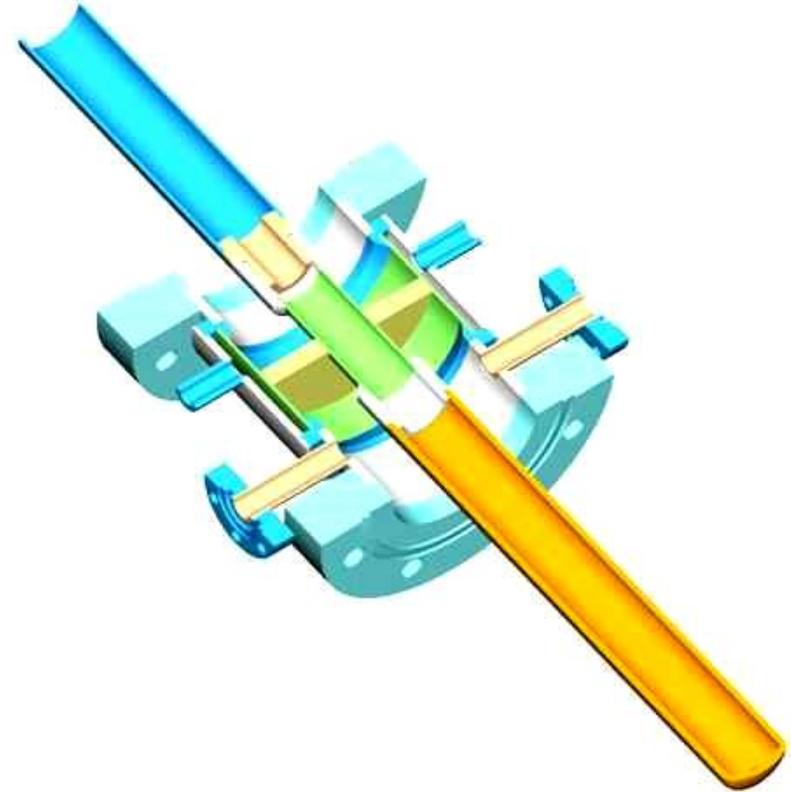
Bleu : mesures

- I. Introduction du multipactor
- II. Logiciel de simulation du multipactor : Musicc3D
- III. Etudes d'influences et validation de Musicc3D
- IV. Véhicule Test pour l'étude du multipactor
- V. Simulations de cavités accélératrices de l'IPNO
- VI. Conclusions et perspectives**

- **Multipactor est un effet parasite et son étude est primordiale dans les dispositifs HF**
 - ↳ Outils de calculs 3D
- **Musicc3D : nouveau logiciel de simulation validé**
 - ↳ Aide durant la conception des nouveaux dispositifs HF (cavités accélératrices, klystrons ...)



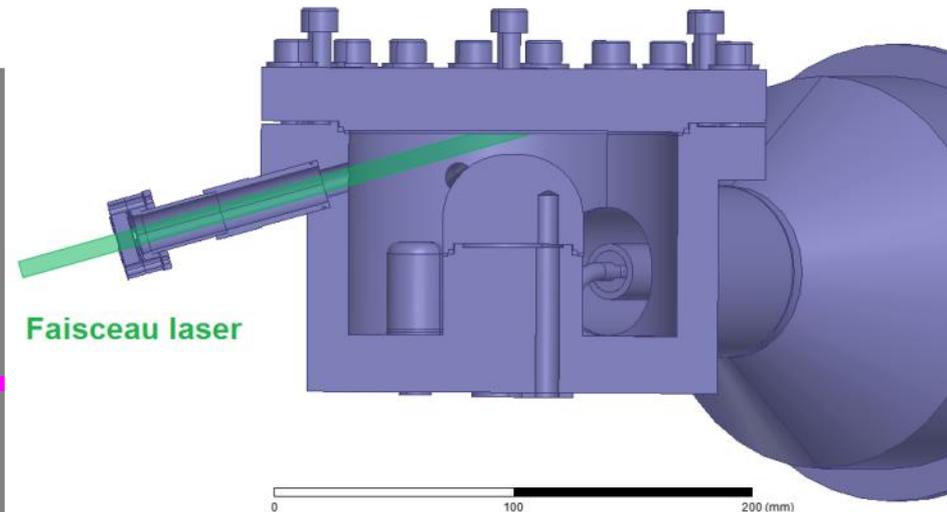
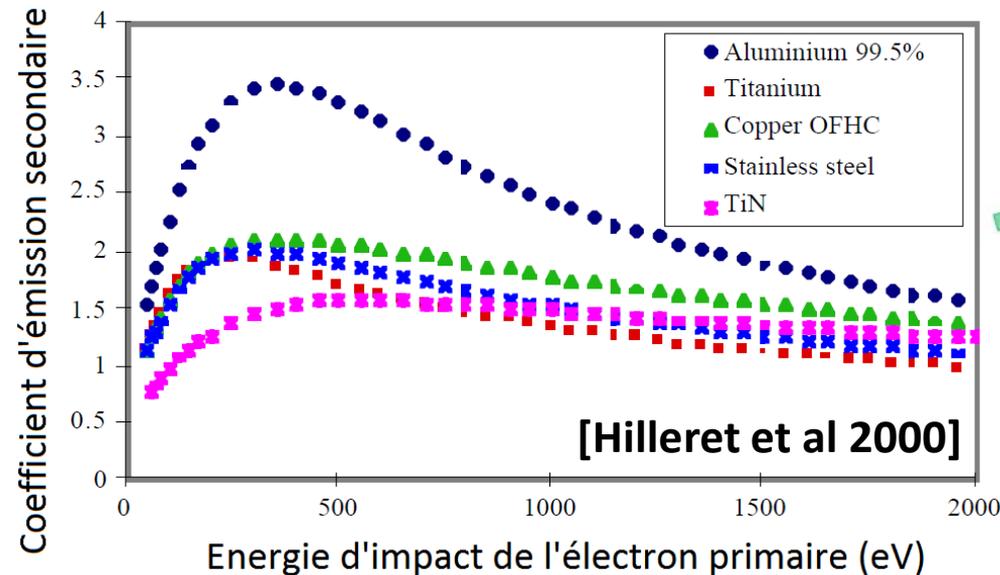
- Utilisation prochaine sur des coupleurs HF
- Evolutions :
- Calcul de la puissance perdue
 - ↳ Intensité du multipactor
- Traitement des diélectriques
 - ↳ Accumulation de charge
- Charge d'espace



- Validation des résultats des simulations Musicc3D
- Indication sur le coefficient d'émission secondaire
- Importance de l'émission d'électrons primaire



- Mesure de coefficients d'émission secondaire
 - ↳ Réalisation d'un dépôt de titane (Thales)(mesure prochaine)
- Etude du multipactor en fonction de l'état de surface et de sa géométrie
- Création d'électrons primaires par laser



Merci pour votre attention

Contacts :

Thibault Hamelin : hamelin@ipno.in2p3.fr
thibault.hamelin@orange.fr

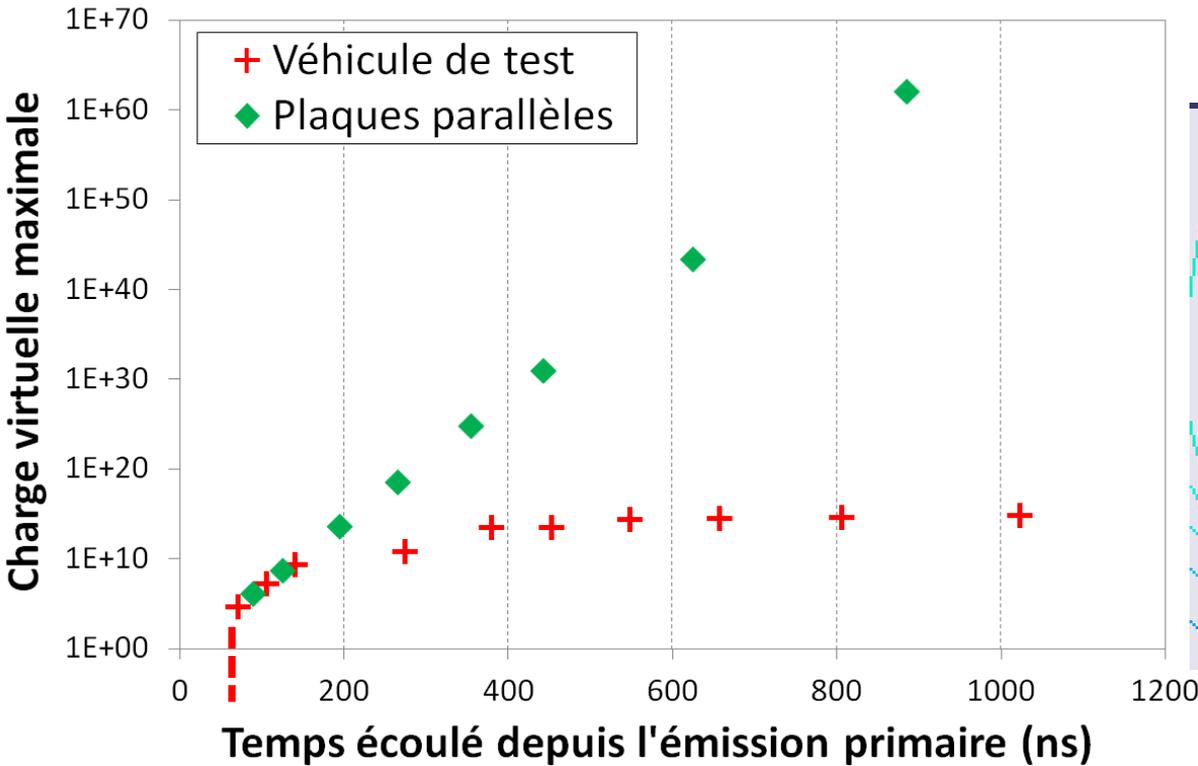
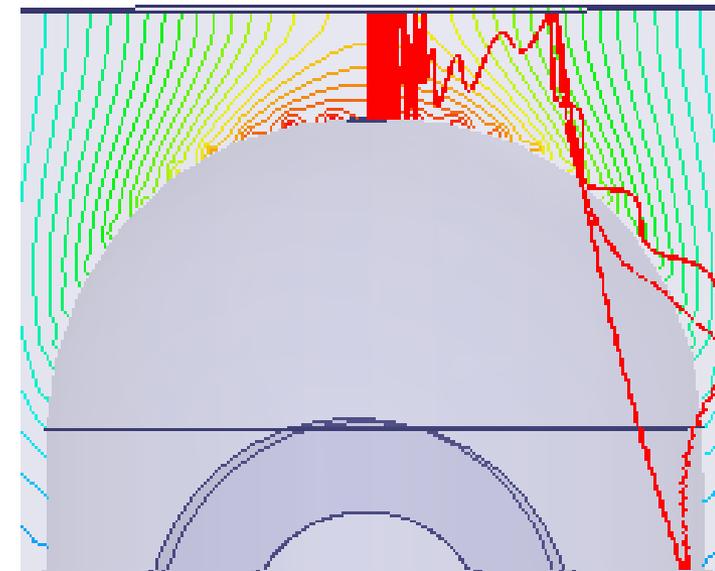
Marin Chabot : chabot@ipno.in2p3.fr

