



Compensation de la charge d'espace dans les lignes de basse énergie

Journées accélérateurs 2015 | Frédéric Gérardin

frederic.gerardin@cea.fr

Plan

Introduction

Codes de calcul pour les simulations

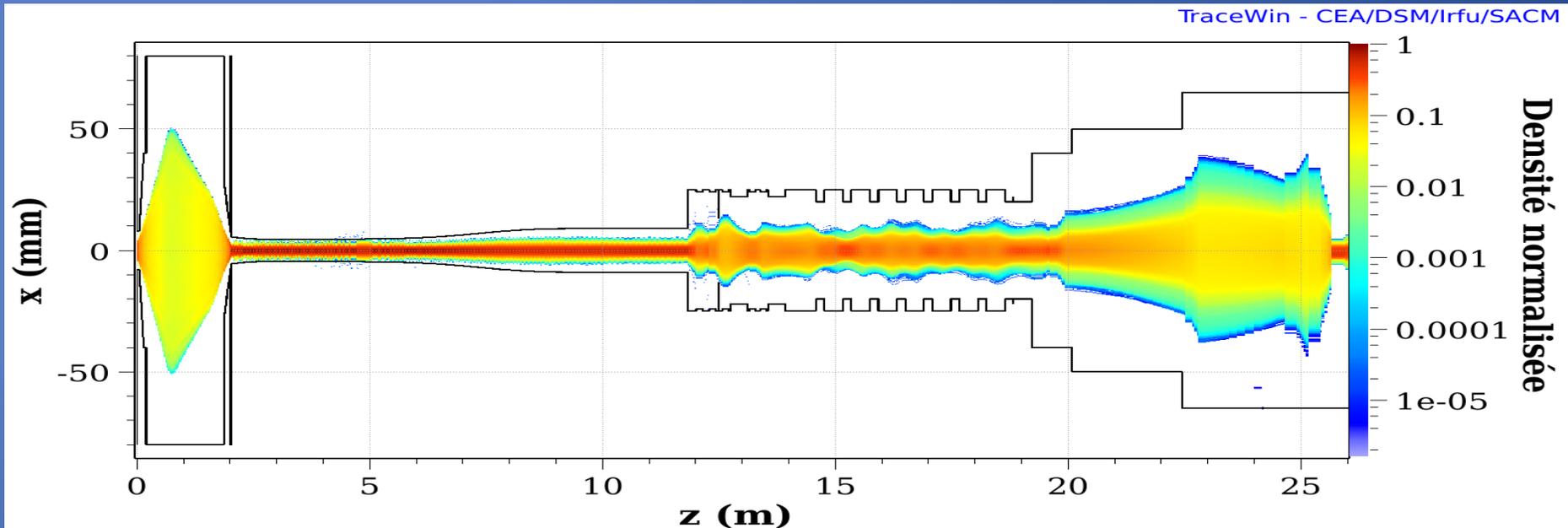
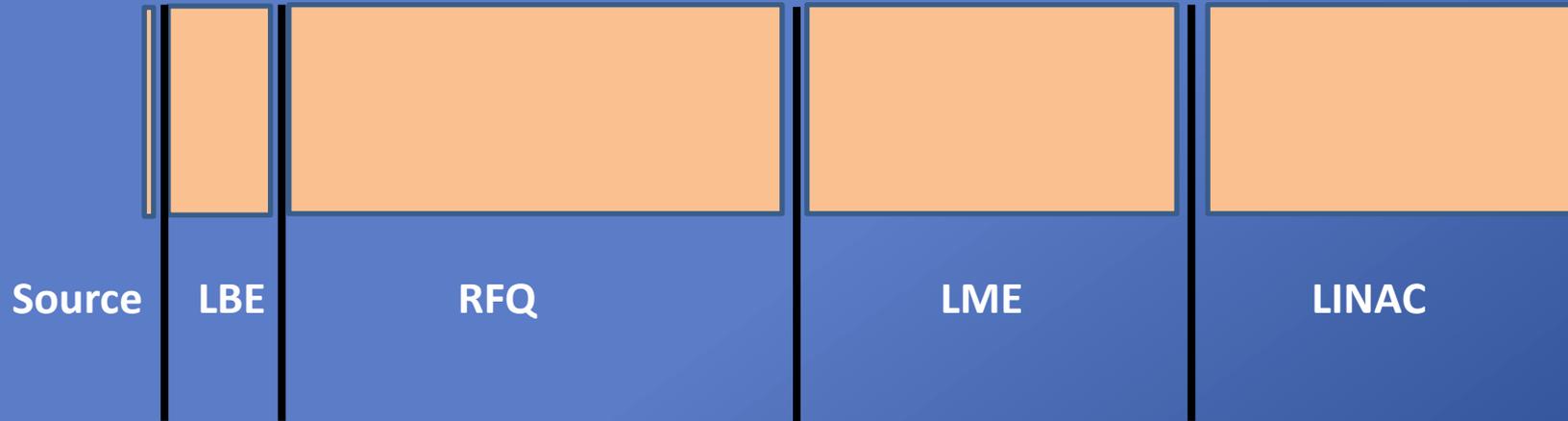
Résultats des simulations

Activités expérimentales

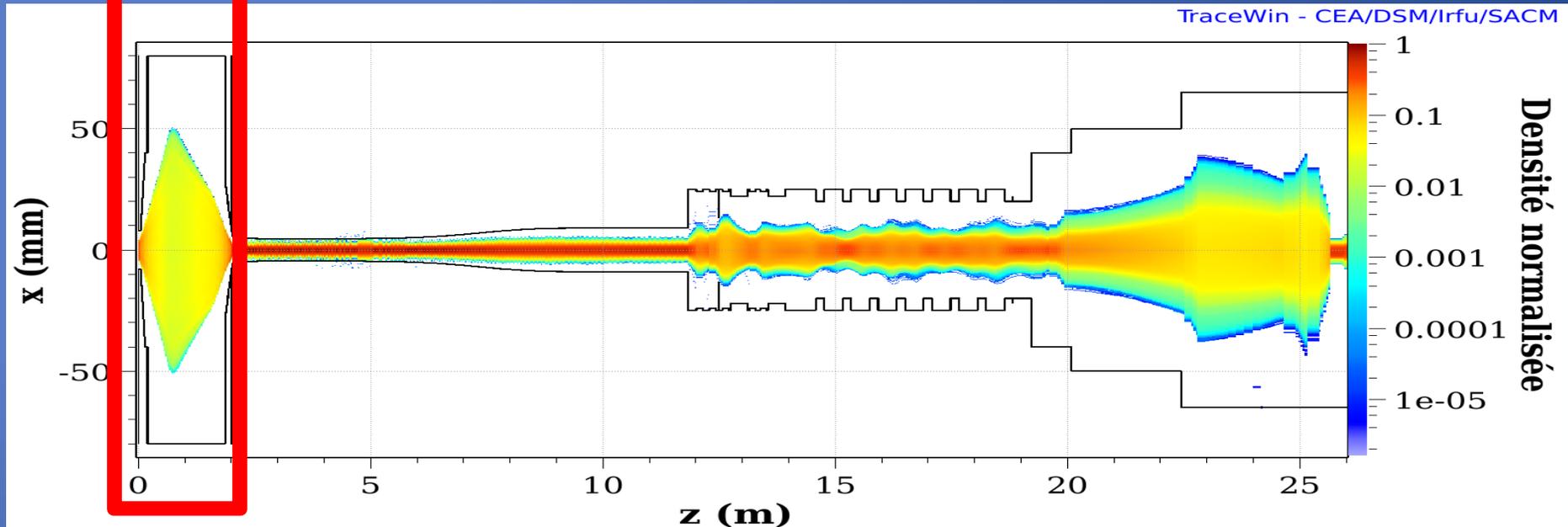
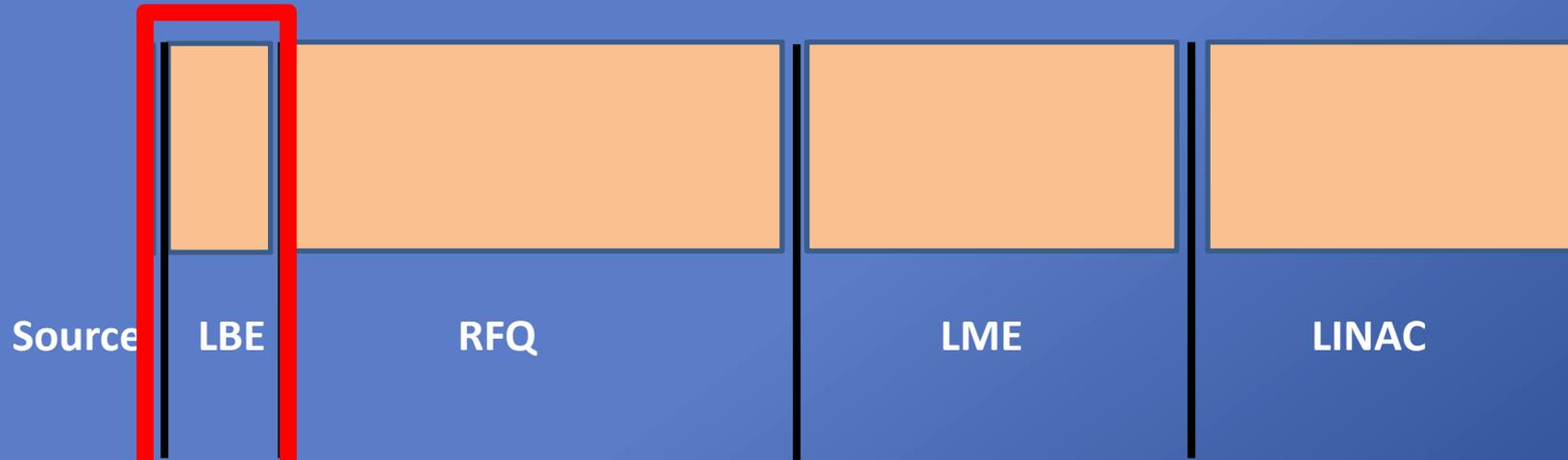
Conclusion et perspectives

Introduction

La ligne basse énergie



La ligne basse énergie



La charge d'espace

La charge d'espace

- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie

La charge d'espace

- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie
- Dominée par le champ de charge d'espace

La charge d'espace

- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie
- Dominée par le champ de charge d'espace
- Ce champ peut induire une augmentation d'émittance et la formation de halo

La charge d'espace

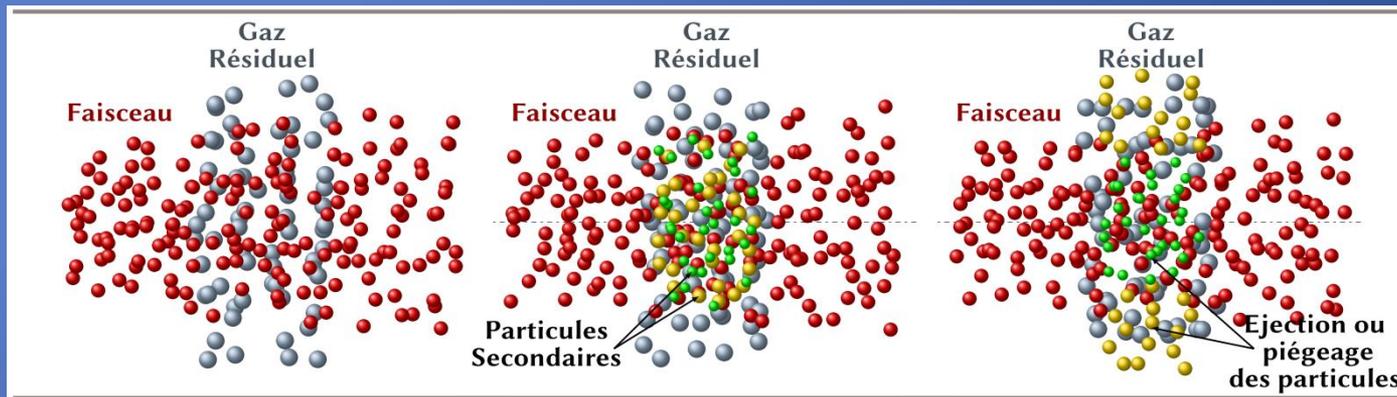
- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie
- Dominée par le champ de charge d'espace
- Ce champ peut induire une augmentation d'émittance et la formation de halo
- Le champ électrique induit par la charge d'espace défocalise le faisceau
- Le champ magnétique induit par la charge d'espace le focalise

La charge d'espace

- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie
- Dominée par le champ de charge d'espace
- Ce champ peut induire une augmentation d'émittance et la formation de halo
- Le champ électrique induit par la charge d'espace défocalise le faisceau
- Le champ magnétique induit par la charge d'espace le focalise
- A basse énergie et fort courant, l'effet défocalisant prédomine

La compensation de charge d'espace (1)

- A basse énergie, le faisceau induit l'ionisation du gaz résiduel dans la ligne basse énergie.
- Les particules secondaires (ions et électrons) issues de l'ionisation sont confinées ou repoussées par le champ de charge d'espace.



Processus de compensation de charge d'espace

- L'accumulation progressive des particules de charges opposées à celles du faisceau contribue à la compensation de charge d'espace.

La compensation de charge d'espace (2)

La compensation de charge d'espace (2)

- Dépend de la distribution du faisceau

La compensation de charge d'espace (2)

- Dépend de la distribution du faisceau
- Non linéaire et dépend du temps

La compensation de charge d'espace (2)

- Dépend de la distribution du faisceau
- Non linéaire et dépend du temps
- Temps caractéristique de compensation :

$$T_{CCE} = \frac{1}{\sigma n v_f}$$

Temps pour produire autant d'électrons que de protons dans le faisceau 100 keV à 10^{-4} mbar : 4,9 μ s

La compensation de charge d'espace (2)

- Dépend de la distribution du faisceau
- Non linéaire et dépend du temps
- Temps caractéristique de compensation :

$$T_{CCE} = \frac{1}{\sigma n v_f}$$

Temps pour produire autant d'électrons que de protons dans le faisceau 100 keV à 10^{-4} mbar : 4,9 μ s

- Taux de compensation de charge d'espace :

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_C}{\Phi_0}$$

Φ_C : potentiel du faisceau compensé

Φ_0 : potentiel du faisceau équivalent en l'absence de compensation

Codes de calcul pour les simulations

Warp

Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA

Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée

Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée
- Présente une interface Python

Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée
- Présente une interface Python
- S'exécute en parallèle avec un protocole MPI

Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée
- Présente une interface Python
- S'exécute en parallèle avec un protocole MPI
- Cartes de champ, diagnostics multiples, solveurs RZ & 3D...

Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée
- Présente une interface Python
- S'exécute en parallèle avec un protocole MPI
- Cartes de champ, diagnostics multiples, solveurs RZ & 3D...
- En lien avec les développeurs

Cadre de la simulation

Cadre de la simulation

ENTREES

- **Distribution des faisceaux à simuler**
- **Collision :**
 - avec le gaz résiduel (espèce, pression, température...)
 - avec les parois (émission d'électrons secondaires...)
- **Géométrie de la ligne et maillage de l'espace**
- **Cartes de champs extérieurs**

Cadre de la simulation

ENTREES

- Distribution des faisceaux à simuler
- Collision :
 - avec le gaz résiduel (espèce, pression, température...)
 - avec les parois (émission d'électrons secondaires...)
- Géométrie de la ligne et maillage de l'espace
- Cartes de champs extérieurs

SORTIES

- Distribution des particules dans la ligne (électrons & ions)
- Carte de potentiel de charge d'espace
- Carte de champ

Résultats des simulations

Simulation dans un espace de glissement

Simulation dans un espace de glissement

Paramètres :

Ligne de faisceau cylindrique de 500 mm de long

Injection d'un faisceau de protons uniforme de 100 keV à 100 mA

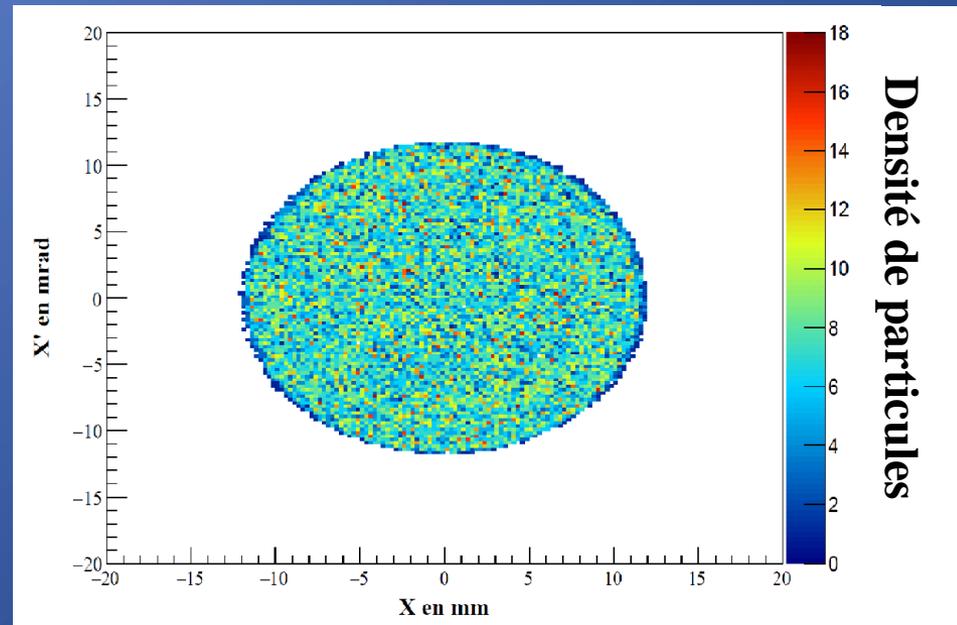
Réaction prise en compte : $H^+ + H_2 \rightarrow H^+ + e^- + H_2^+$

10^{-4} mbar uniforme

Gaz considéré comme un réservoir infini d'électrons

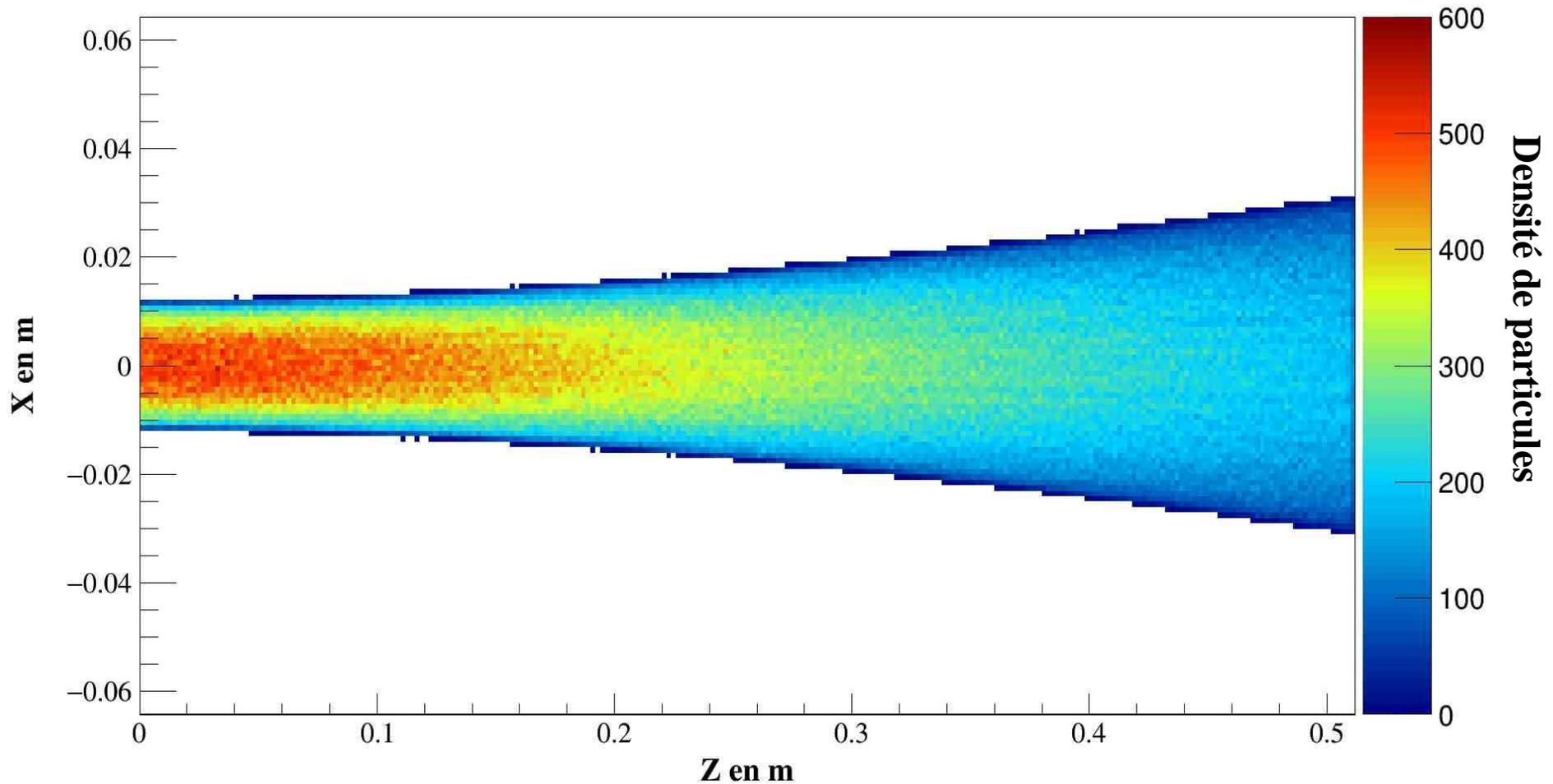
Maillage : $1 \times 1 \times 2 \text{ mm}^3$

Temps de simulation : 10,0 μs



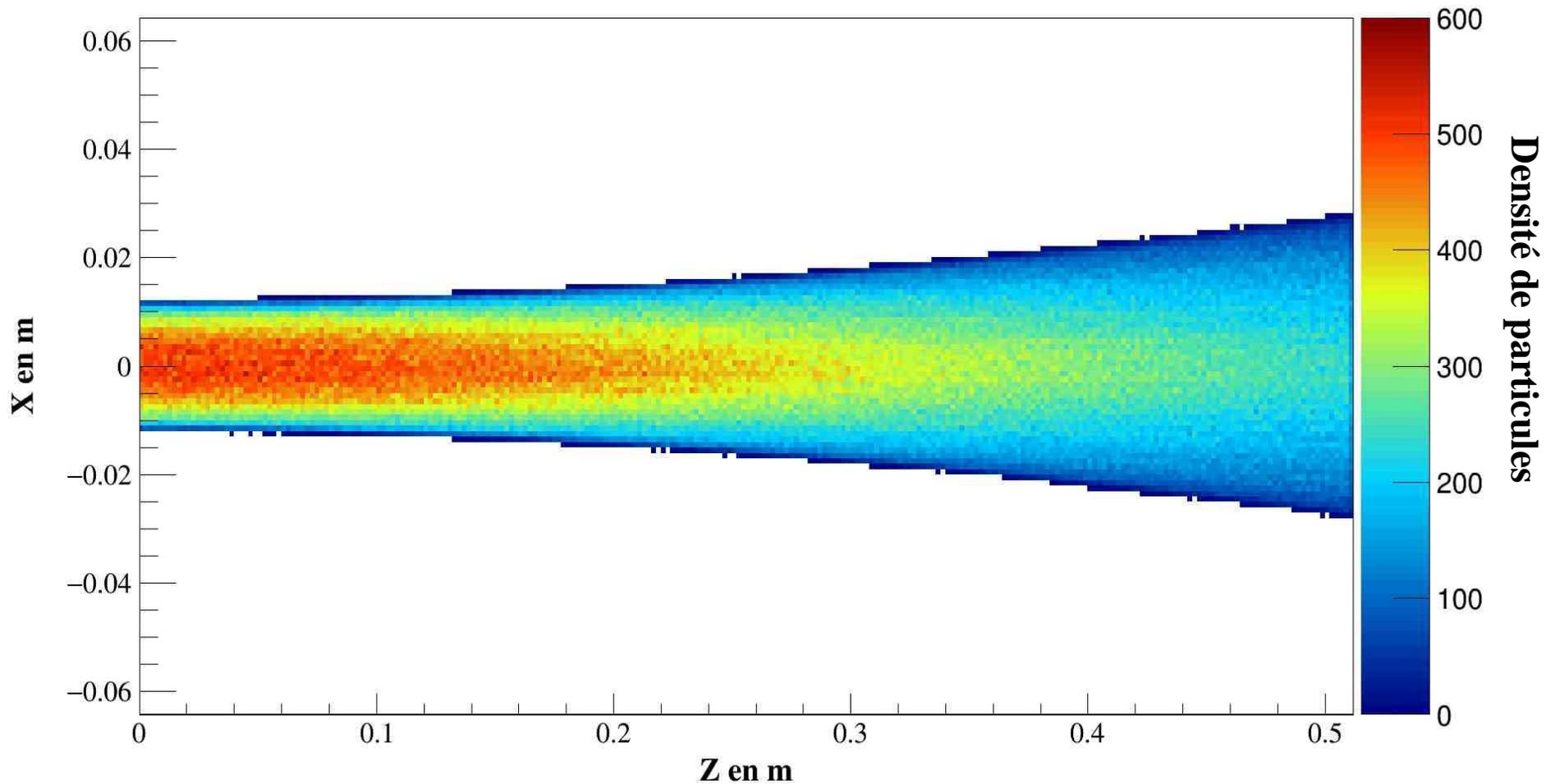
Distribution du faisceau injecté

Faisceau de protons



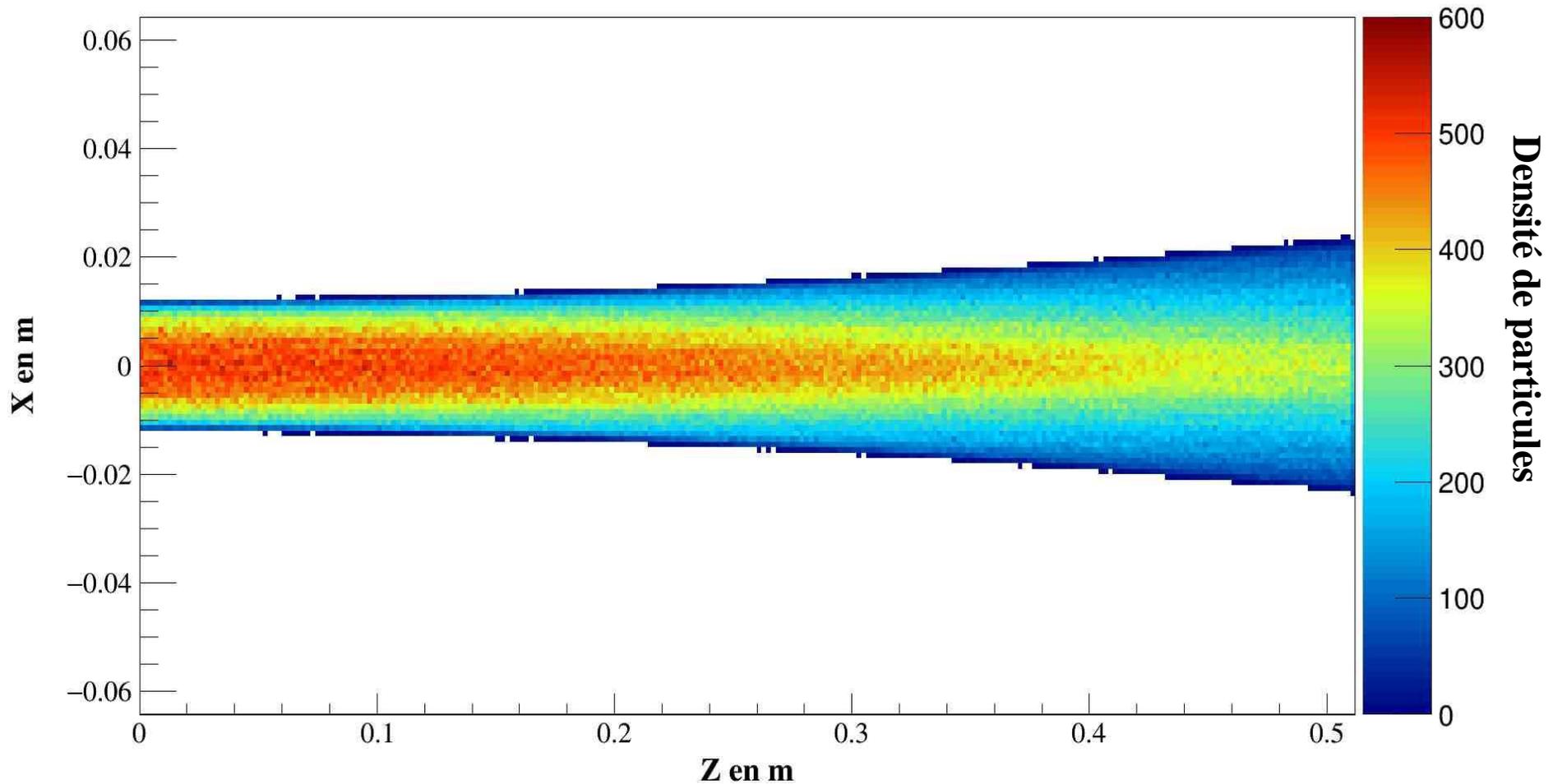
Faisceau de protons non compensé

Faisceau de protons



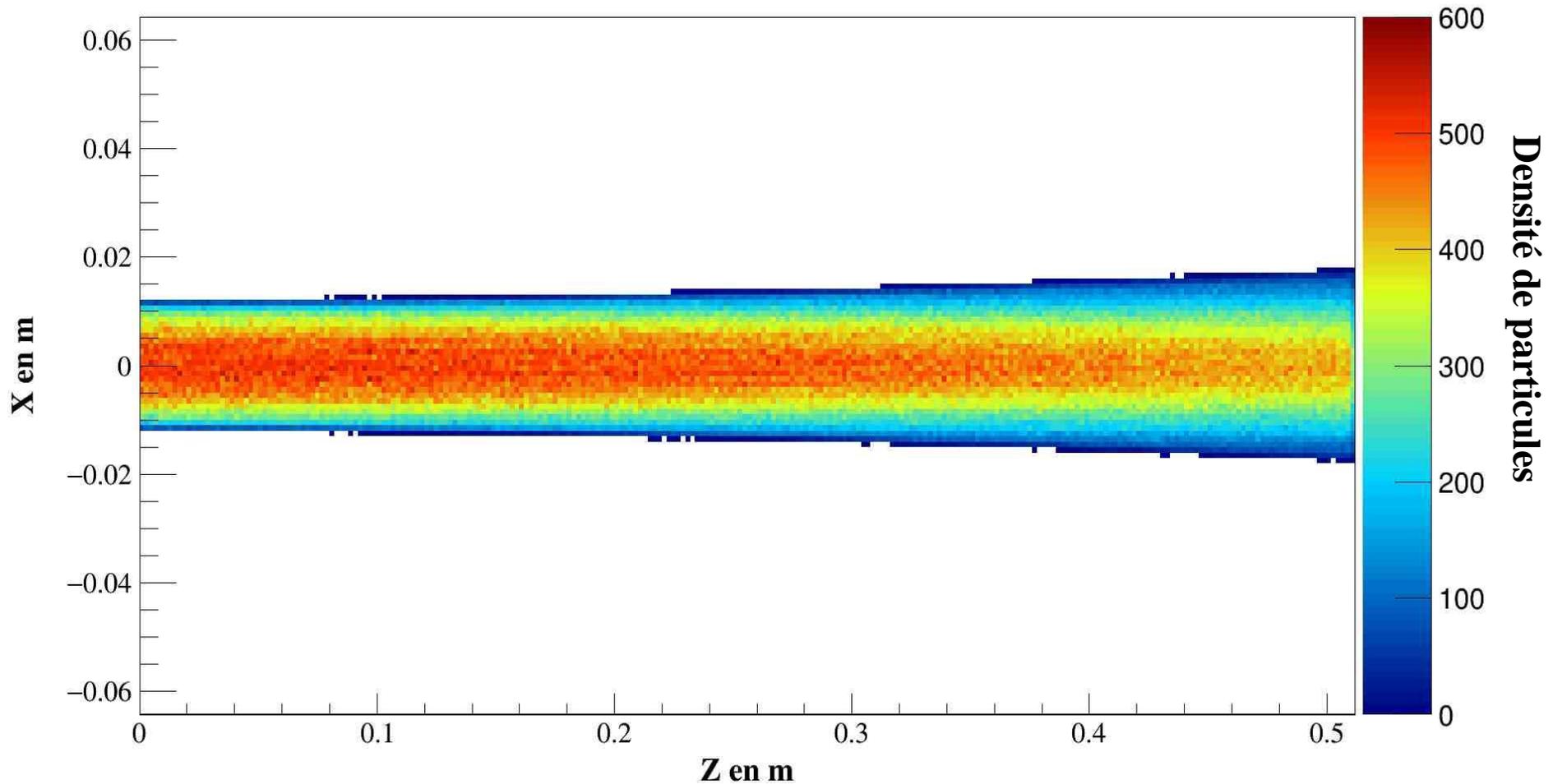
Faisceau de protons au temps $t = 1,0 \mu\text{s}$

