

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

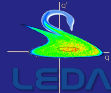
Conclusions

*La neutralisation de la charge d'espace dans les
injecteurs d'ions de haute intensité
ou
Comment flinguer une émittance dès l'injecteur*

A. Ben Ismail - R. Duperrier

Laboratoire d'Étude et de Développement pour les Accélérateurs
SACM

Séminaire du SACM - Saclay



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

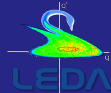
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

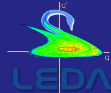
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

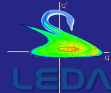
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

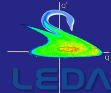
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

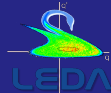
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

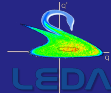
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

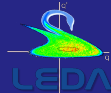
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

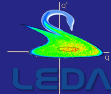
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Leurs applications
La charge d'espace

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

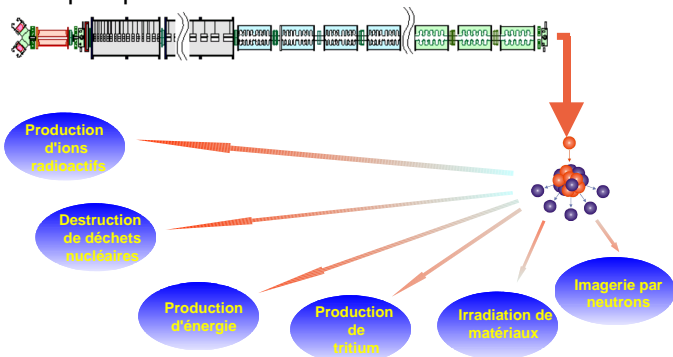
Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

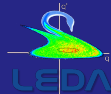
Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions

Plusieurs dizaines à une centaine de mA pour une énergie de quelques dizaines de MeV au GeV \Rightarrow **des MW!**



Afin d'assurer une maintenance acceptable, les pertes doivent être inférieures au W/m soit 10^{-6} , 10^{-7} .



La problématique de la charge d'espace

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Leurs applications

La charge d'espace

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

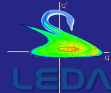
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- Dans ces machines la dépression du nombre d'onde peut atteindre $\sigma/\sigma_0 \simeq 0.3$.
- De telle valeur de dépression interdit tout pincement ("waist") dans les lignes de transfert ou d'adaptation.
- Le couplage implicite entre les plans implique un choix judicieux du point de fonctionnement (résonances).
- Le caractère non linéaire de la charge d'espace impose une adaptation du faisceau à la structure (et vice versa dans la phase de conception).



La problématique de la charge d'espace

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Leurs applications
La charge d'espace

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

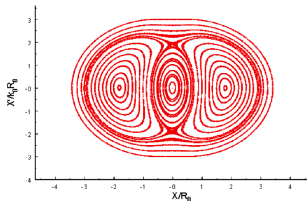
Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

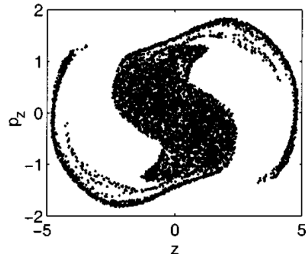
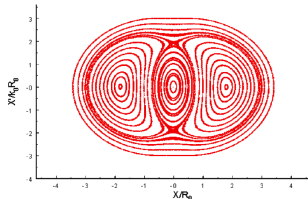
Conclusions

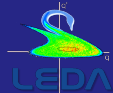
- Dans ces machines la dépression du nombre d'onde peut atteindre $\sigma/\sigma_0 \simeq 0.3$.
- De telle valeur de dépression interdit tout pincement ("waist") dans les lignes de transfert ou d'adaptation.
- Le couplage implicite entre les plans implique un choix judicieux du point de fonctionnement (résonances).
- Le caractère non linéaire de la charge d'espace impose une adaptation du faisceau à la structure (et vice versa dans la phase de conception).