Sébastien Bousson : bousson@ipno.in2p3.fr

Annexes

• Simulation Musicc3D

Evacuation des électrons de la zone de multipactor



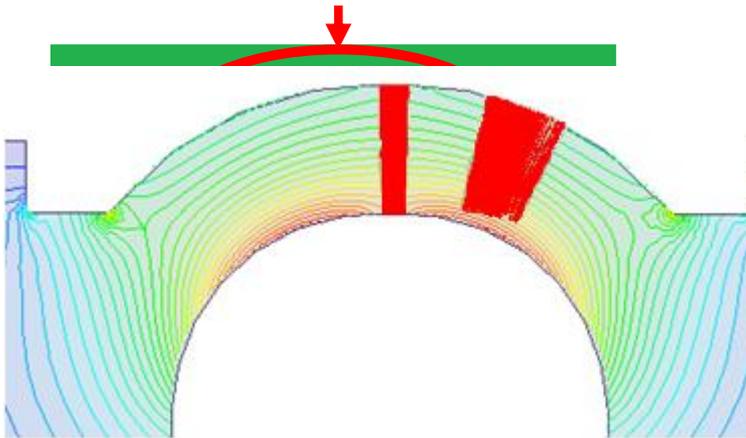
20 collisions

Aspect temporel des simulations très important

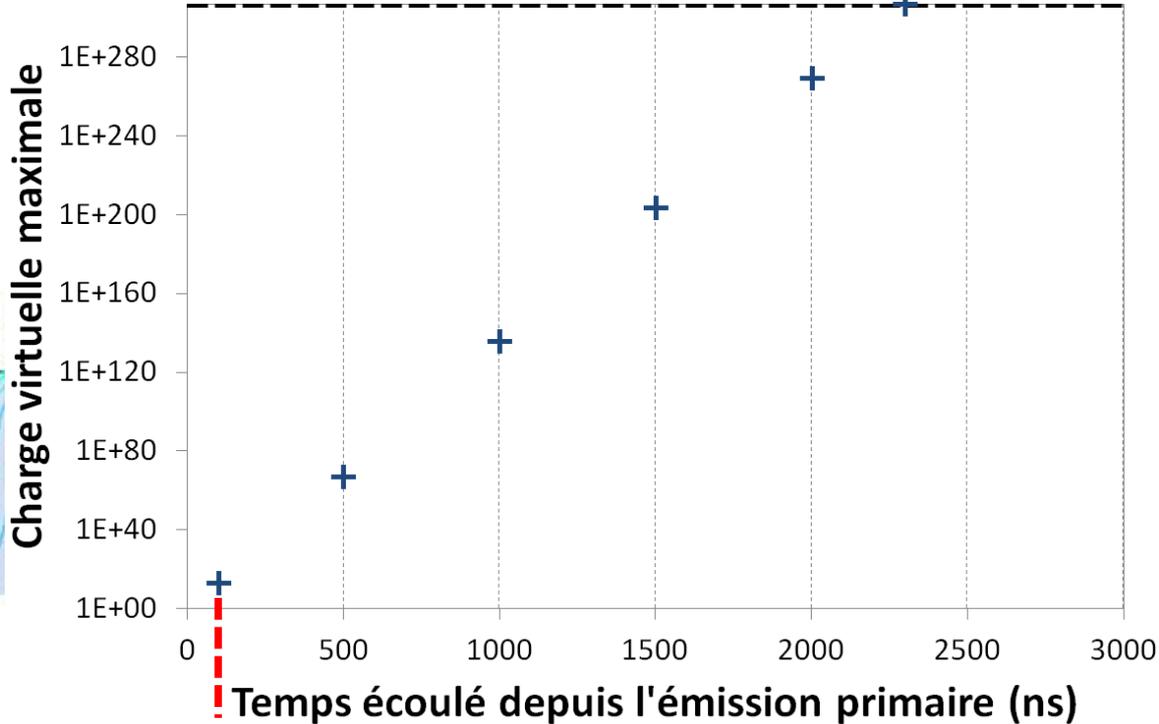
Le critère d'arrêt des simulations au bout de 20 collisions peut amener des erreurs sur la détermination de l'intensité du multipactor

• Simulation Musicc3D

Confinement des électrons dans la zone de multipactor



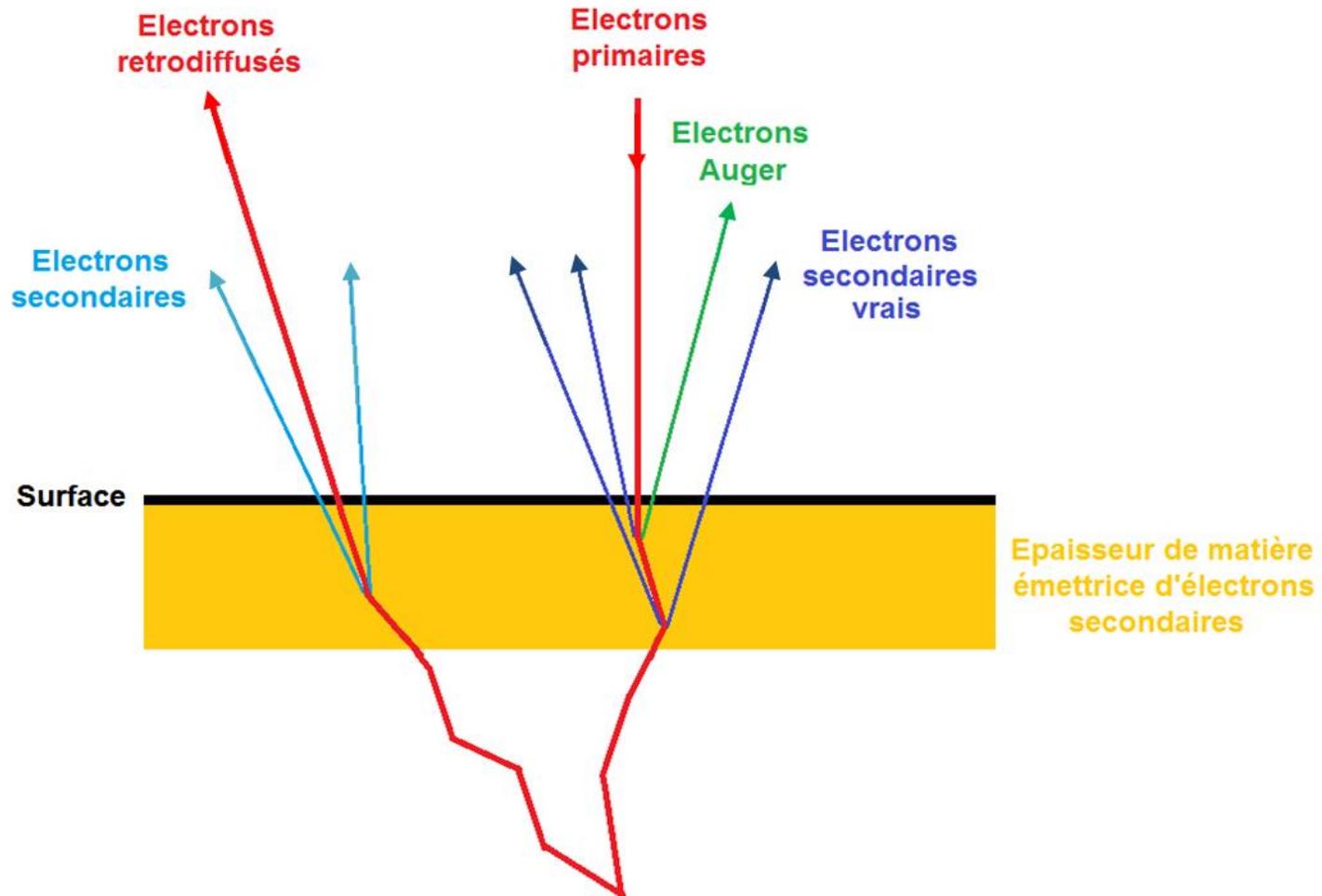
0 35 70 (mm)