Faisceau de protons



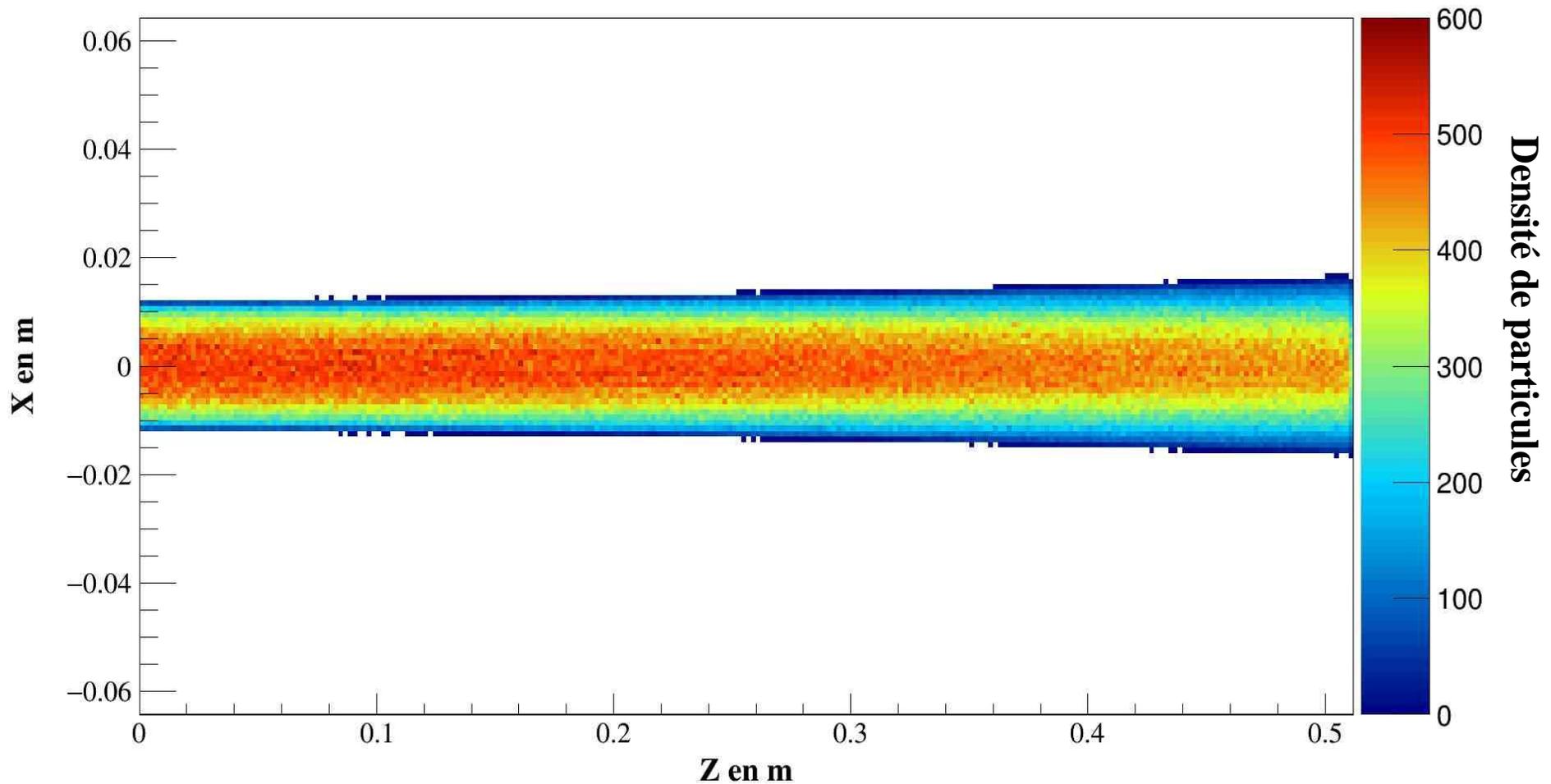
Faisceau de protons au temps $t = 2,5 \mu\text{s}$

Faisceau de protons



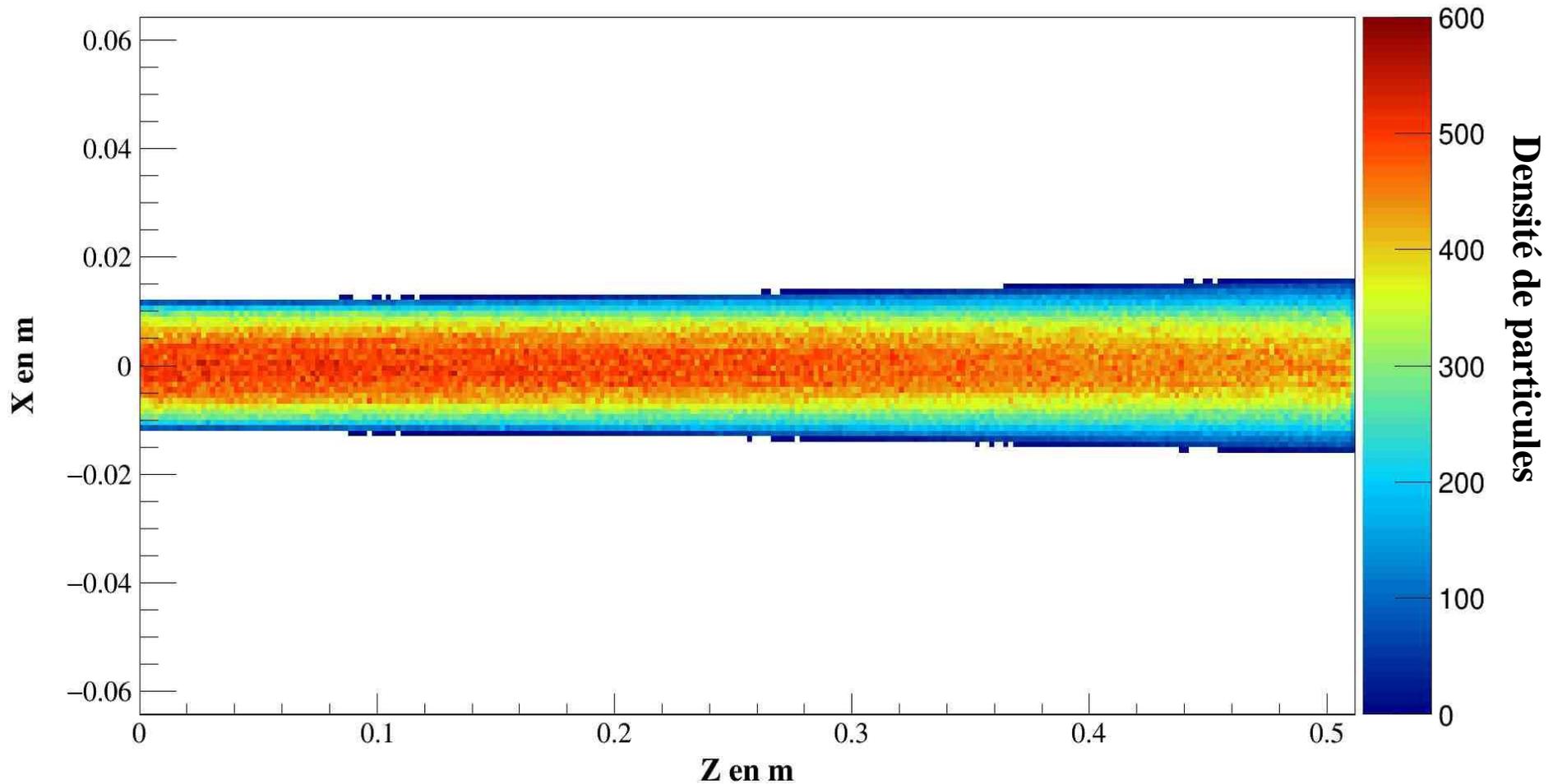
Faisceau de protons au temps $t = 5,0 \mu\text{s}$

Faisceau de protons



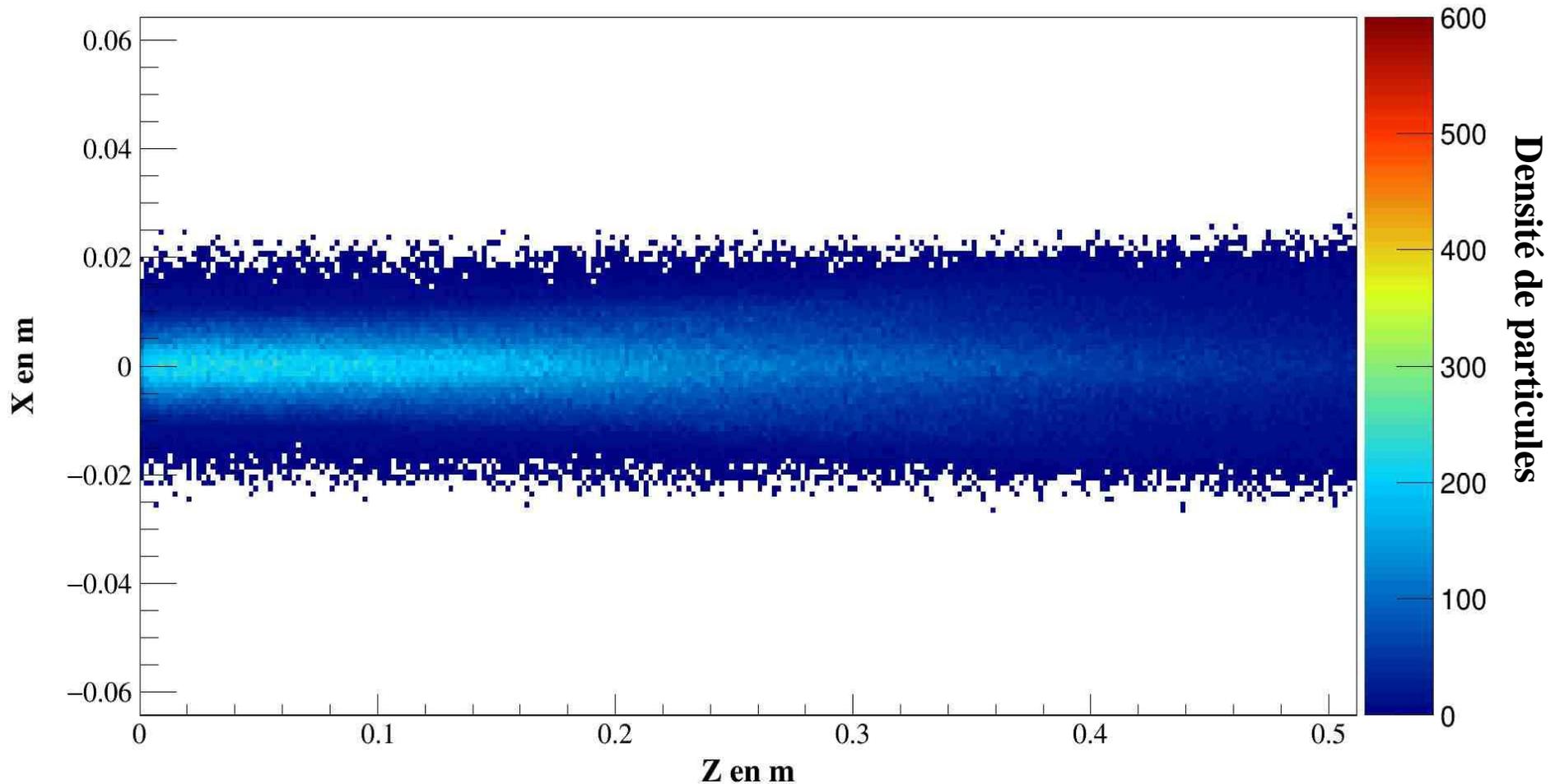
Faisceau de protons au temps $t = 7,5 \mu\text{s}$

Faisceau de protons



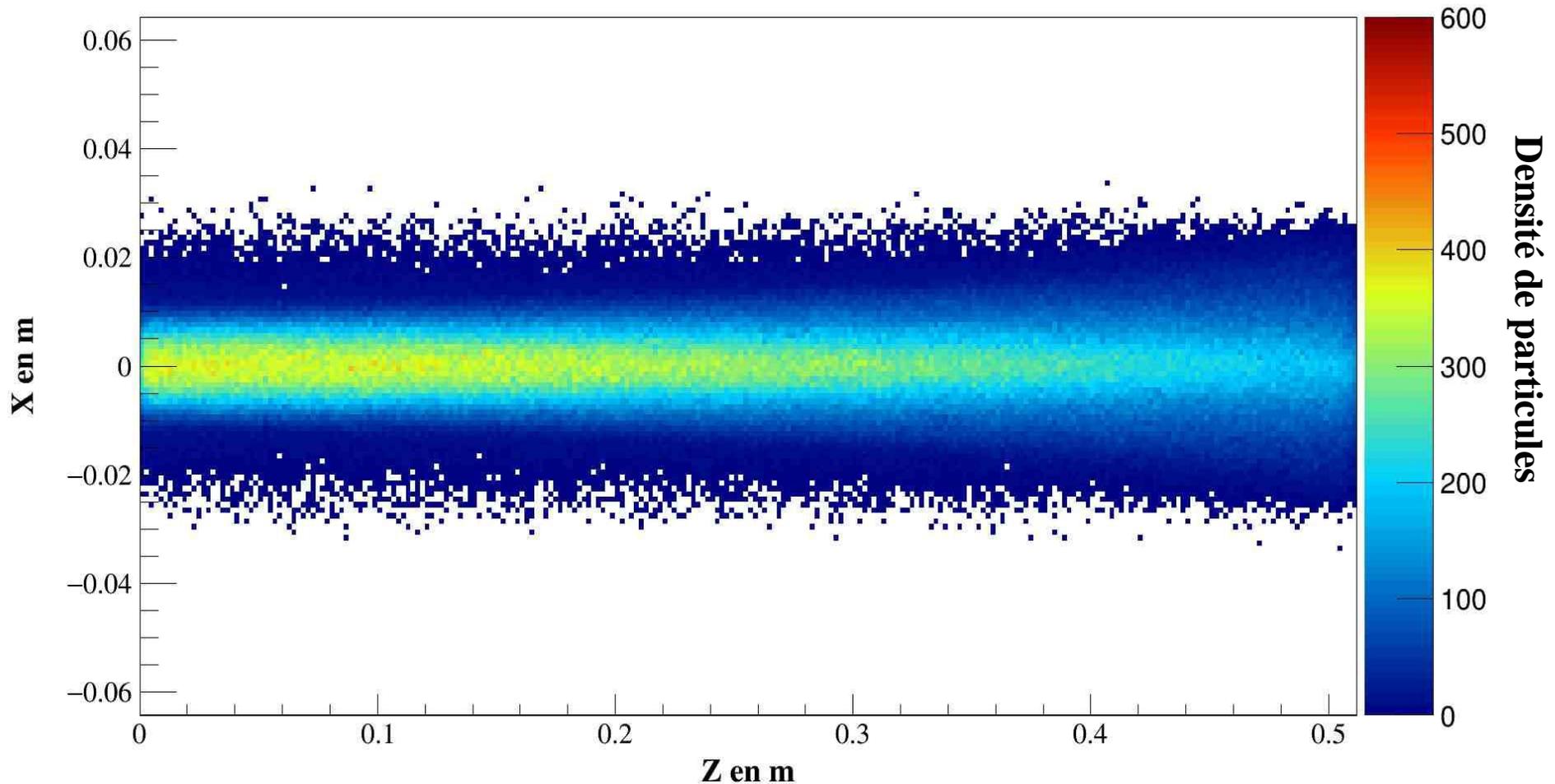
Faisceau de protons au temps $t = 10,0 \mu\text{s}$