- Dans ces machines la dépression du nombre d'onde peut atteindre $\sigma/\sigma_0 \simeq 0.3$.
- De telle valeur de dépression interdit tout pincement ("waist") dans les lignes de transfert ou d'adaptation.
- Le couplage implicite entre les plans implique un choix judicieux du point de fonctionnement (résonances).
- Le caractère non linéaire de la charge d'espace impose une adaptation du faisceau à la structure (et vice versa dans la phase de conception).



- Dans ces machines la dépression du nombre d'onde peut atteindre $\sigma/\sigma_0 \simeq 0.3$.
- De telle valeur de dépression interdit tout pincement ("waist") dans les lignes de transfert ou d'adaptation.
- Le couplage implicite entre les plans implique un choix judicieux du point de fonctionnement (résonances).
- Le caractère non linéaire de la charge d'espace impose une adaptation du faisceau à la structure (et vice versa dans la phase de conception).





Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Ionisation par le
faisceau

Réduction du
potentiel

Autres collisions

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation**
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions

L'ionisation du gaz résiduel par le faisceau

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Ionisation par le faisceau

Réduction du potentiel

Autres collisions

Critères

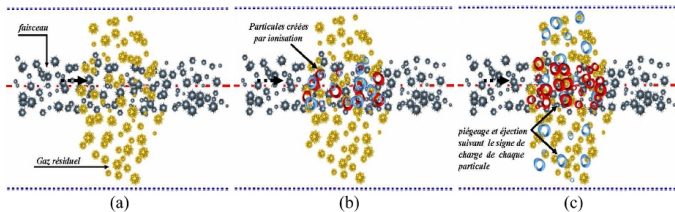
Motivation pour un code PIC

Les secondaires

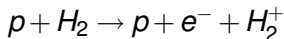
Gaz résiduel: nature et pression

Applications

Conclusions

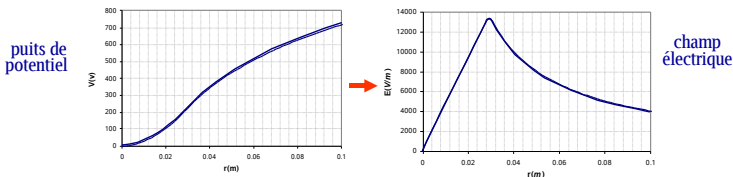


En intégrant la présence d'un gaz résiduel (ex.: H_2) dans la chambre à vide, nous pouvons obtenir la production de paires e^- et d'ions (H_2^+) par ionisation:



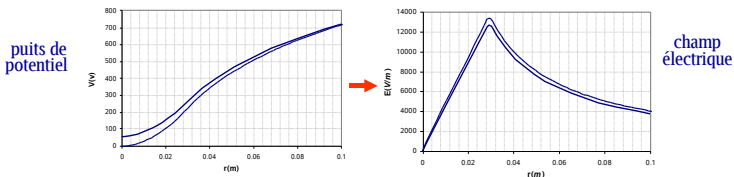
on suppose que $\chi = N_{\text{faisceau}}/N_{\text{gaz}} \ll 1$ avec N_{faisceau} la densité du faisceau.

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



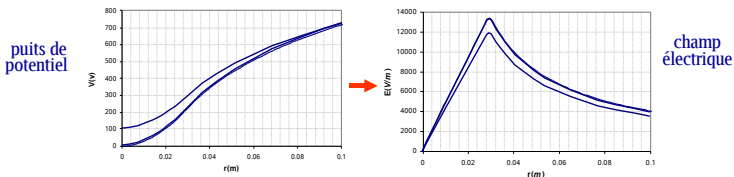
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



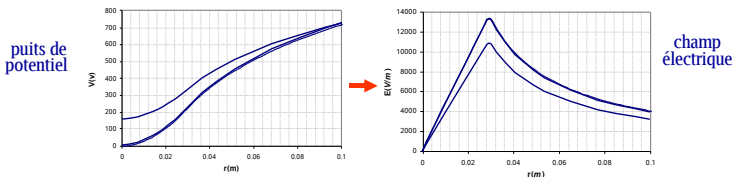
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