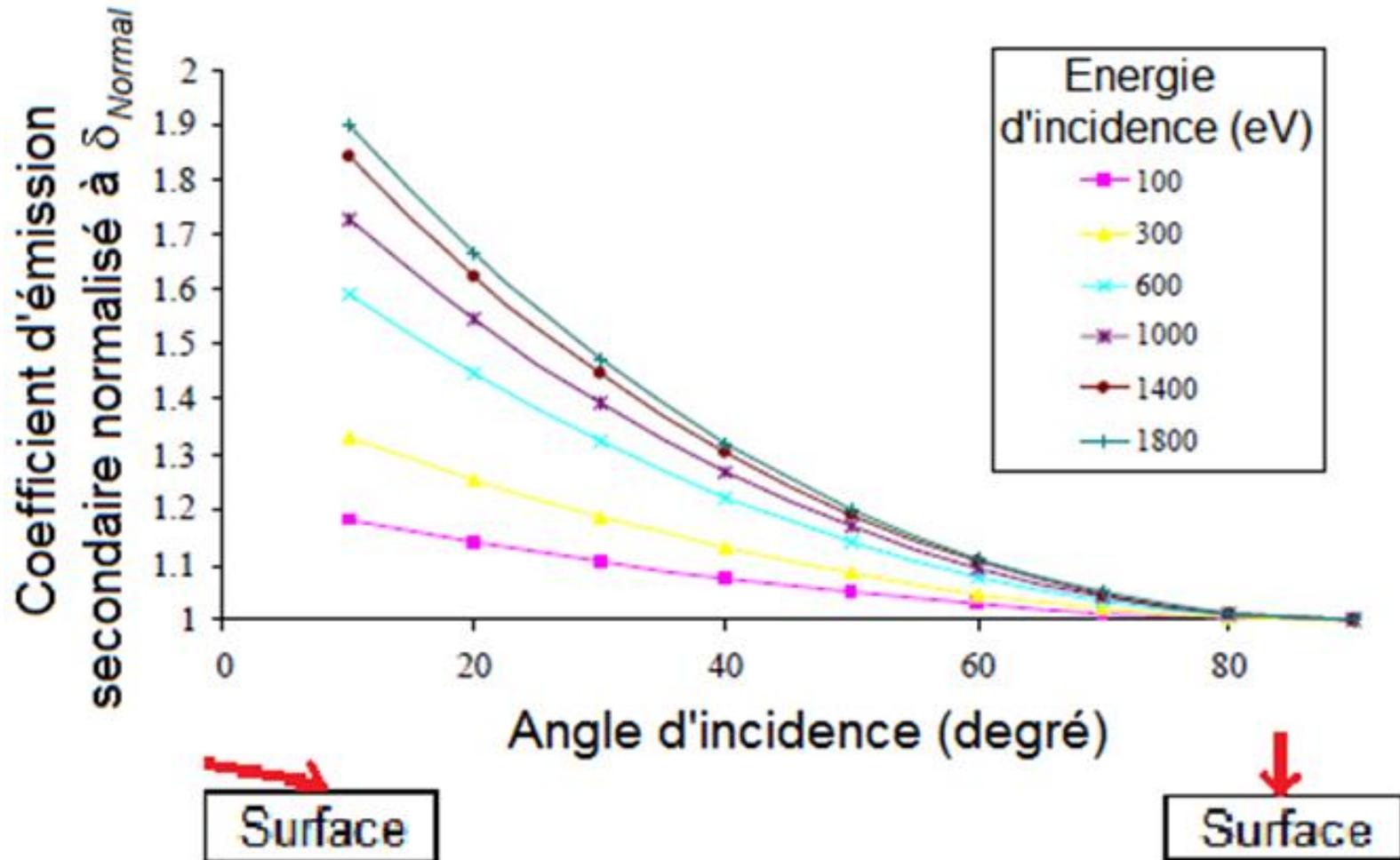
20 collisions

Aucune saturation observée

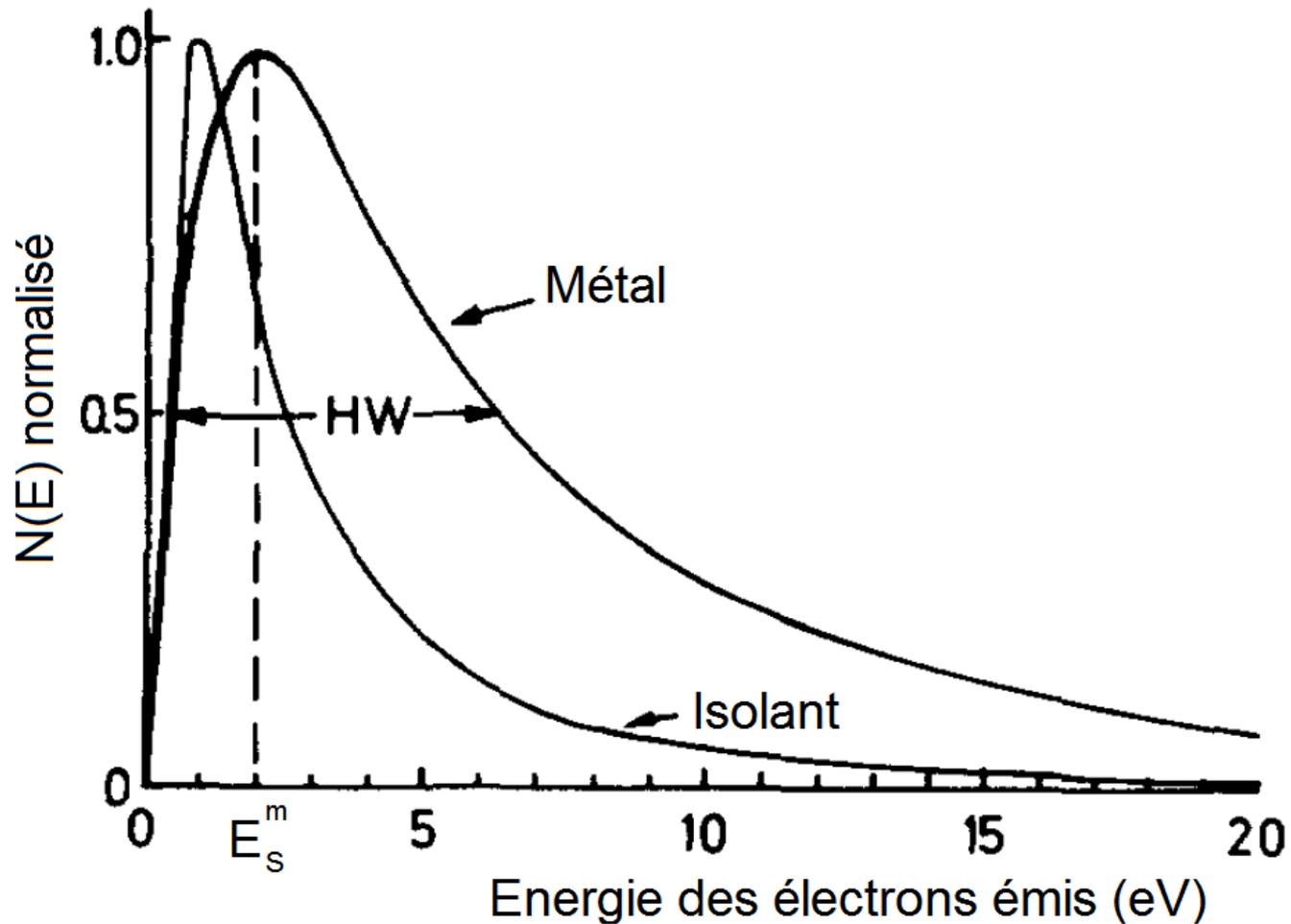
- Emission d'électrons



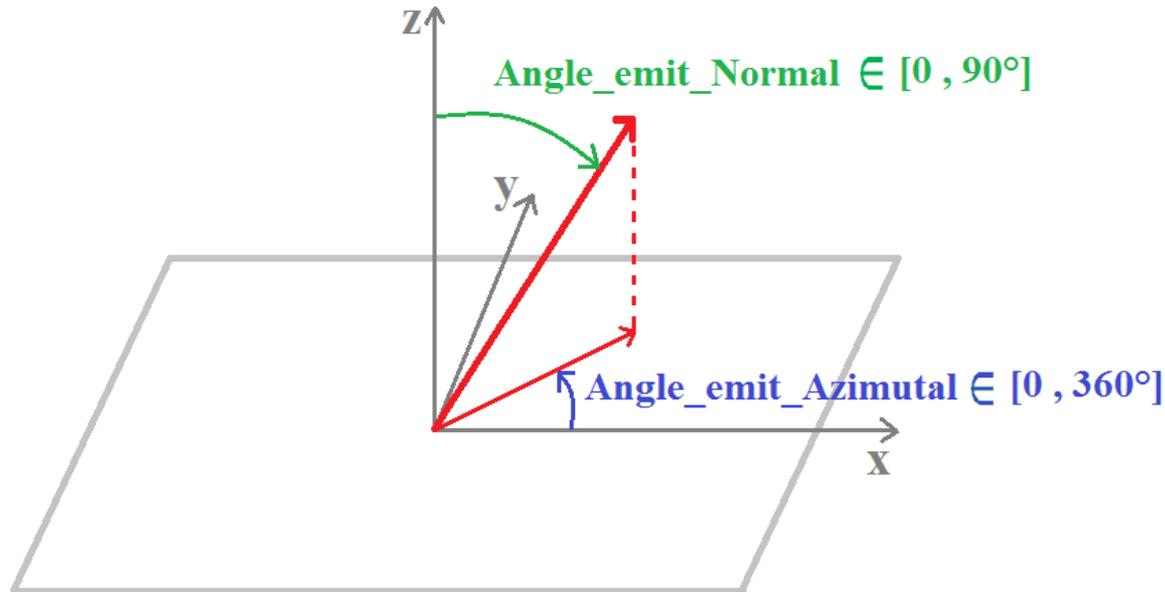
- Emission d'électrons secondaires



- Emission d'électrons secondaires



- Angles d'émission d'électrons secondaires



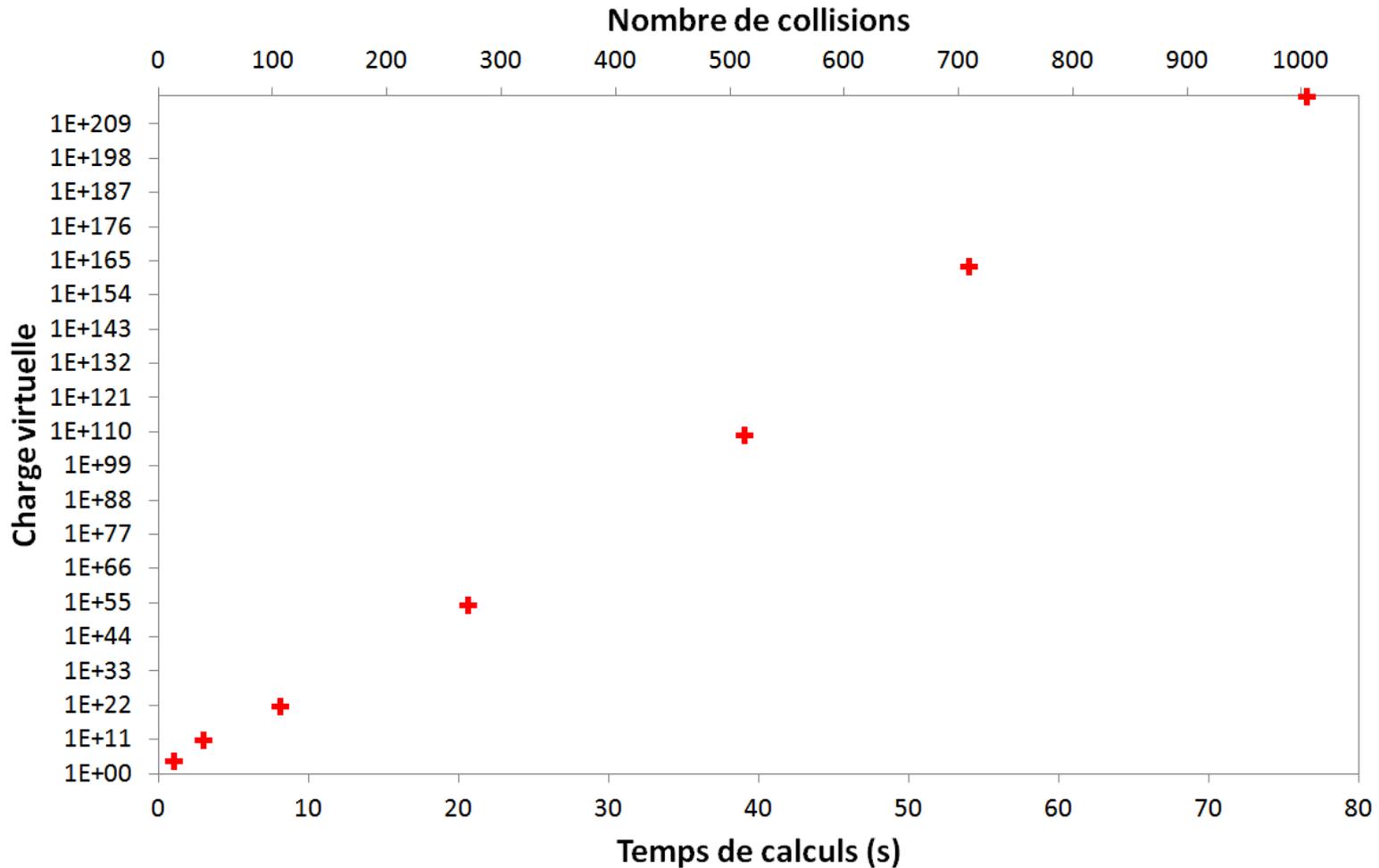
- Angle azimutal aléatoire entre $[0, 360^\circ]$