Distribution des électrons



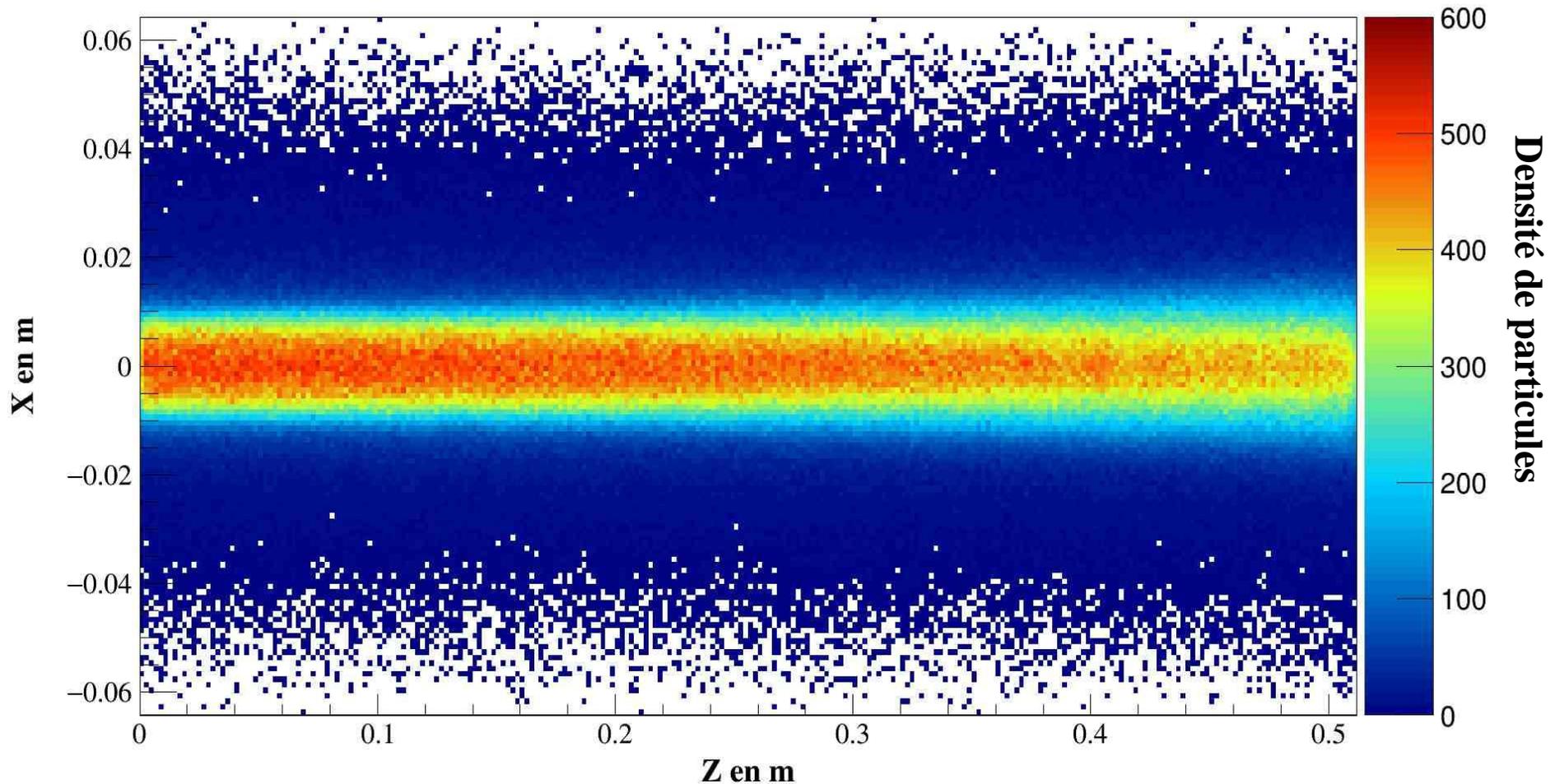
Distribution des électrons au temps $t = 1,0 \mu\text{s}$

Distribution des électrons



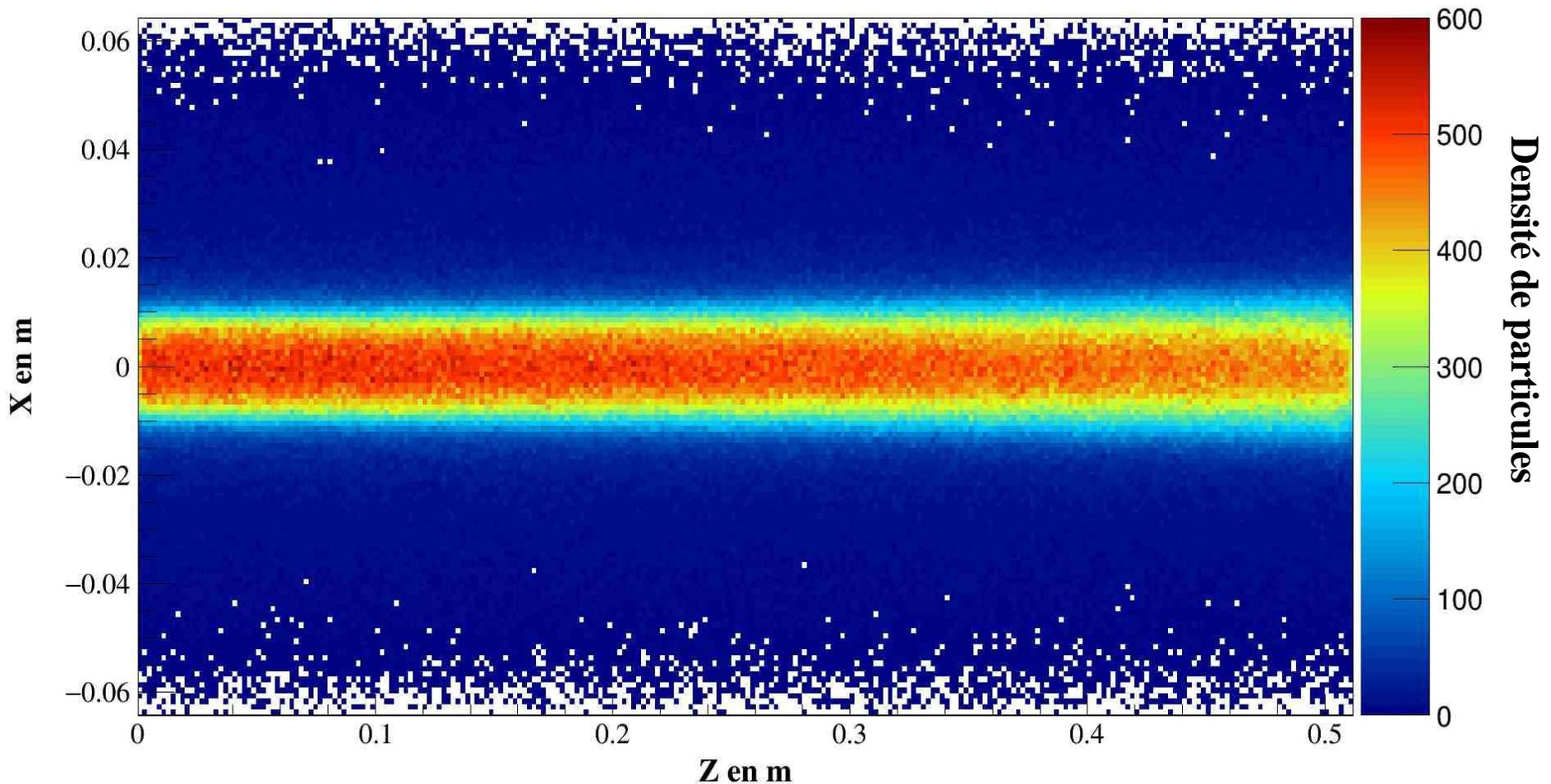
Distribution des électrons au temps $t = 2,5 \mu\text{s}$

Distribution des électrons



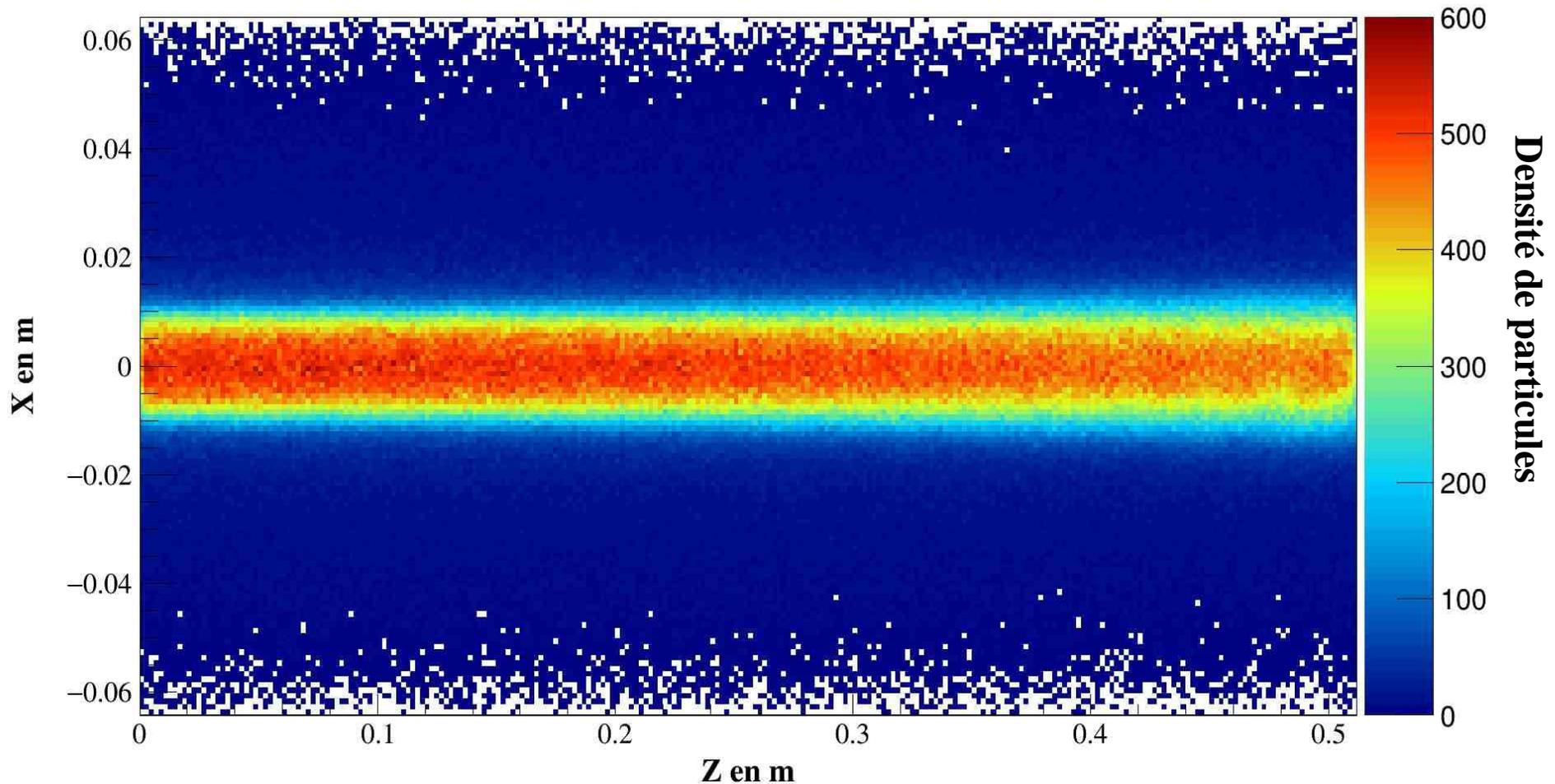
Distribution des électrons au temps $t = 5,0 \mu\text{s}$