- ↳ Fixe ou de distribution uniforme

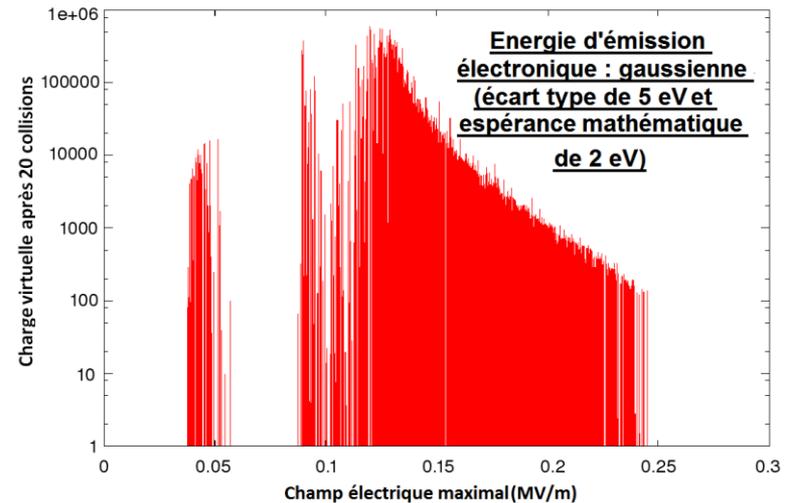
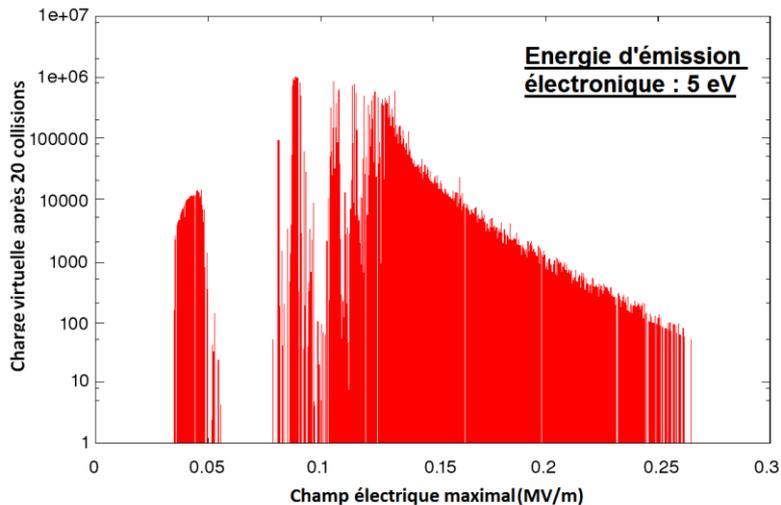
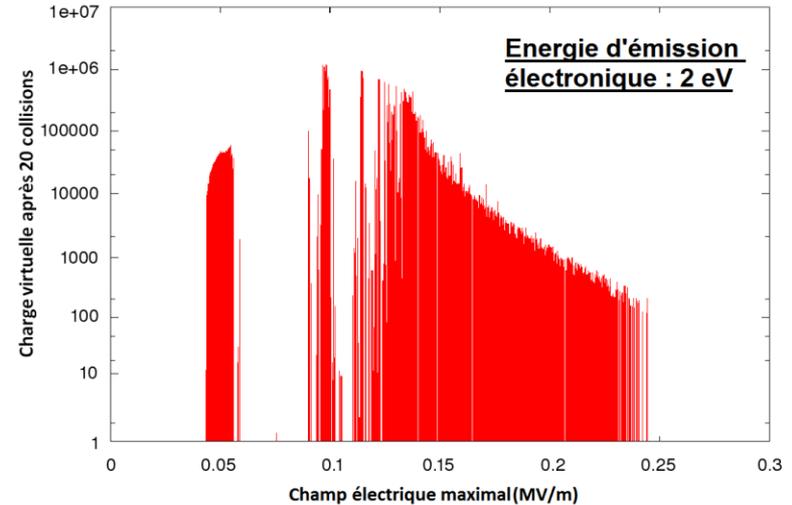
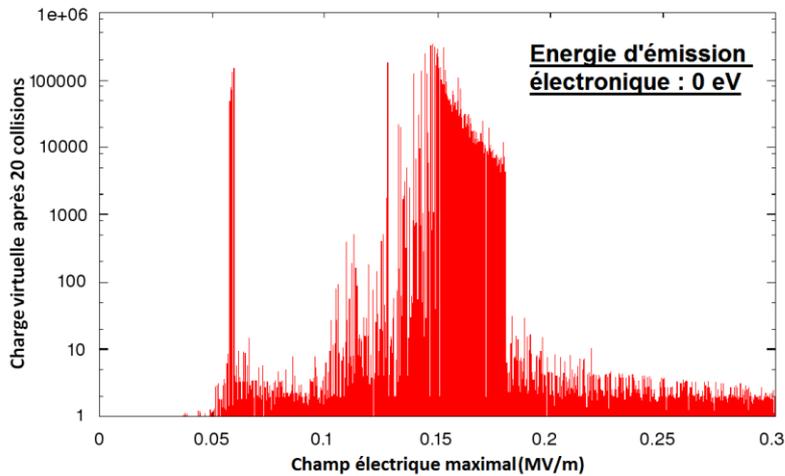
- Angle *normal* aléatoire entre $[0, 90^\circ]$

- ↳ Fixe ou de distribution uniforme ou gaussienne

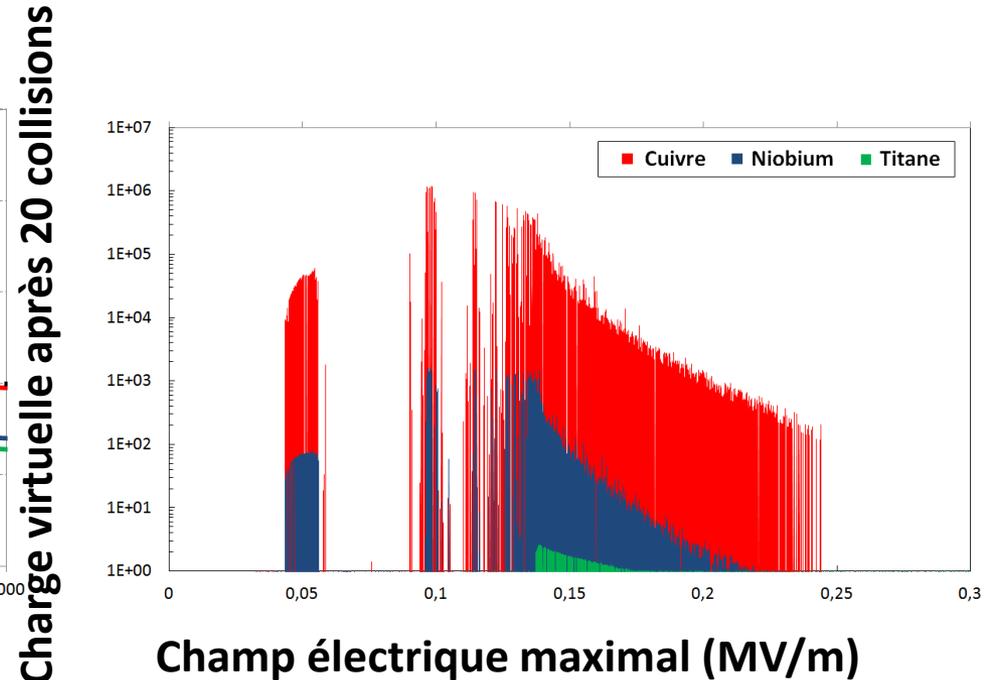
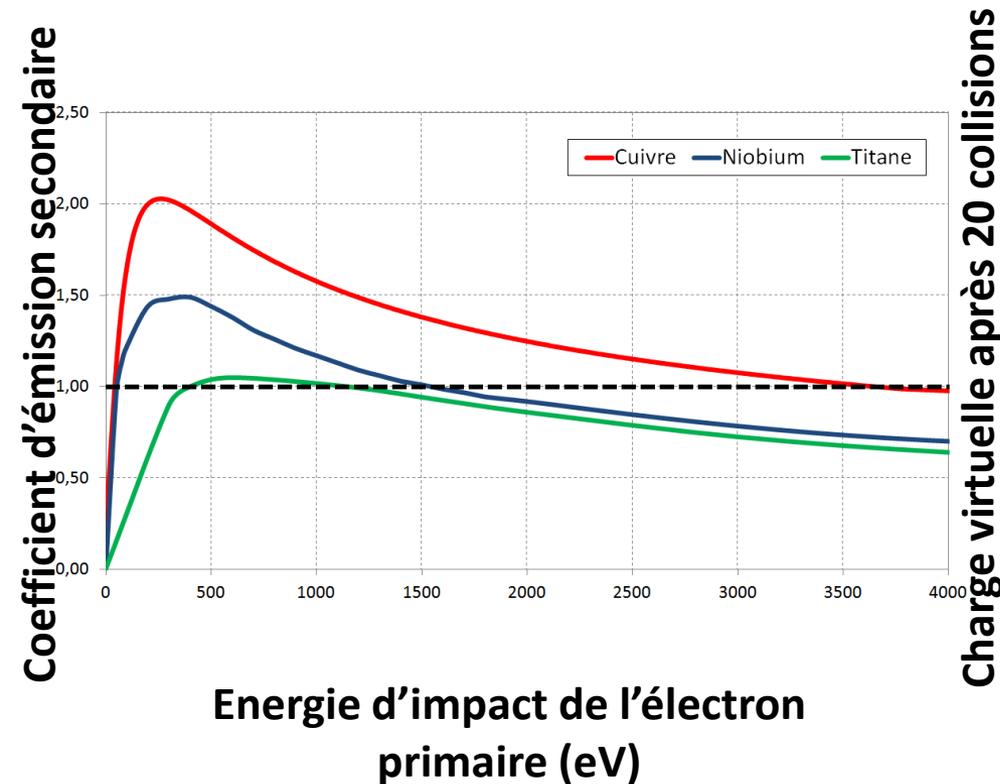
- Temps de calcul Musicc3D en fonction du nombre de collisions



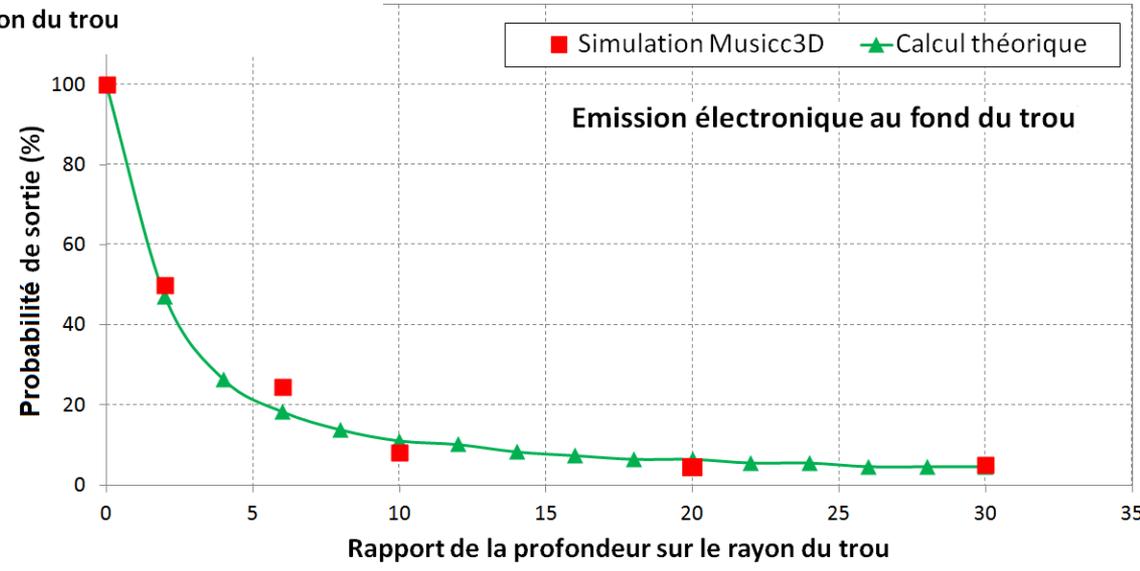
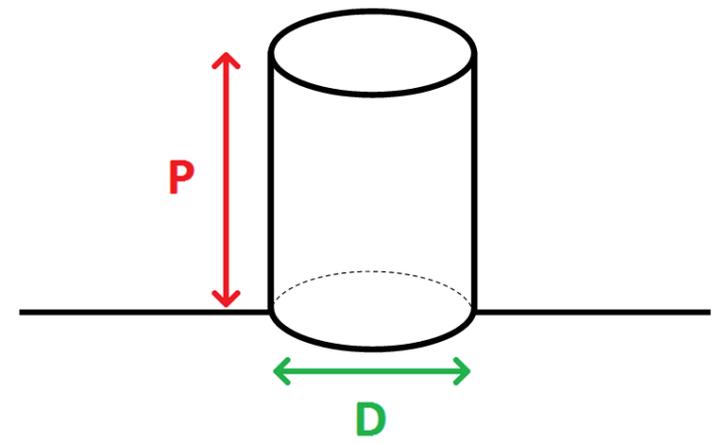
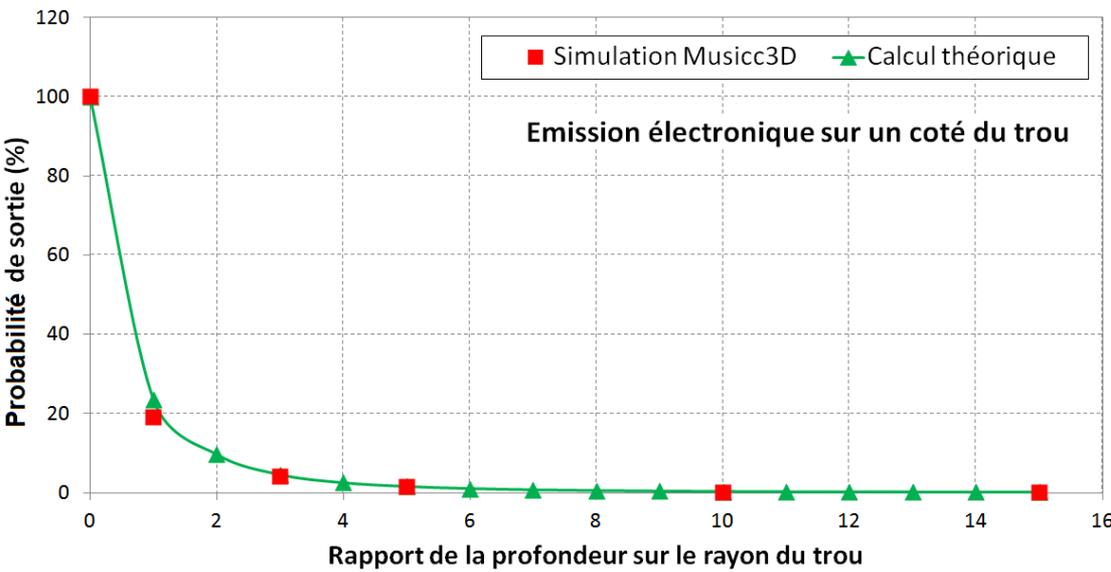
• Influence de l'énergie d'émission sur le multipactor



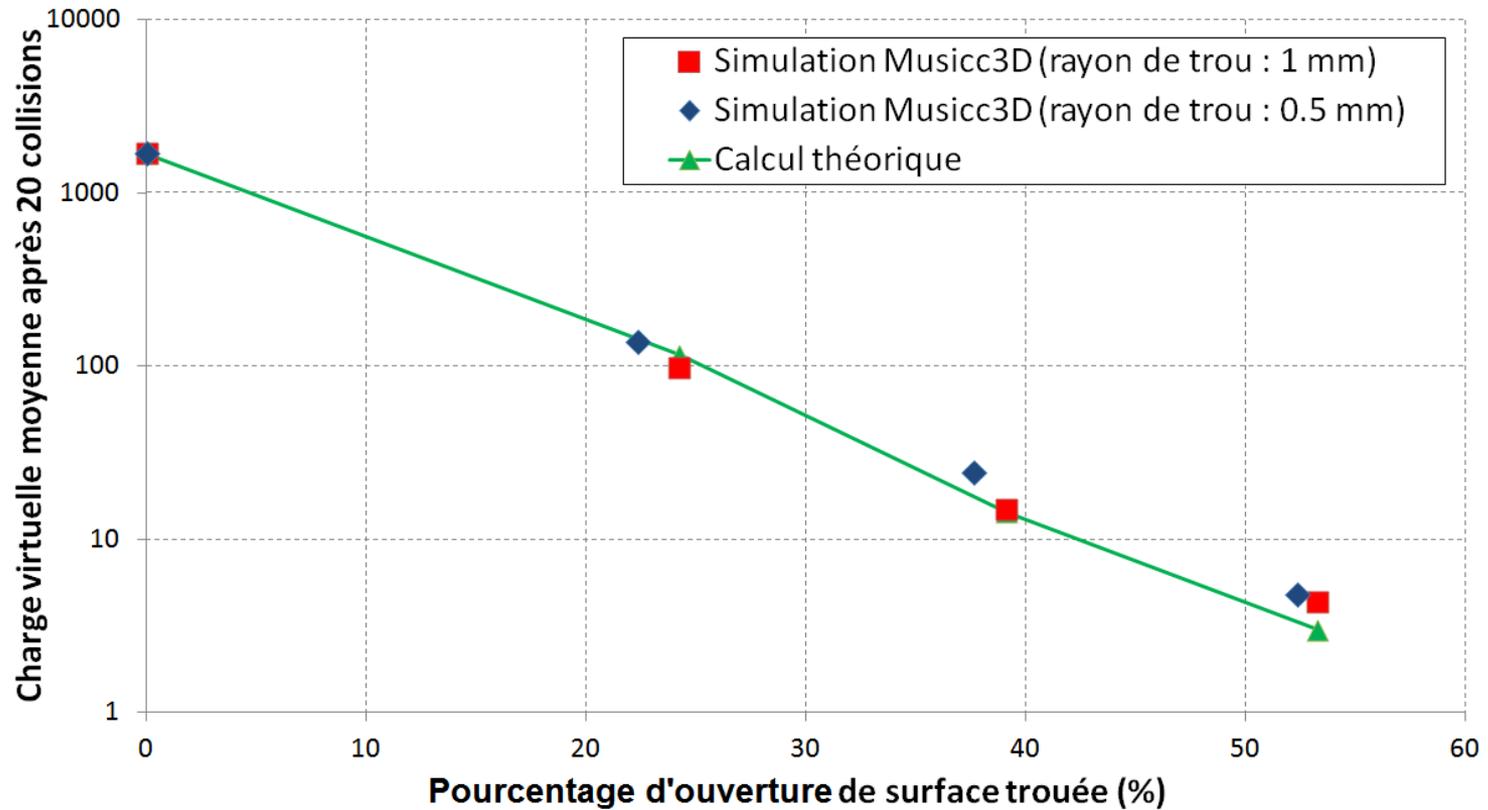
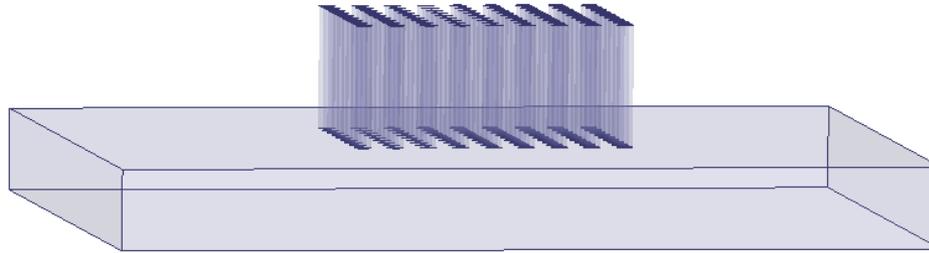
- Influence du coefficient d'émission secondaire sur le multipactor



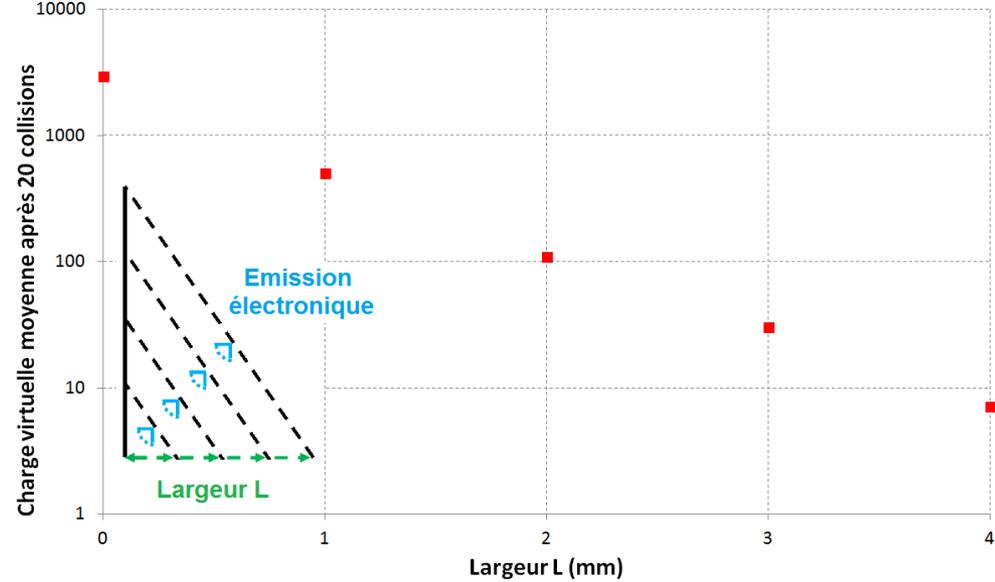
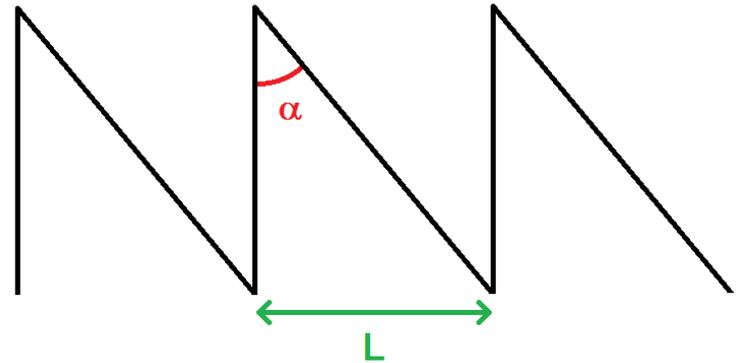
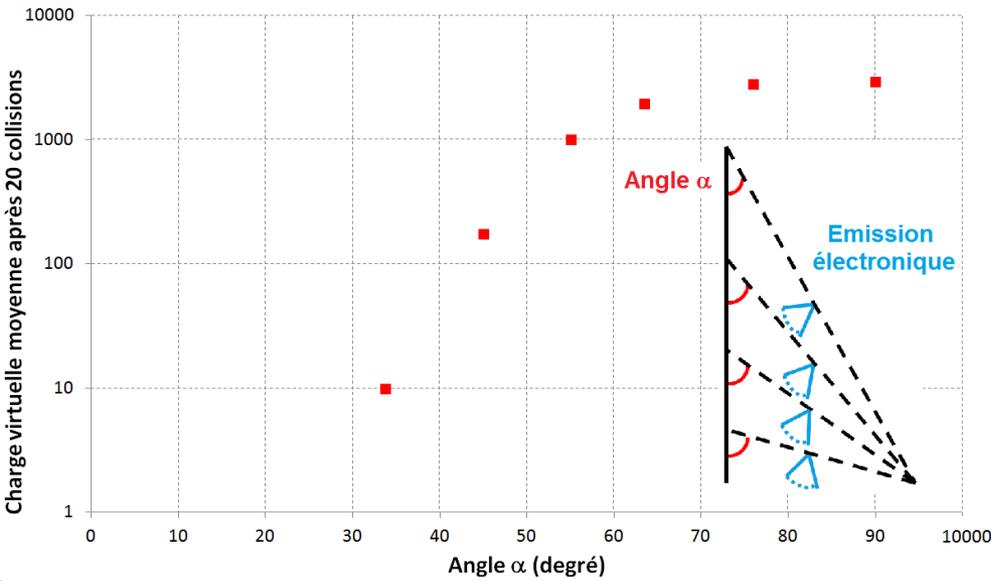
Influence de trous cylindriques sur le multipactor



- Influence de trous cylindriques sur le multipactor



Influence de dents de scie sur le multipactor



- **Résultats du Véhicule de Test (géométrie 2)**

- ↳ Variation de phase et augmentation de la puissance réfléchie sensiblement stables