Distribution des électrons



Distribution des électrons au temps $t = 7,5 \mu\text{s}$

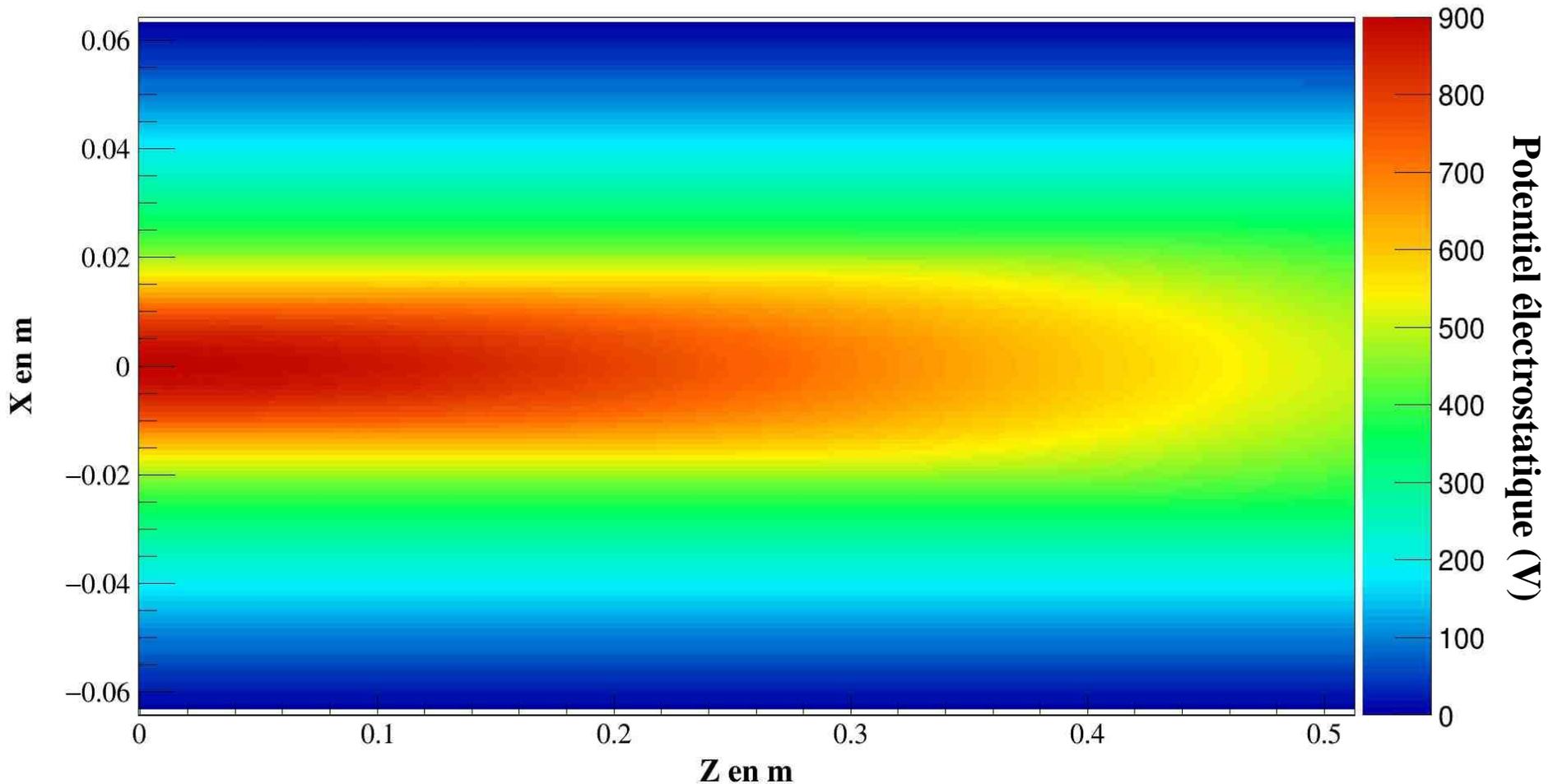
Distribution des électrons



Distribution des électrons au temps $t = 10,0 \mu\text{s}$

Etude du potentiel

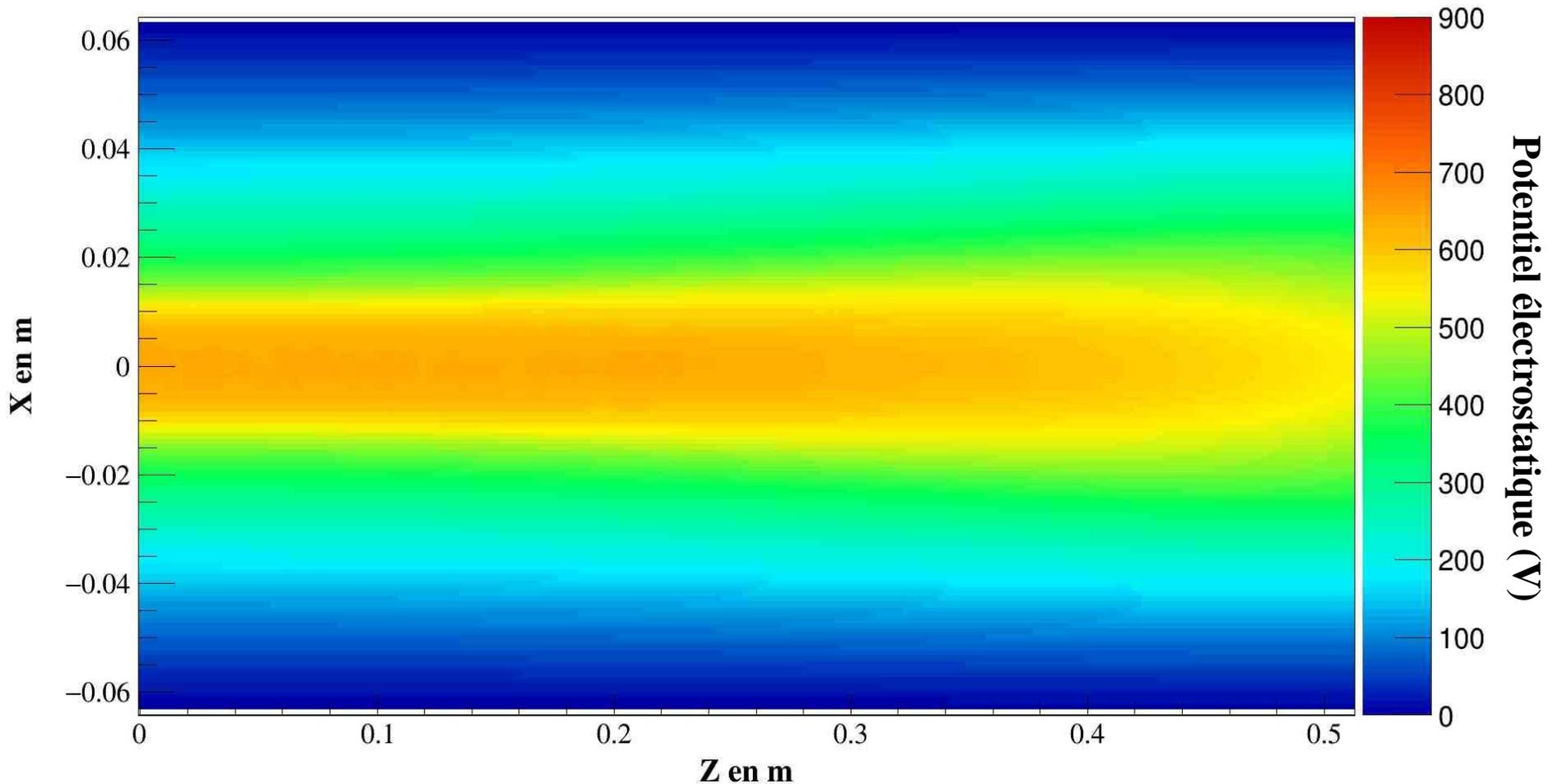
yz projection



Potentiel du faisceau en l'absence de compensation de charge d'espace

Etude du potentiel

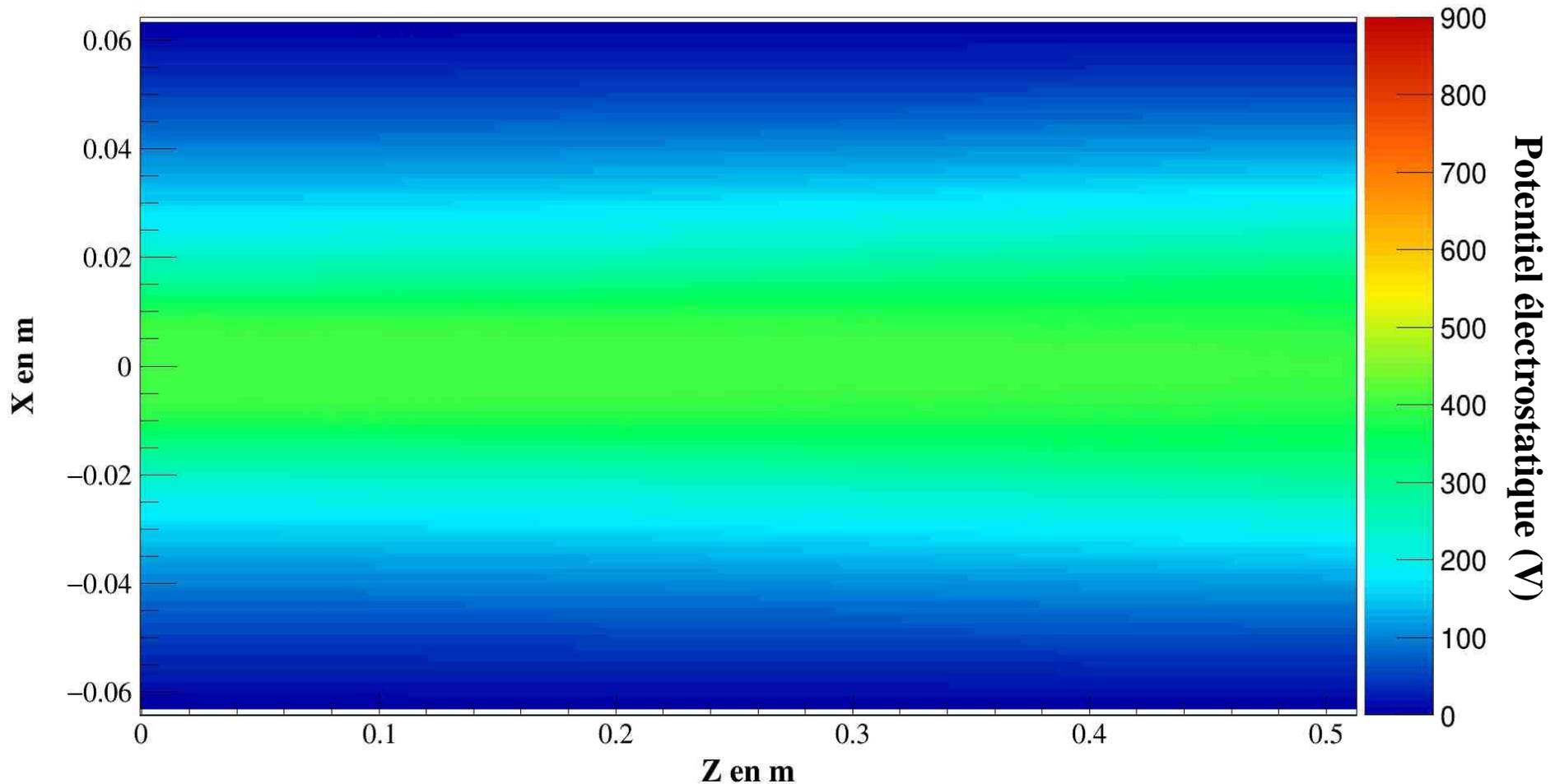
yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan xOz au temps $t = 1,0 \mu\text{s}$

Etude du potentiel

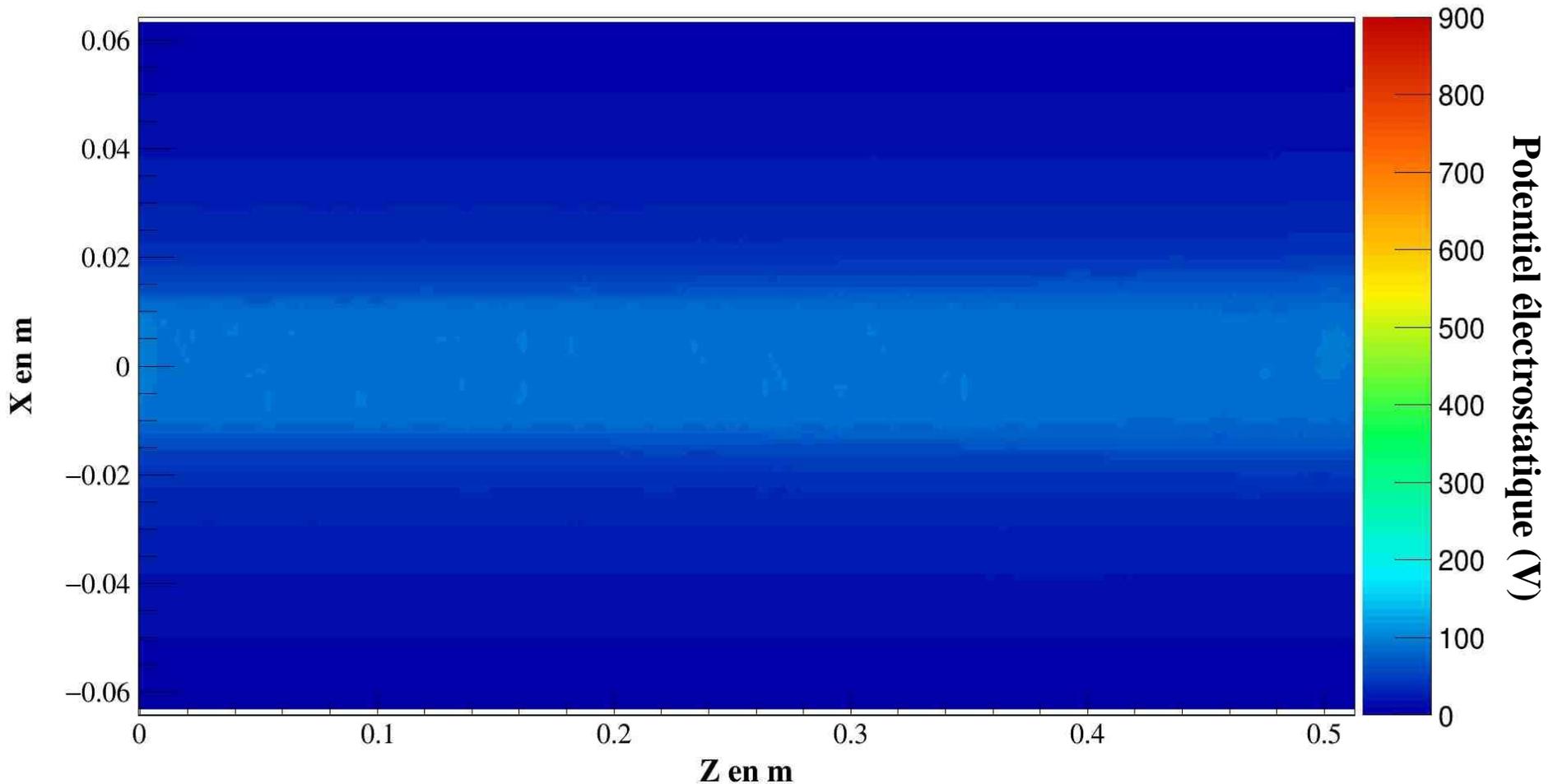
yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan xOz au temps $t = 2,5 \mu\text{s}$

Etude du potentiel

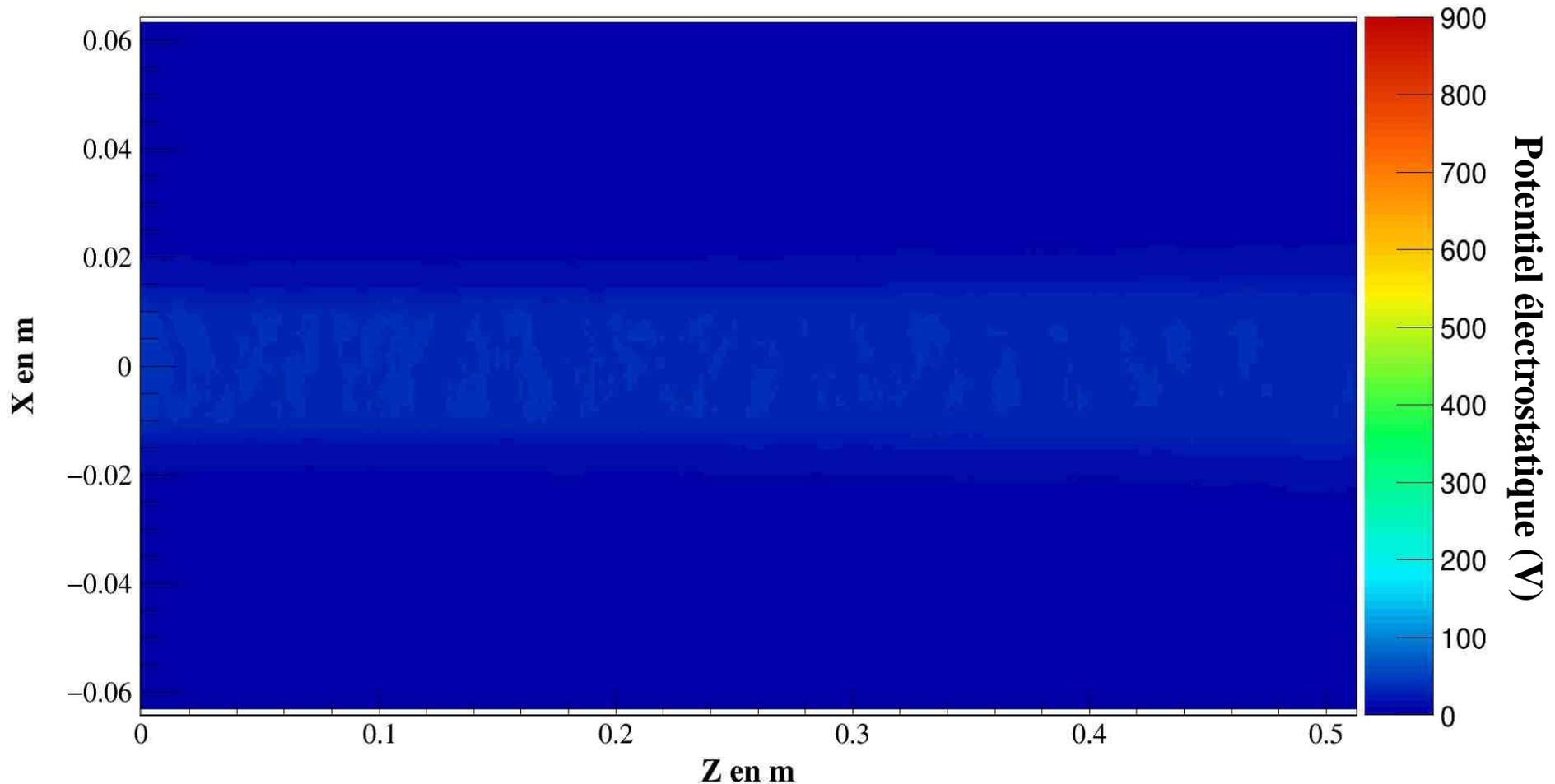
yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan xOz au temps $t = 5,0 \mu\text{s}$

Etude du potentiel

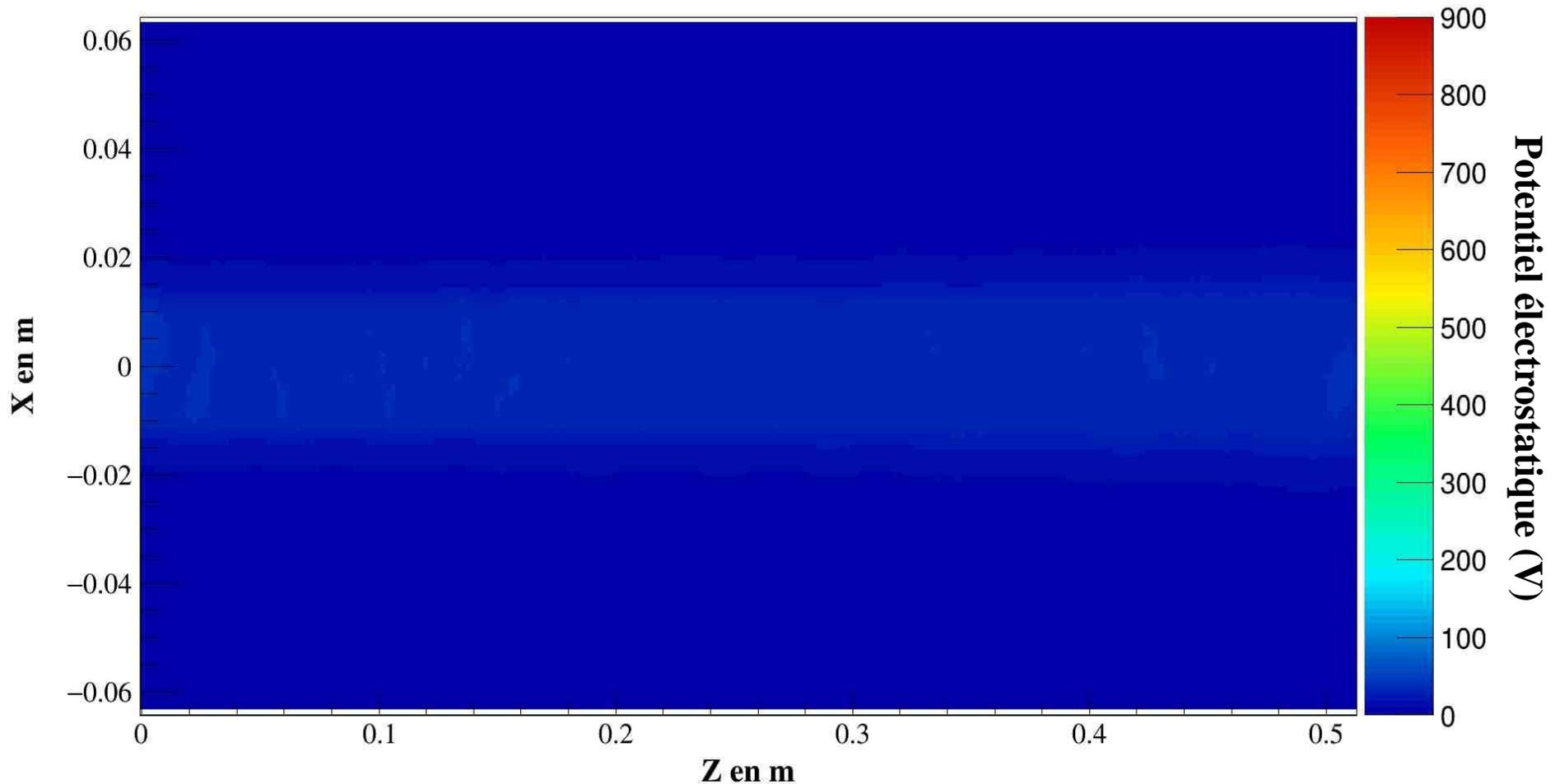
yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan xOz au temps $t = 7,5 \mu\text{s}$

Etude du potentiel

yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan xOz au temps $t = 10,0 \mu\text{s}$

Calcul du taux de compensation

Calcul du taux de compensation

Méthode

Calcul du taux de compensation

Méthode

On sauvegarde la distribution du faisceau à différents temps et on calcule le potentiel du faisceau en l'absence de compensation de charge d'espace.