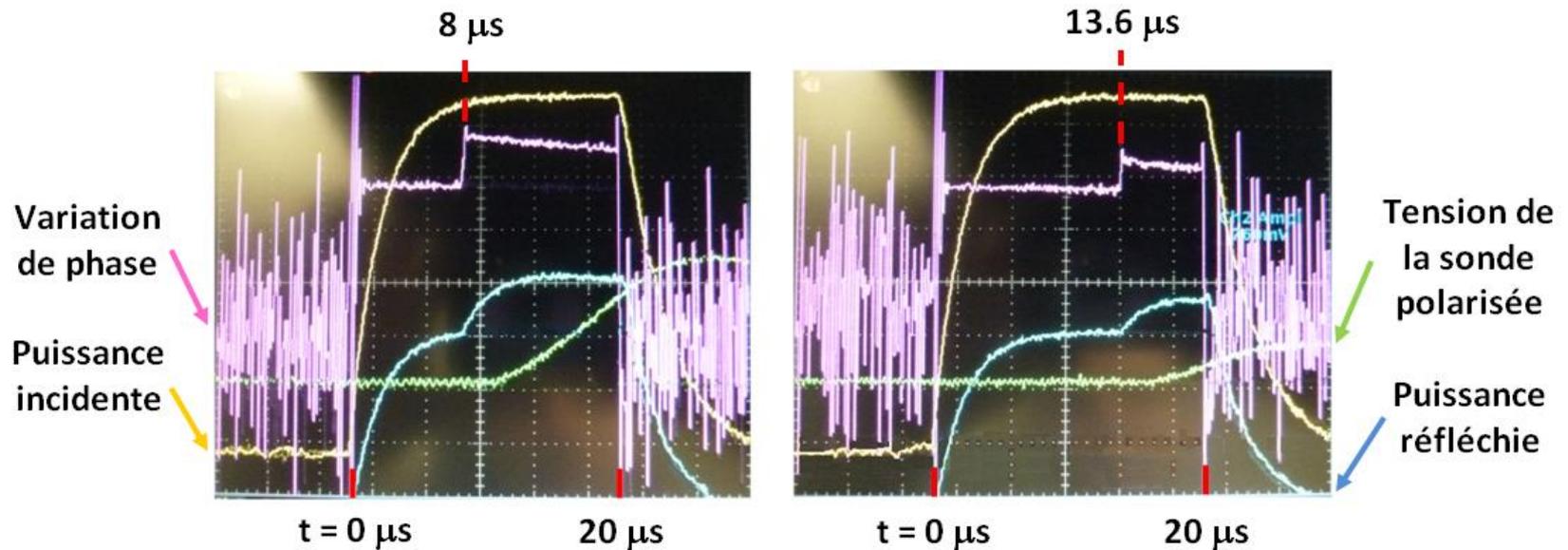
	Ordre 3	Ordre 2	Ordre 1
Variation de phase moyenne (°)	2	5.41	7.06
Augmentation de la puissance réfléchie moyenne (dB)	4.42	12.14	14.29

- ↳ Mesure de la perte de puissance transmise très difficile à réaliser due à sa très faible valeur (comprise dans les incertitudes de mesures)

- Inférieure à 100 W pour l'ordre 1 qui est compris entre 6800 et 8000 W

- **Emission d'électrons primaire aléatoire**

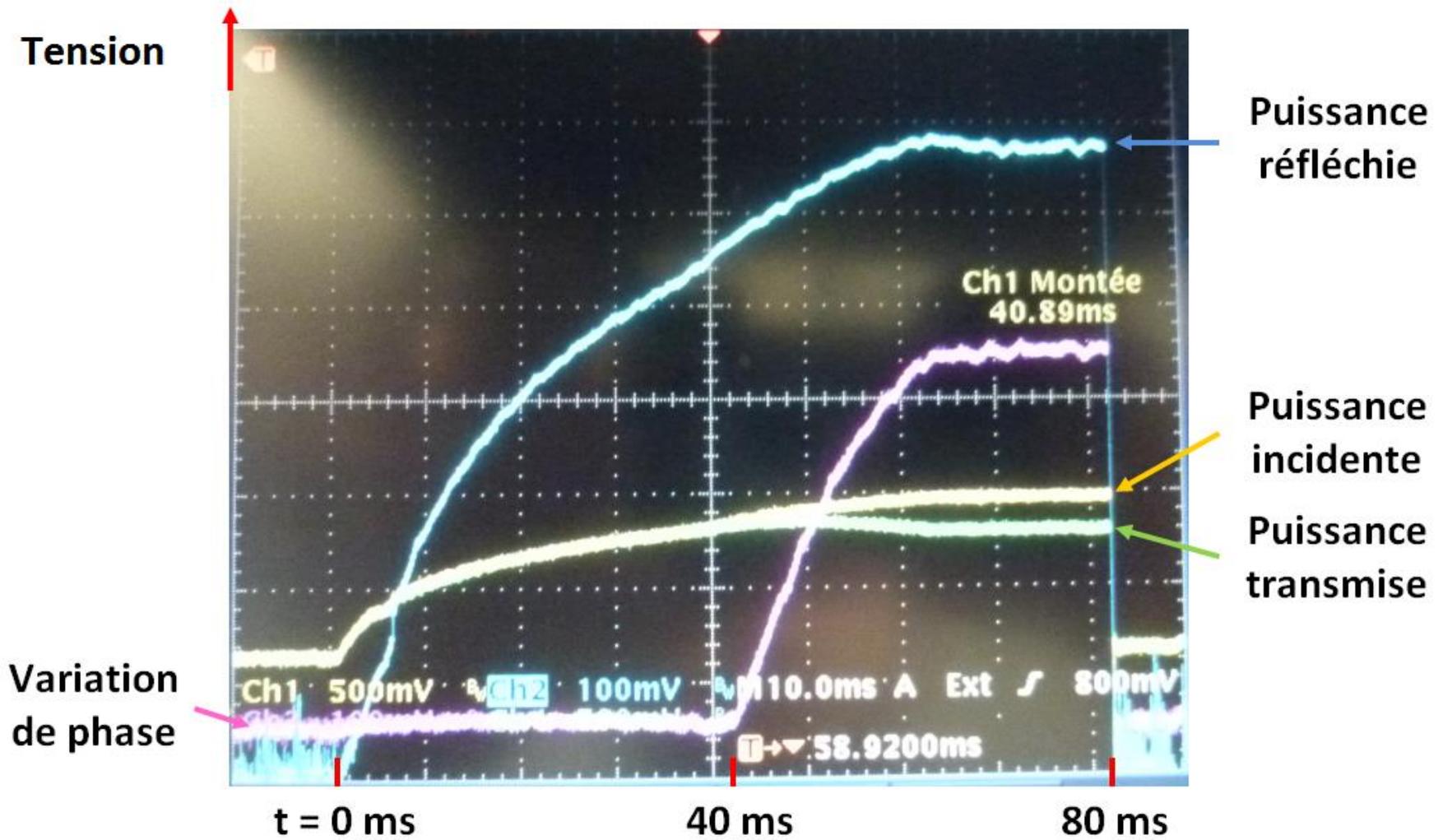
- ↳ Pulsation rectangulaire sur la puissance incidente (maximum de 7 kW pendant 20 μ s) (Ordre 1)



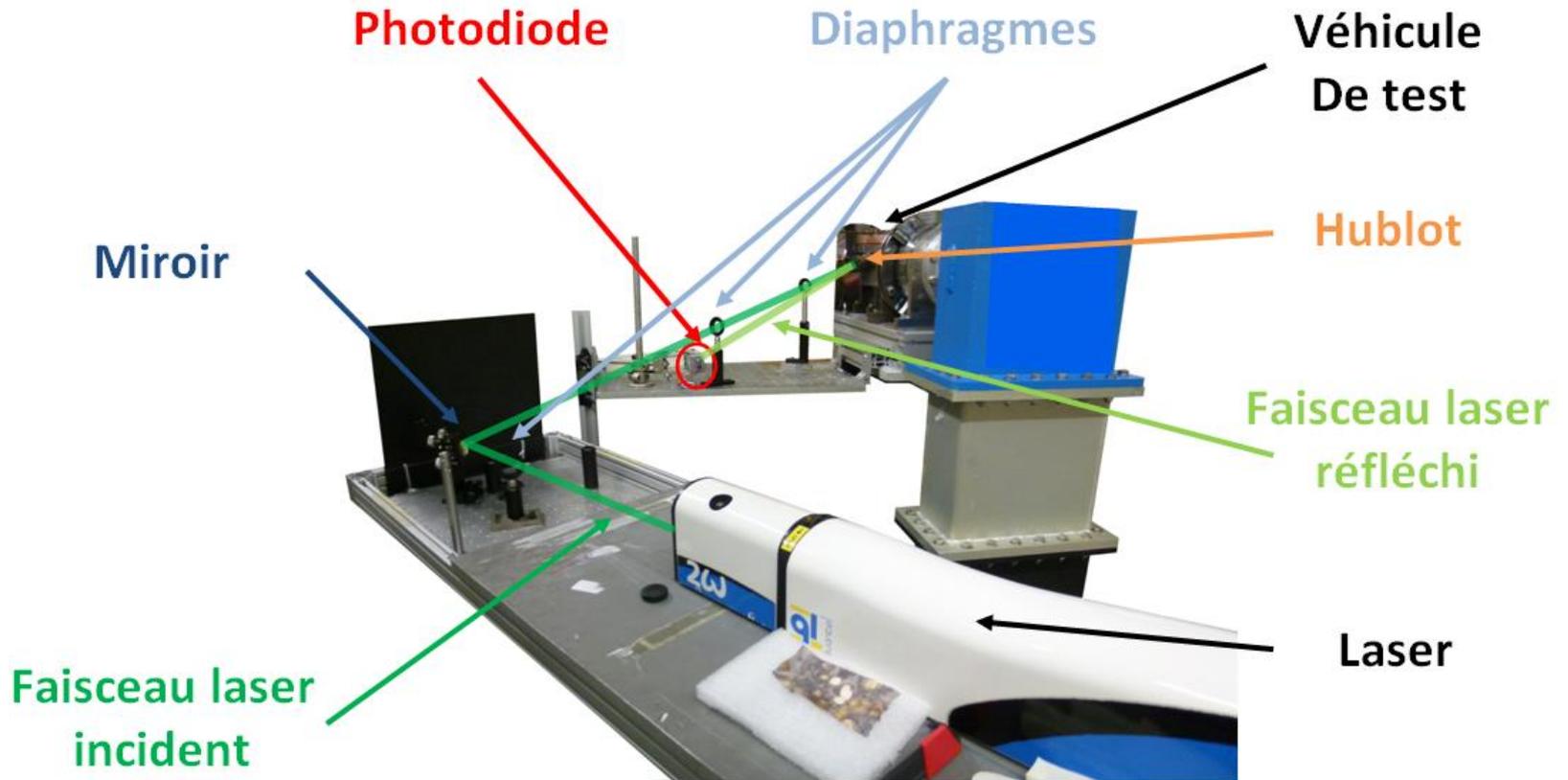
- ↳ Disparition des sites d'émission au cours du temps

- Poussières qui se consomment au cours du temps

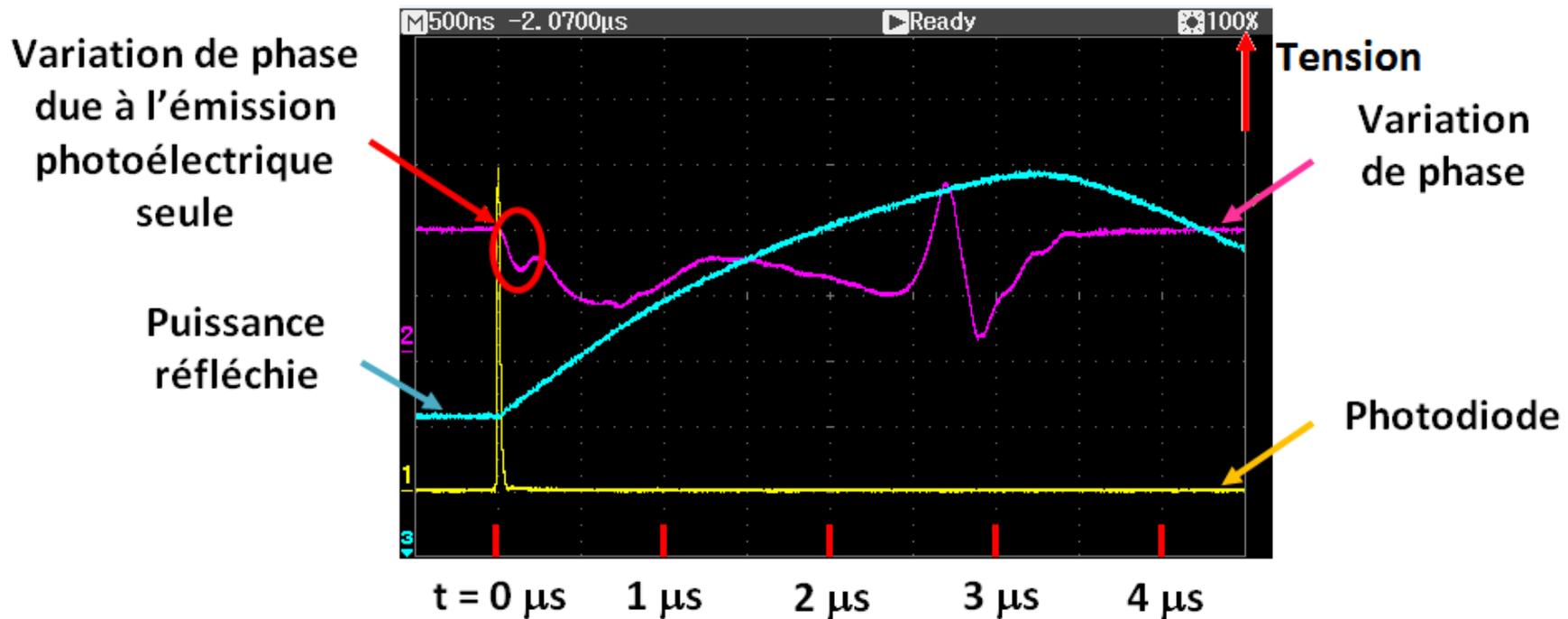
- Mesure d'émission de champ



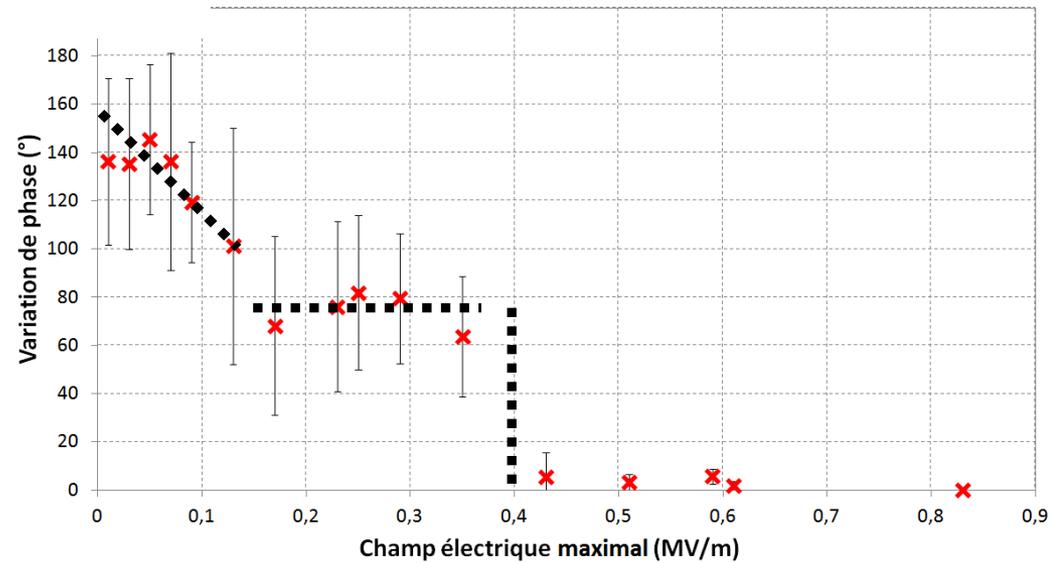
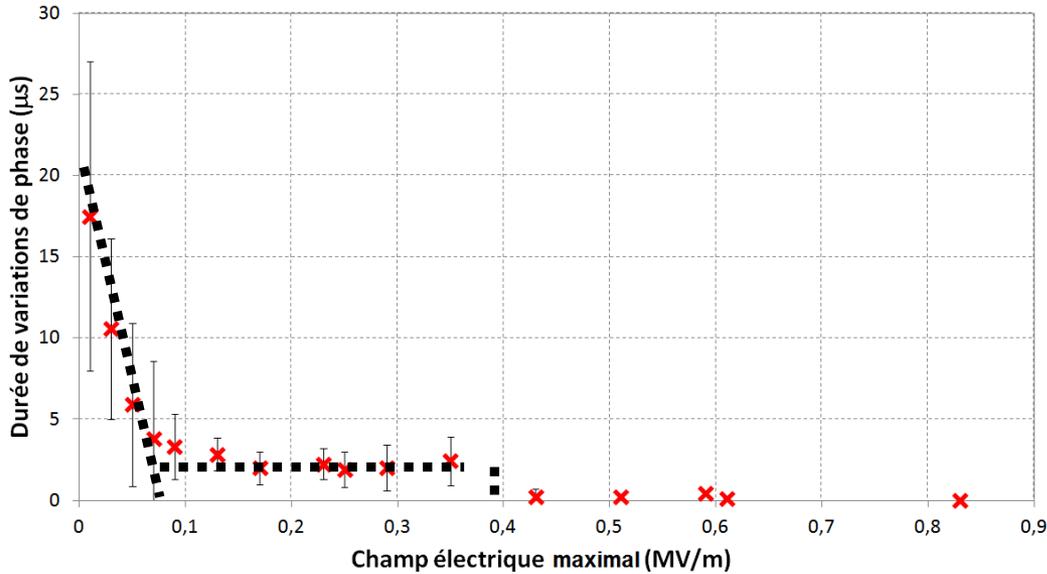
- Banc optique du Véhicule de test

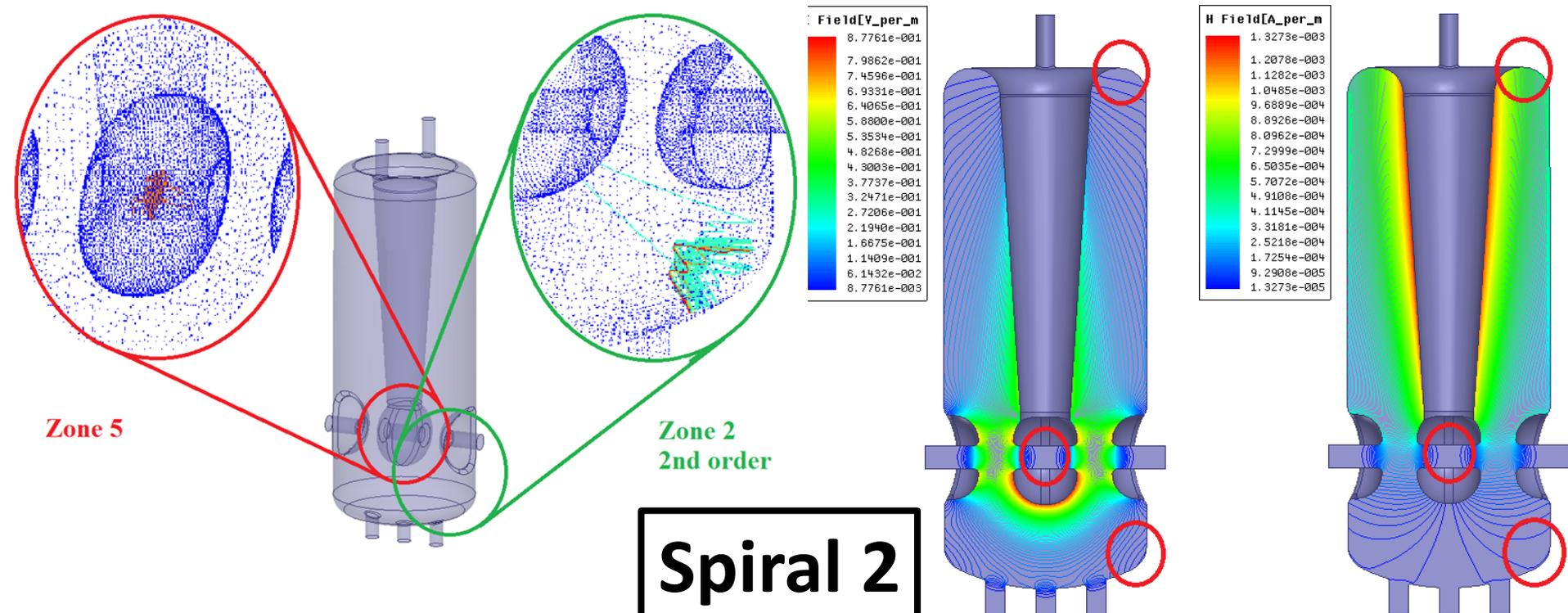


- Mesure d'électrons créés par laser



- Mesures suite à l'envoi d'un laser dans le Véhicule de Test





Zone 5

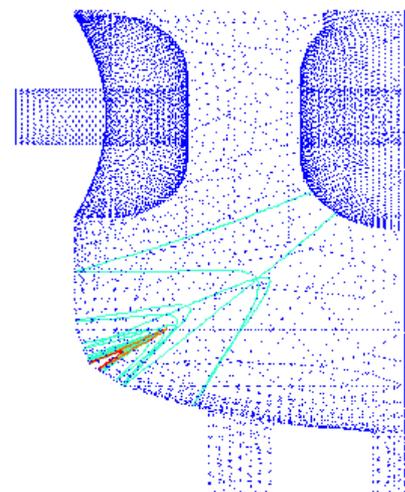
Zone 2
2nd order

Zone 1
(1^{er} ordre)

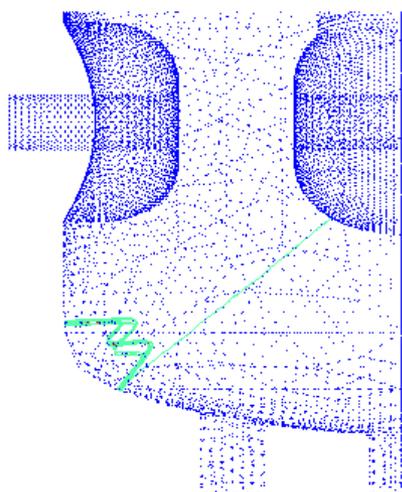
Zone 2
(2^{ème} ordre)

Zone 3
(3^{ème} ordre)