→ Φ_0

Calcul du taux de compensation

Méthode

On sauvegarde la distribution du faisceau à différents temps et on calcule le potentiel du faisceau en l'absence de compensation de charge d'espace.

→ Φ_0

On sauvegarde le potentiel du faisceau compensé (plots précédents).

→ Φ_c

Calcul du taux de compensation

Méthode

On sauvegarde la distribution du faisceau à différents temps et on calcule le potentiel du faisceau en l'absence de compensation de charge d'espace.

→ Φ_0

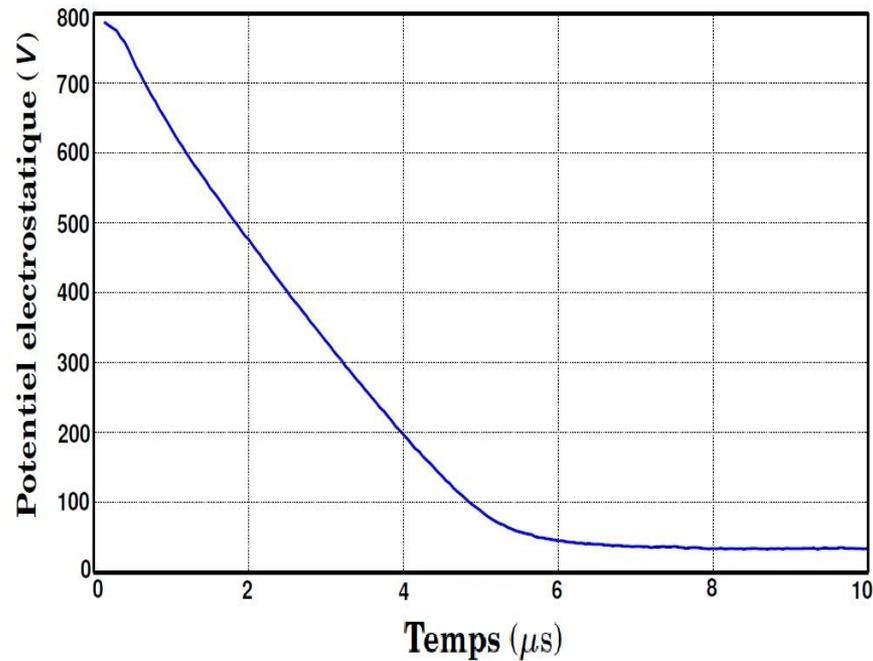
On sauvegarde le potentiel du faisceau compensé (plots précédents).

→ Φ_c

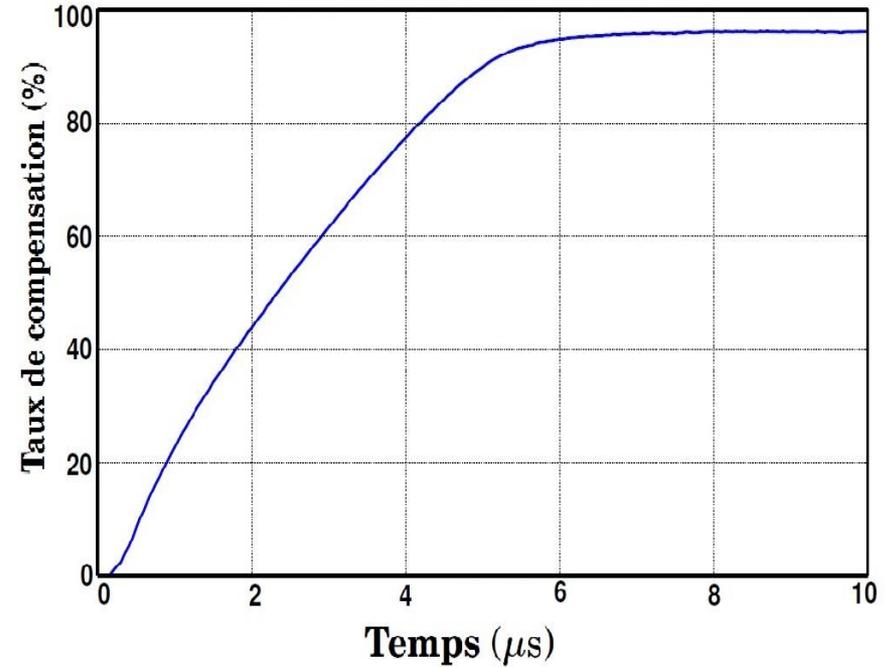
Le taux de compensation est donné par :

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_c}{\Phi_0}$$

Calcul du taux de compensation



Evolution temporelle du potentiel électrostatique sur l'axe du faisceau



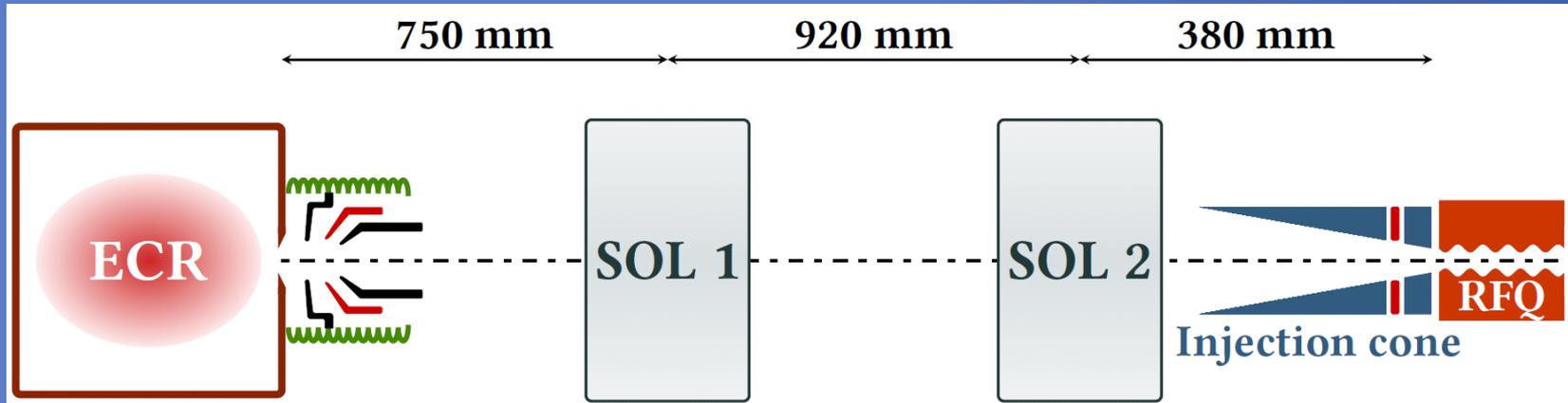
Evolution du degré de compensation de charge d'espace

Simulation de la LBE d'IFMIF

Simulation de la LBE d'IFMIF

Paramètres :

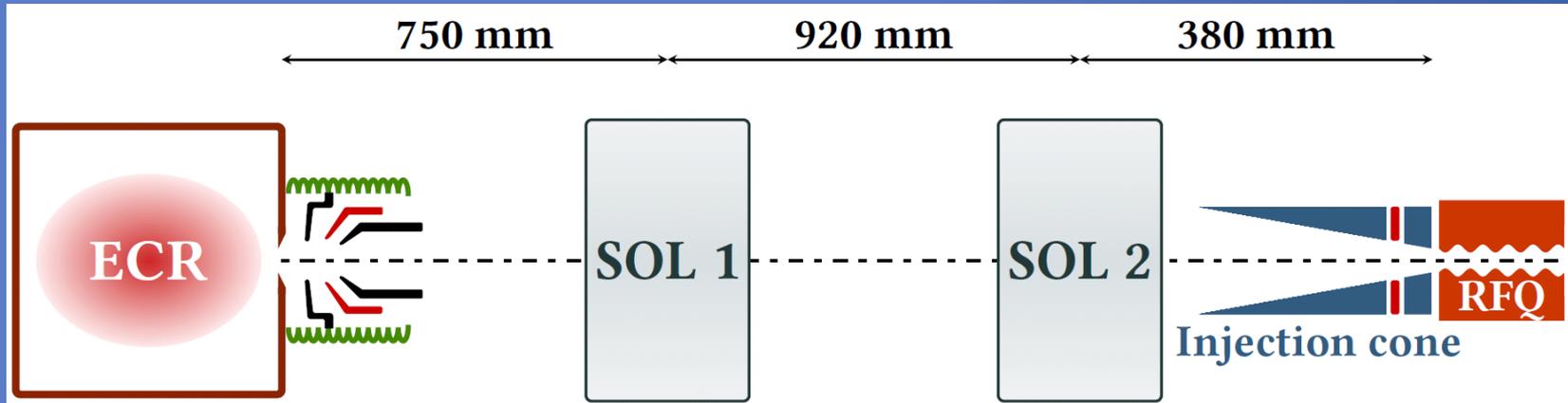
Géométrie de la LBE d'IFMIF :



Simulation de la LBE d'IFMIF

Paramètres :

Géométrie de la LBE d'IFMIF :