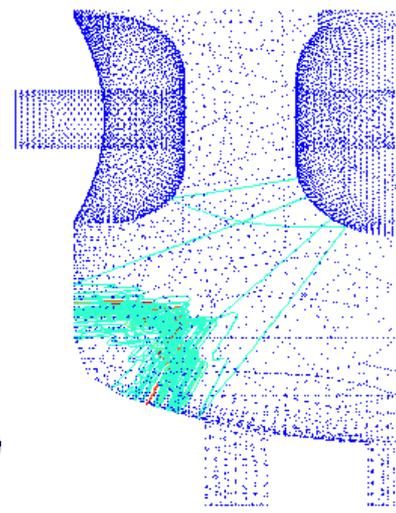
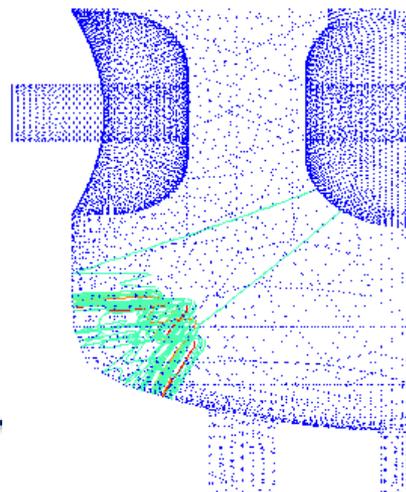
Zone 4
(4^{ème} ordre)



7/20



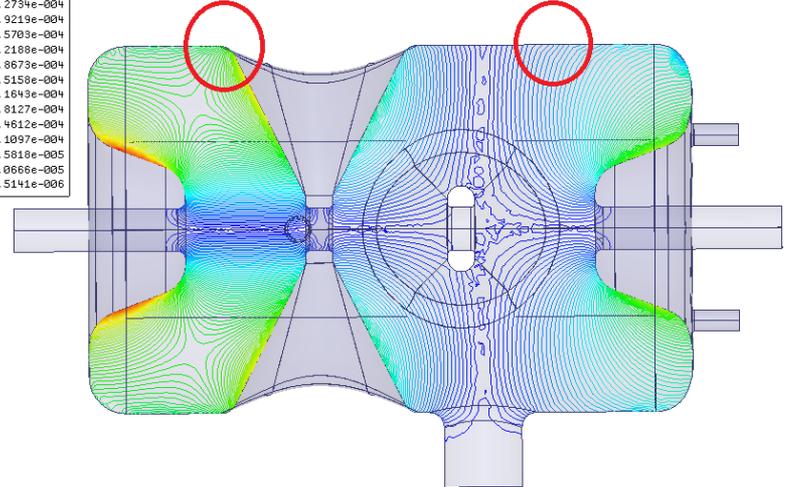
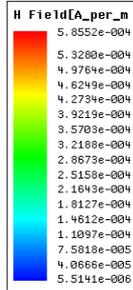
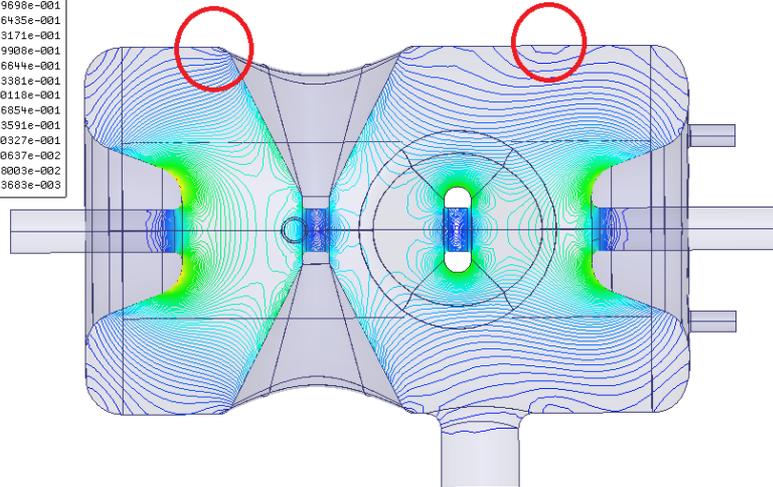
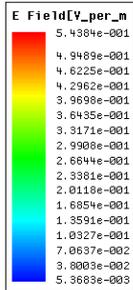
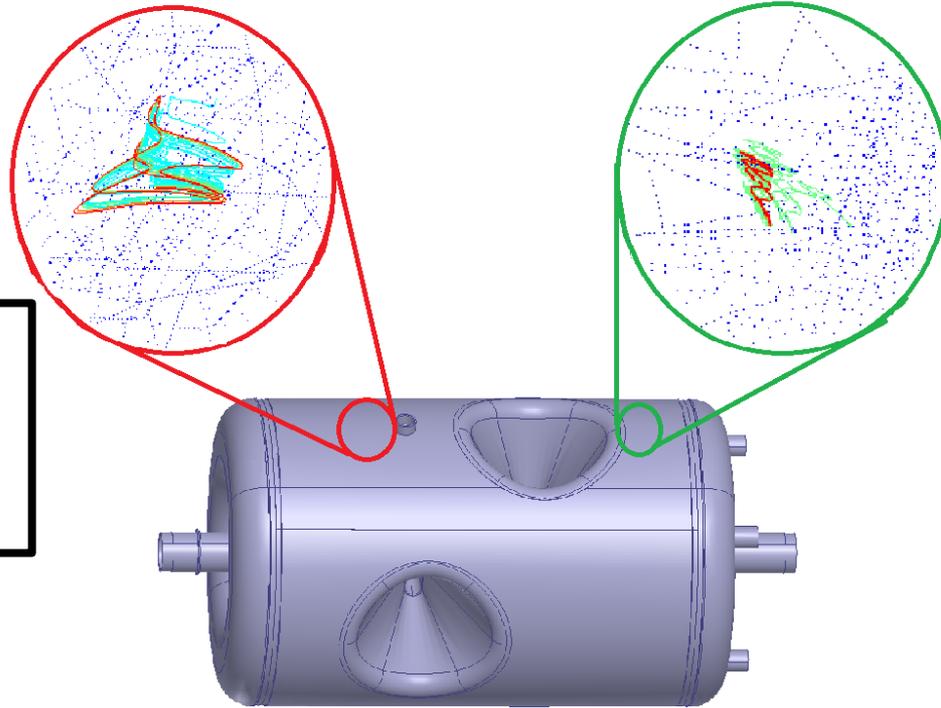
1

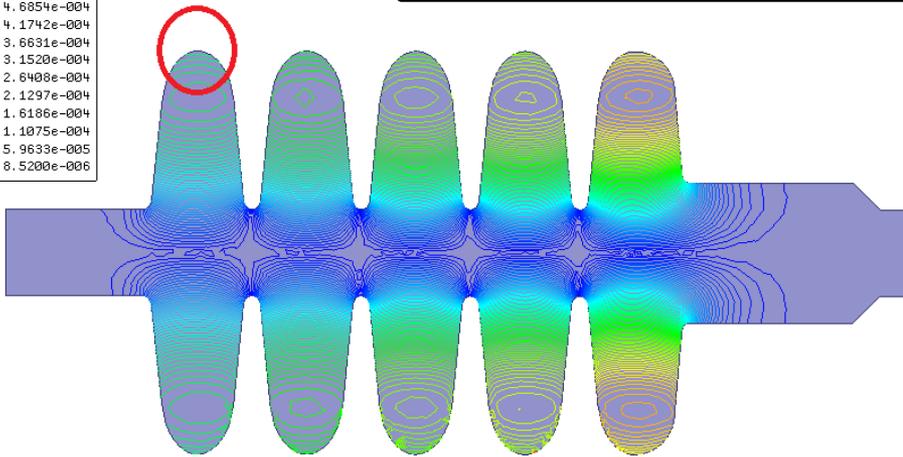
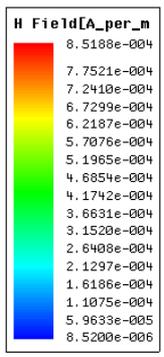
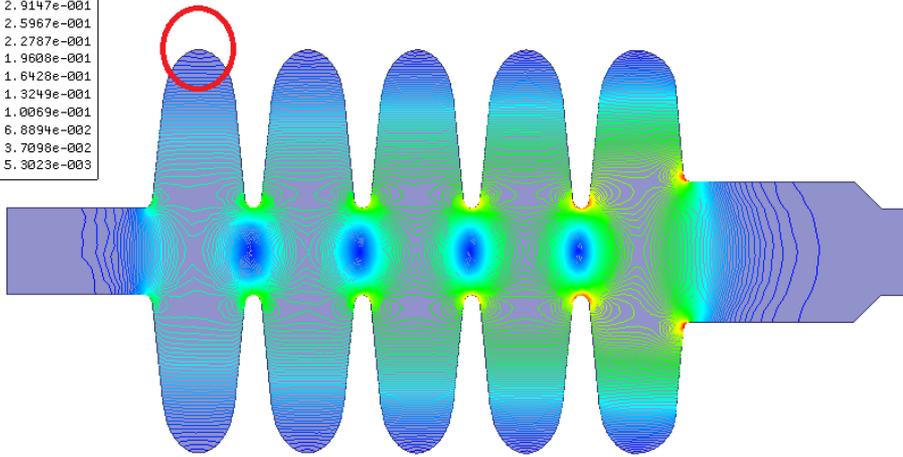
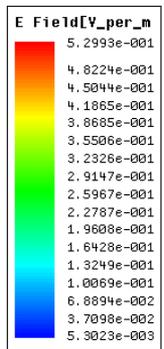


Zone 1

Zone 2

Double Spoke ESS



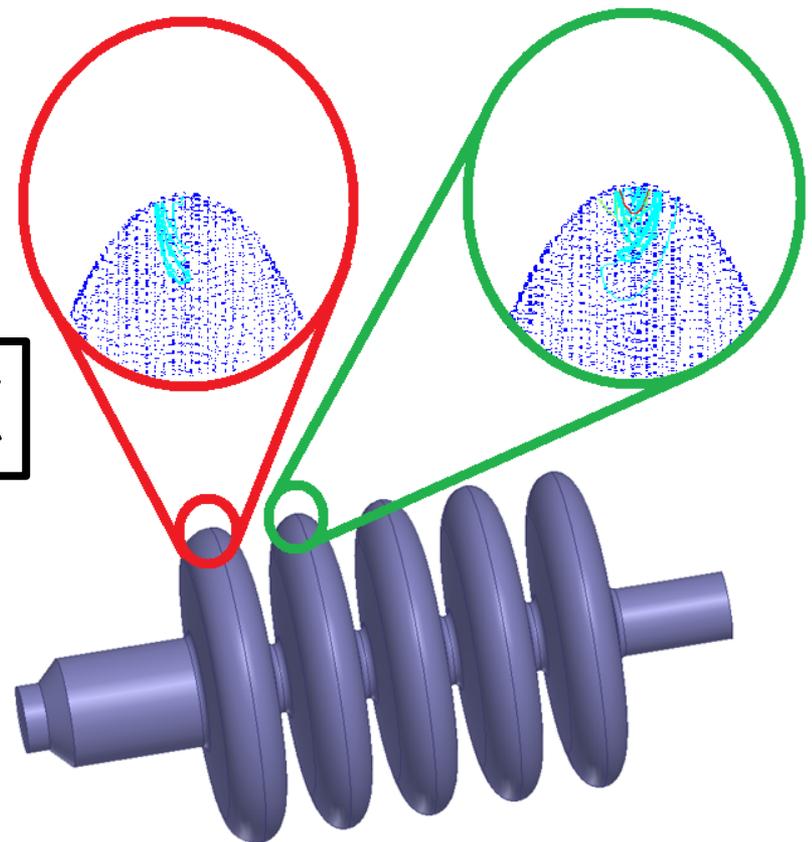


Elliptique MAX



Zone 1

Zone 2



Spoke EUROTRANS