Carte de champ d'extraction

Carte de champ de solénoïdes

Faisceau typique produit au début du commissioning de l'injecteur à Rokkasho

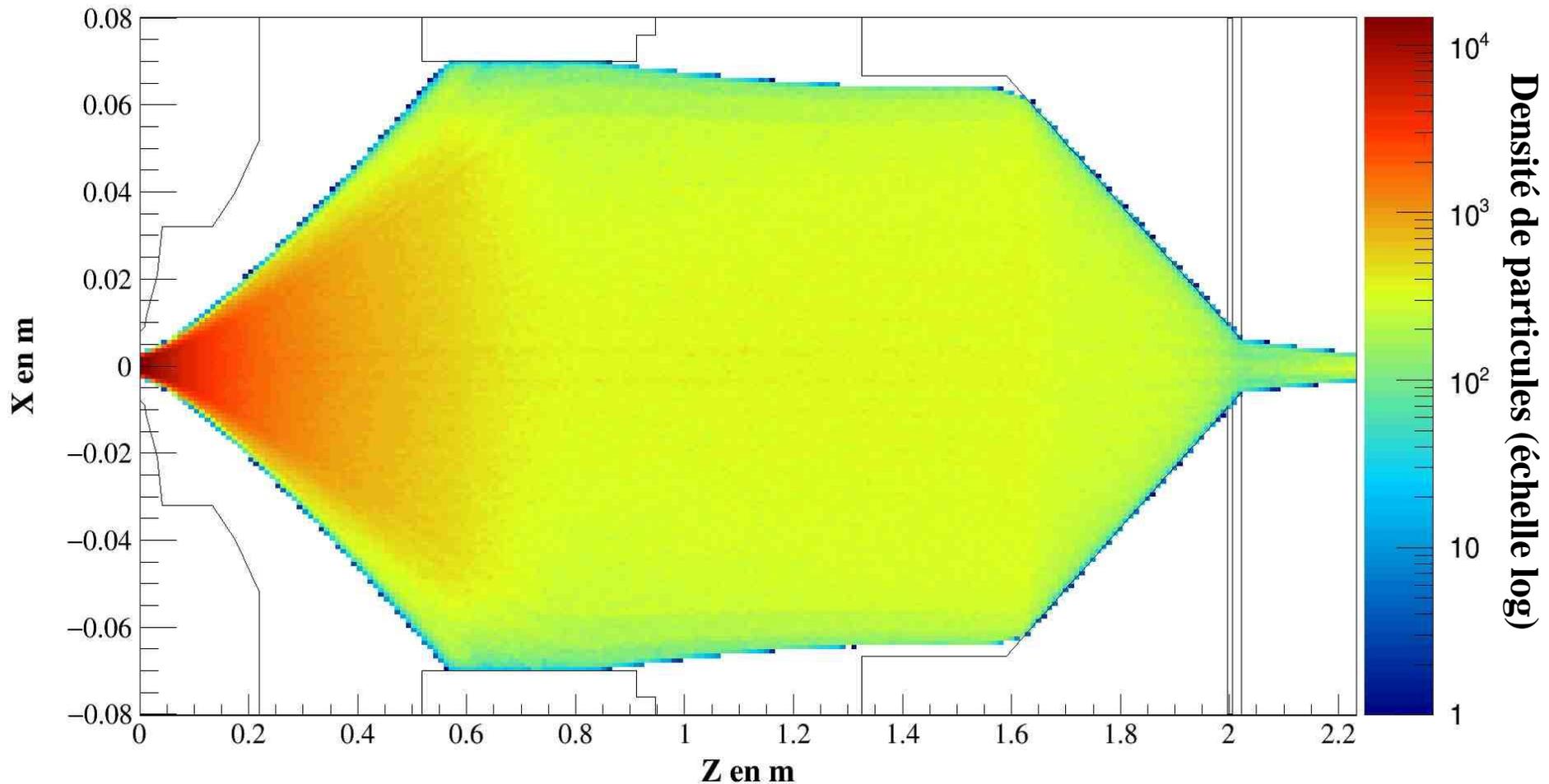
Faisceau de protons de 50 keV à 55 mA

10^{-4} mbar uniforme

Réaction prise en compte : $H^+ + H_2 \rightarrow H^+ + e^- + H_2^+$

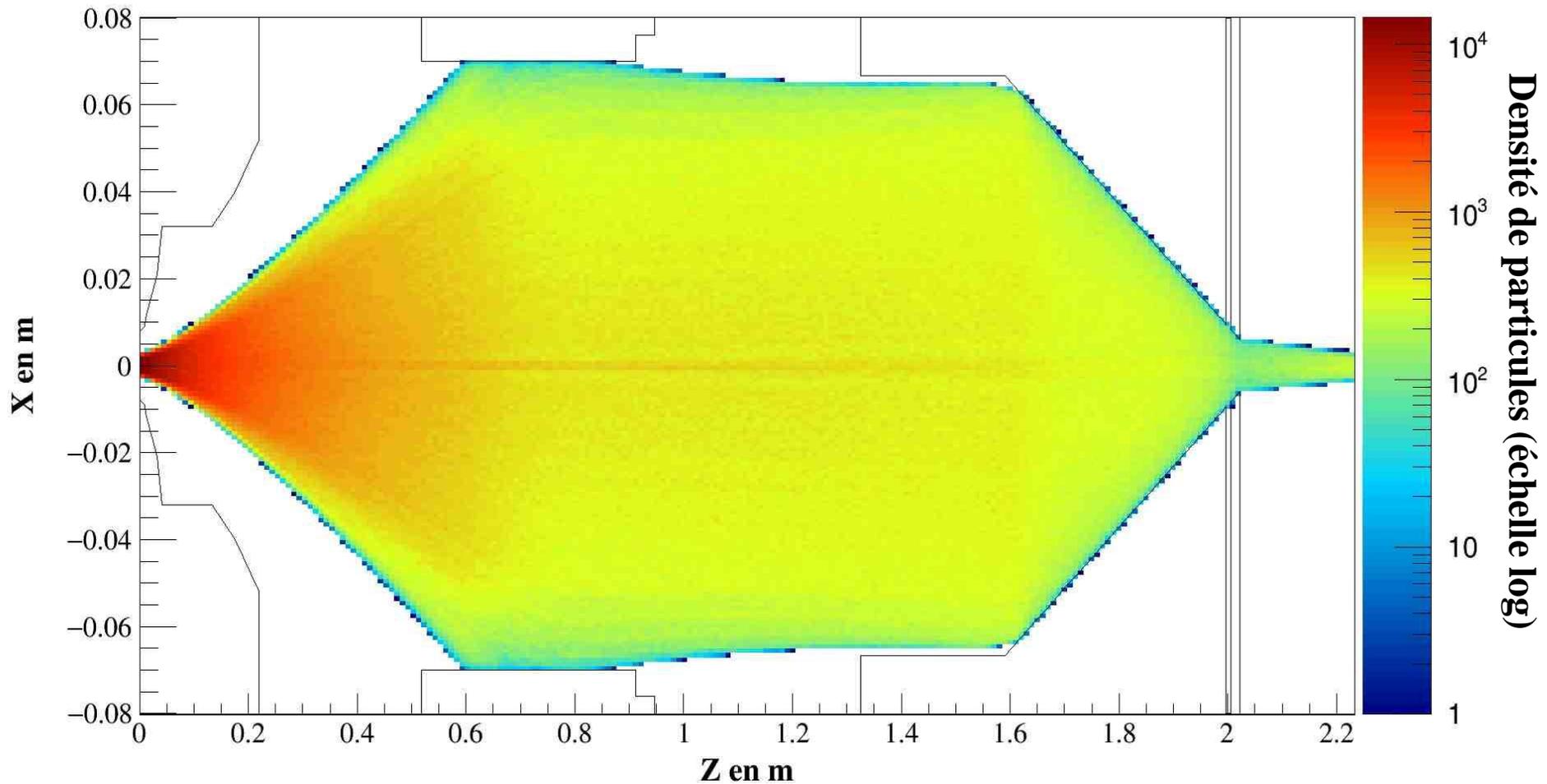
Temps de simulation : 10,0 μ s

Simulation de la LBE d'IFMIF



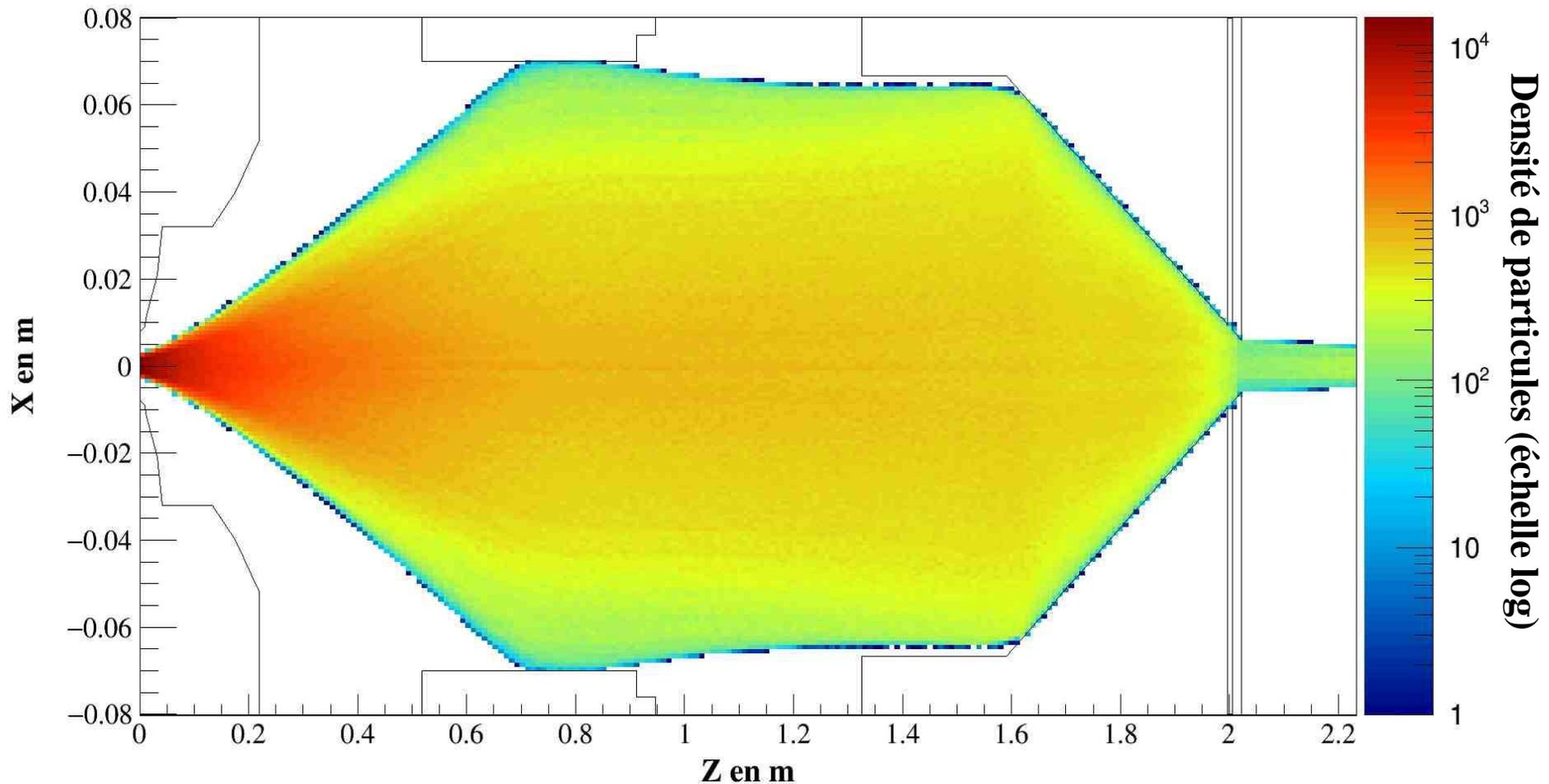
Faisceau de protons non compensé

Simulation de la LBE d'IFMIF



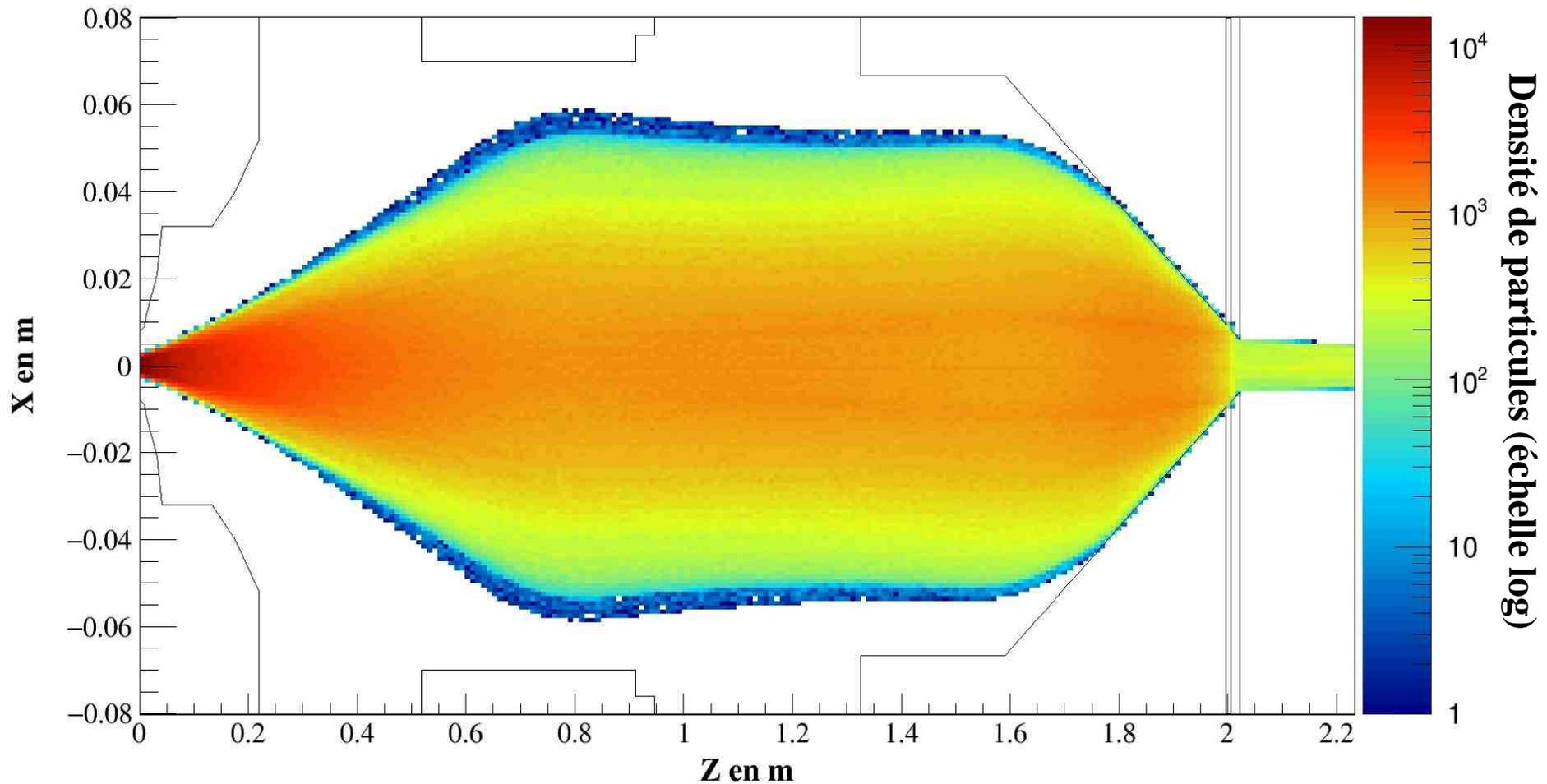
Faisceau de protons au temps $t = 1,0 \mu\text{s}$

Simulation de la LBE d'IFMIF



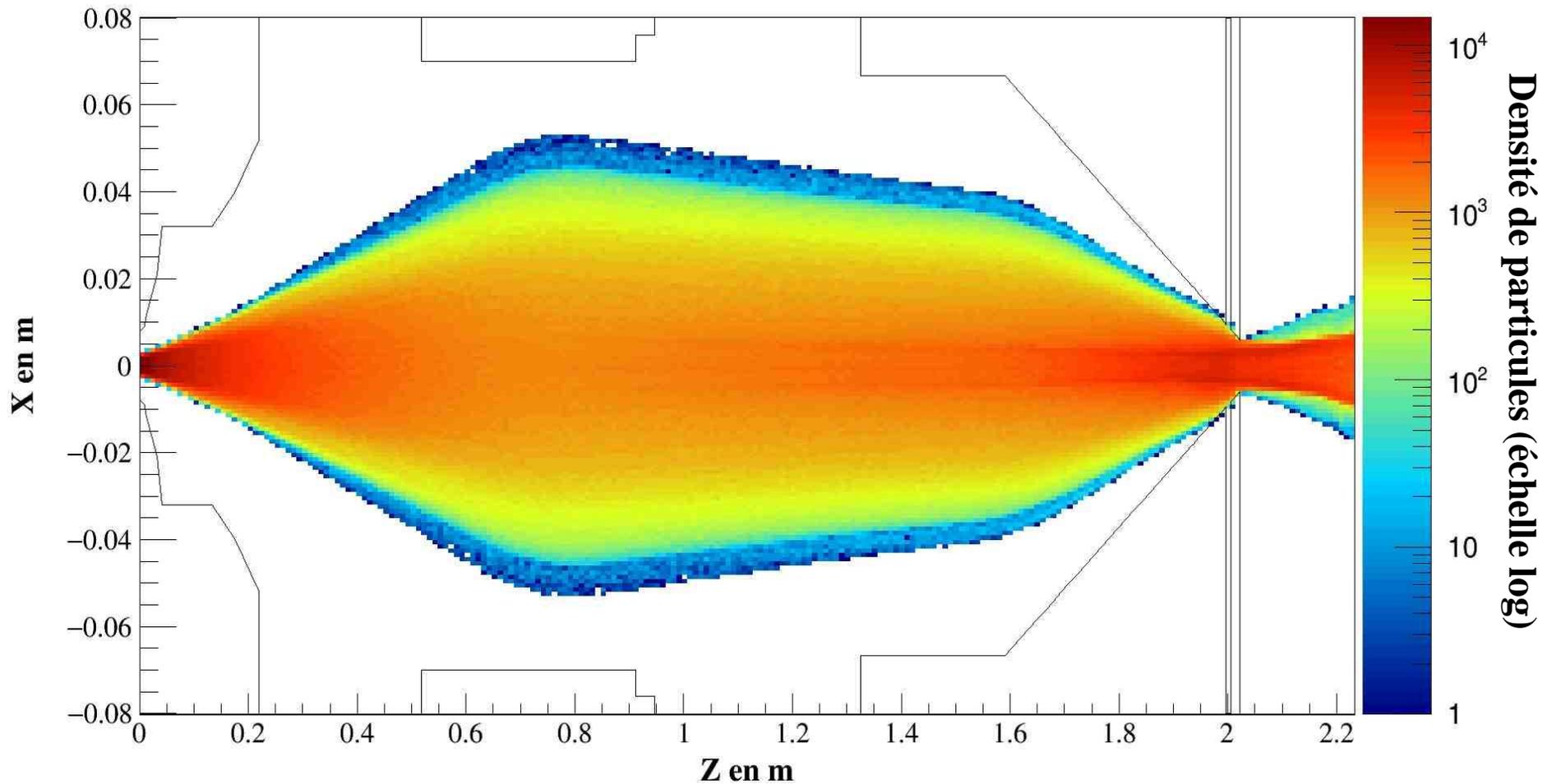
Faisceau de protons au temps $t = 3,0 \mu\text{s}$

Simulation de la LBE d'IFMIF



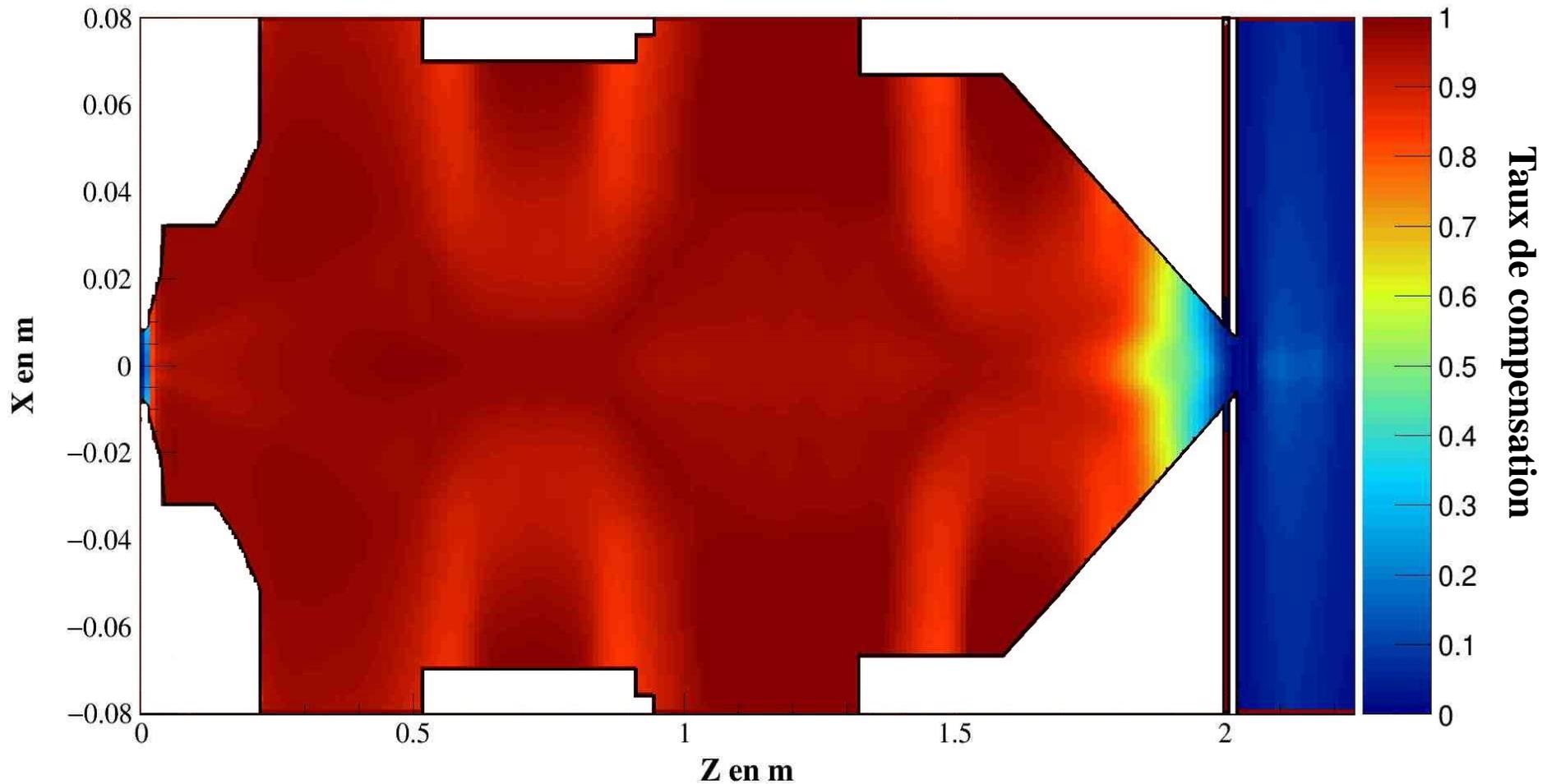
Faisceau de protons au temps $t = 6,0 \mu\text{s}$

Simulation de la LBE d'IFMIF



Faisceau de protons au temps $t = 10,0 \mu\text{s}$

Simulation de la LBE d'IFMIF

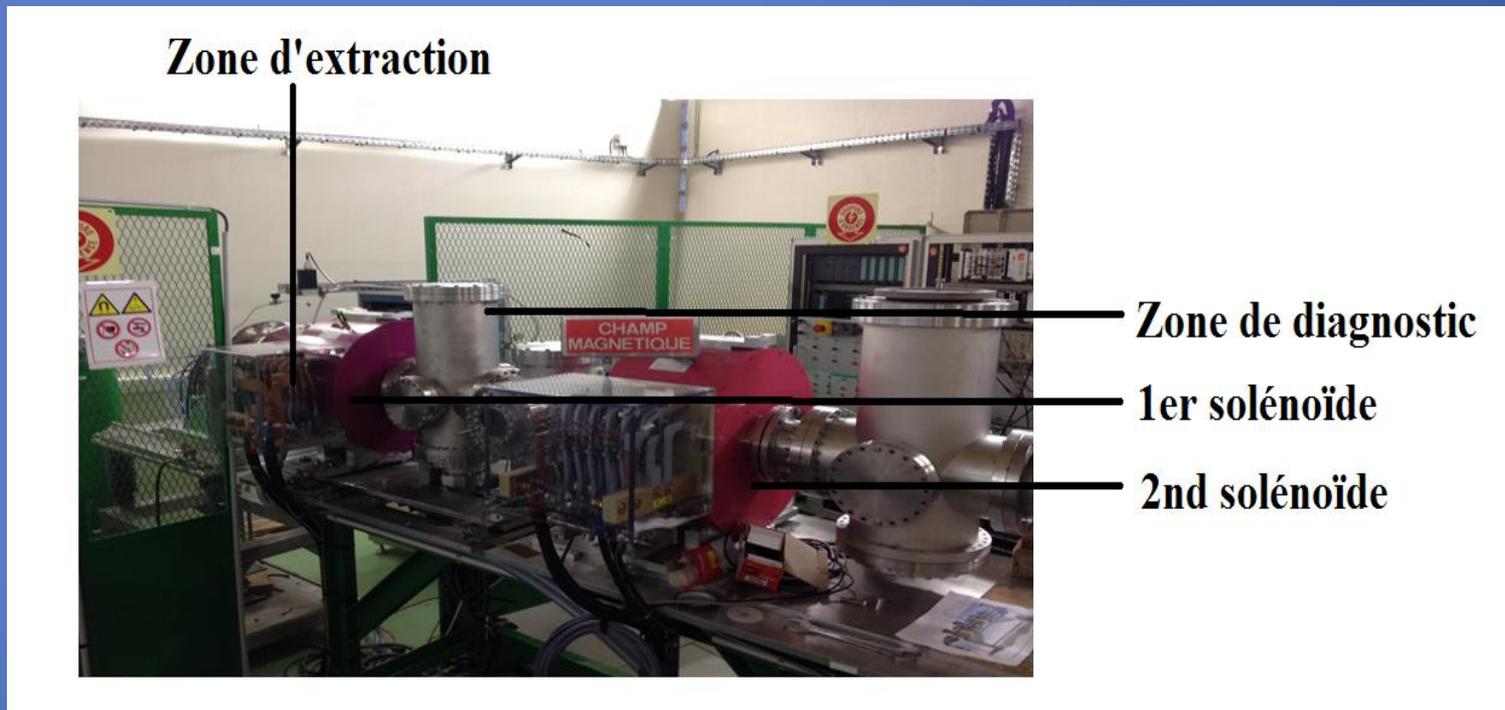


Carte de compensation en régime stationnaire

Activités expérimentales

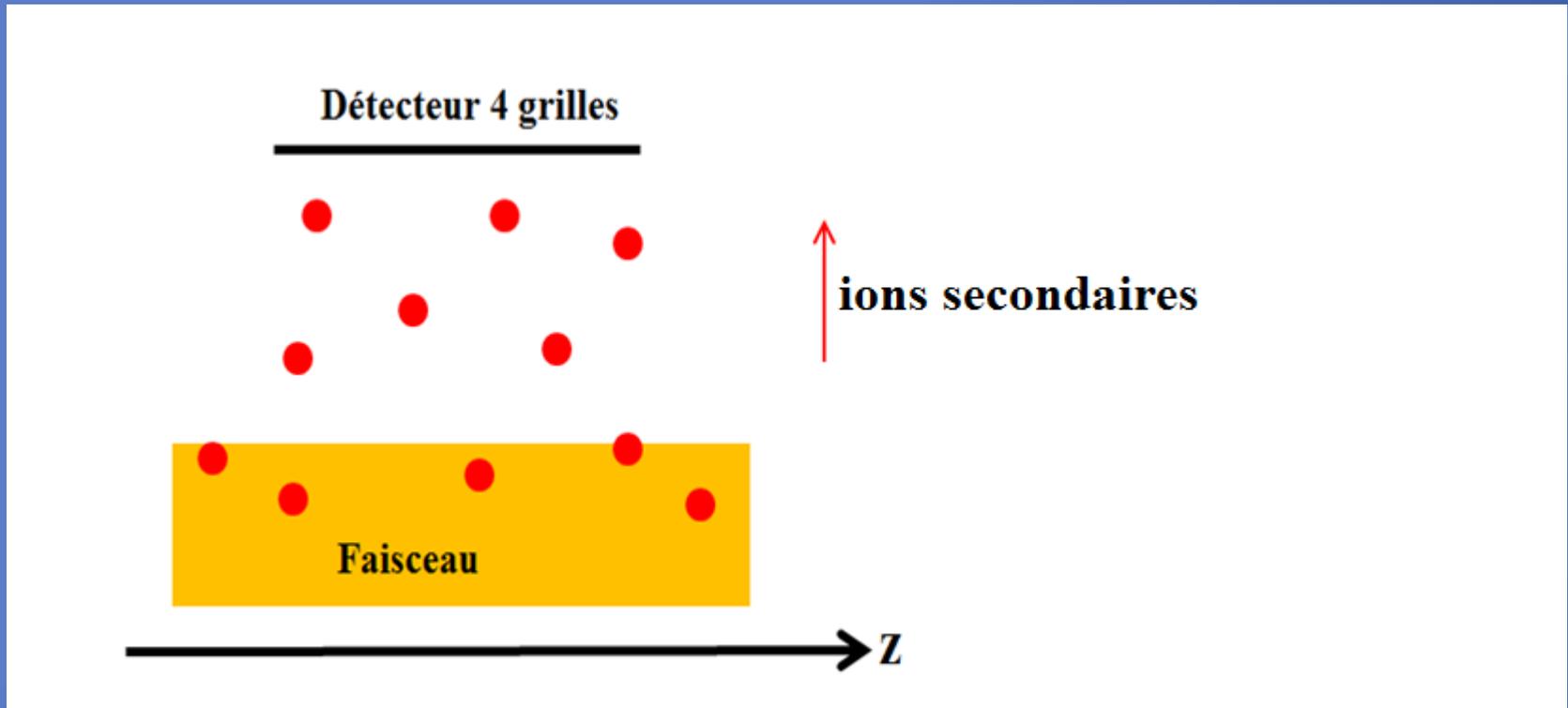
Détecteur 4 grilles

- Utilisation d'un détecteur 4 grilles
- Expériences réalisées sur BETSI



Banc de test BETSI

Détecteur 4 grilles



- Mesure l'énergie des ions secondaires afin d'évaluer le potentiel du faisceau

Détecteur 4 grilles

Détecteur 4 grilles

Aspect expérimental :

Détecteur 4 grilles

Aspect expérimental :

- Faisceau de protons de 40 keV à 30 mA

Détecteur 4 grilles

Aspect expérimental :

- Faisceau de protons de 40 keV à 30 mA
- Mesures 4 grilles effectuées pour différentes valeurs de solénoïdes

Détecteur 4 grilles

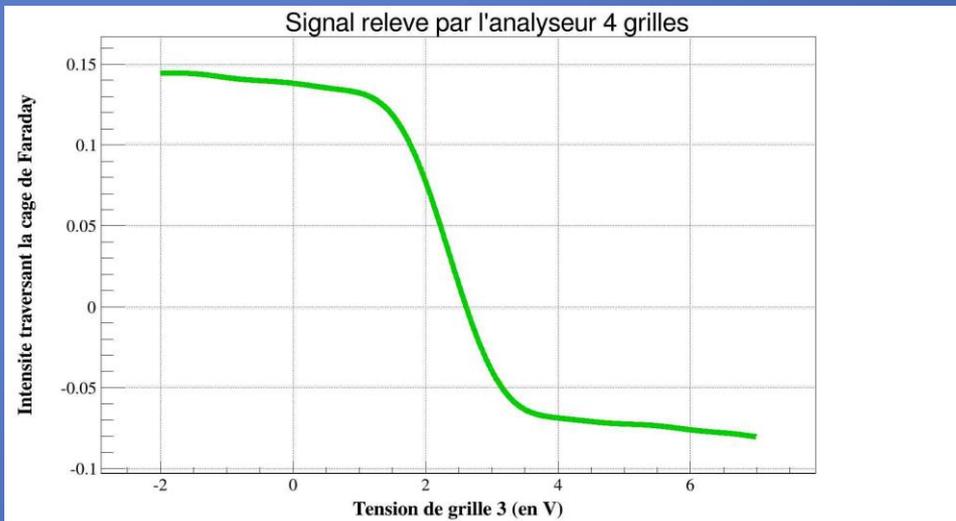
Aspect expérimental :

- Faisceau de protons de 40 keV à 30 mA
- Mesures 4 grilles effectuées pour différentes valeurs de solénoïdes
- Enregistrement du profil du faisceau

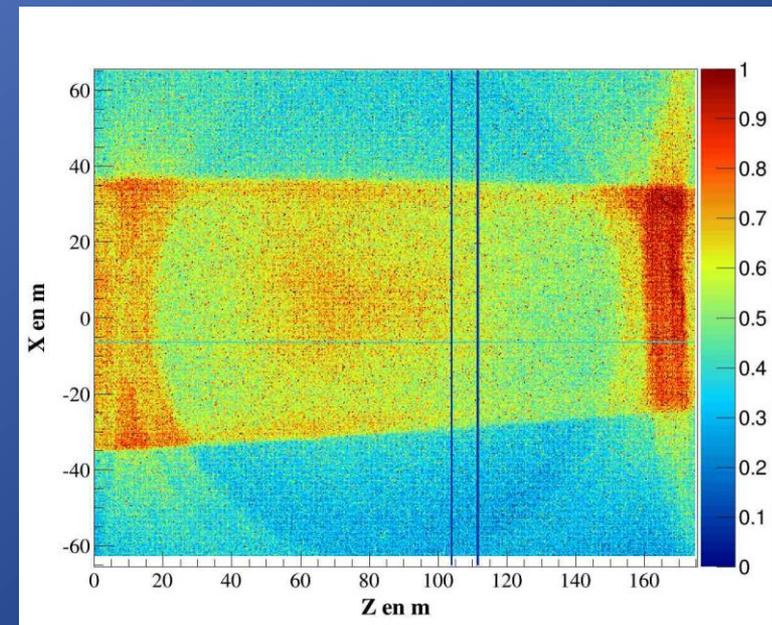
Détecteur 4 grilles

Aspect expérimental :

- Faisceau de protons de 40 keV à 30 mA
- Mesures 4 grilles effectuées pour différentes valeurs de solénoïdes
- Enregistrement du profil du faisceau



Signal relevé par la 4 grilles



Profil du faisceau

Détecteur 4 grilles

Détecteur 4 grilles

Simulation :

Détecteur 4 grilles

Simulation :

- Simulation d'un transport de faisceau dans des conditions similaires à celles de l'expérience.

Détecteur 4 grilles

Simulation :

- Simulation d'un transport de faisceau dans des conditions similaires à celles de l'expérience.
- Collection des ions éjectés du faisceau et de leur énergie

Détecteur 4 grilles

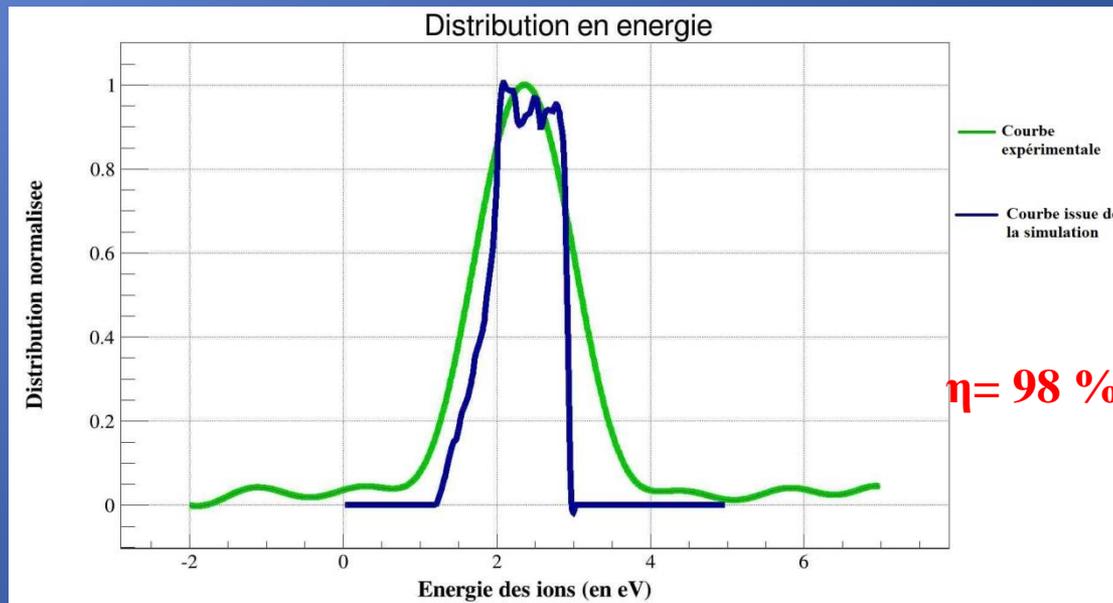
Simulation :

- Simulation d'un transport de faisceau dans des conditions similaires à celles de l'expérience.
- Collection des ions éjectés du faisceau et de leur énergie
- Ajustement du taux de compensation pour obtenir une énergie des ions semblable à celle de l'expérience

Détecteur 4 grilles

Simulation :

- Simulation d'un transport de faisceau dans des conditions similaires à celles de l'expérience.
- Collection des ions éjectés du faisceau et de leur énergie
- Ajustement du taux de compensation pour obtenir une énergie des ions semblable à celle de l'expérience



Conclusion et perspectives

Conclusion & perspectives

Simulations préliminaires réalisées

Proposition d'une meilleure analyse de mesures 4 grilles

Réaliser une simulation avec le faisceau de deutons nominal de la LBE d'IFMIF

Simulation de la ligne Myrte (projet ADS)

Développement d'un nouveau type de détecteurs pour analyser l'énergie des particules secondaires

Prise en compte de plus de phénomènes physiques dans la simulation

MERCI DE VOTRE ATTENTION