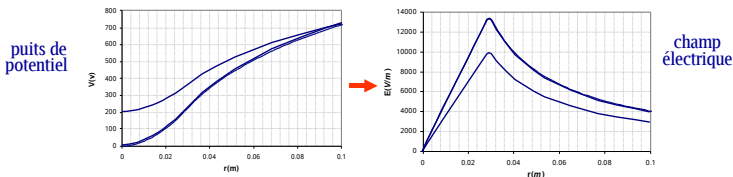
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



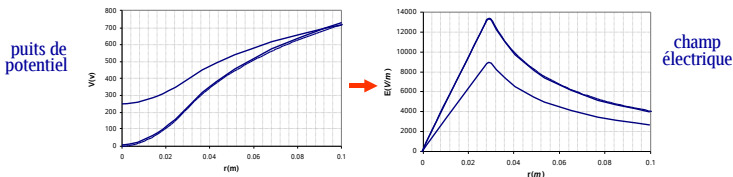
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



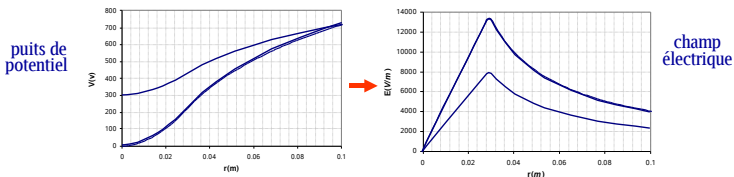
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



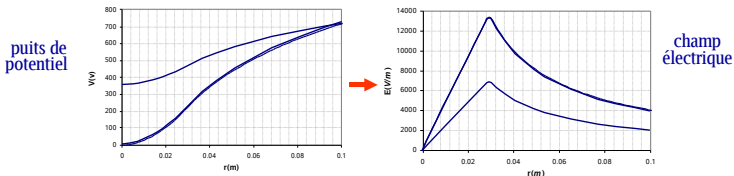
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



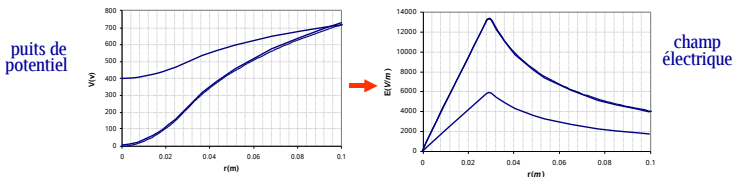
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



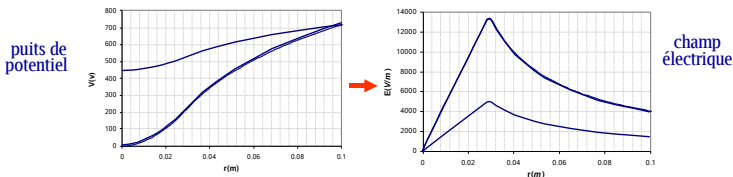
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



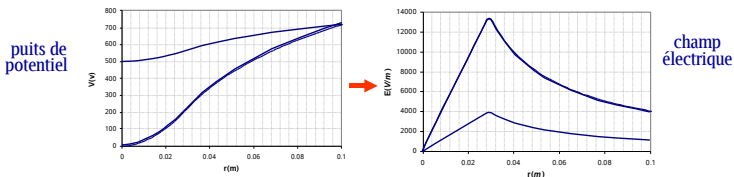
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



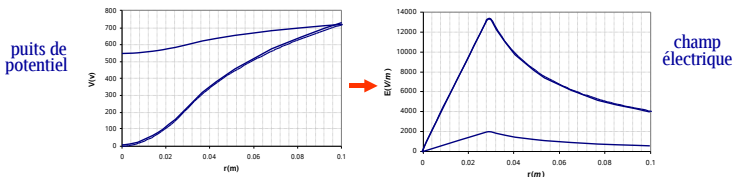
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



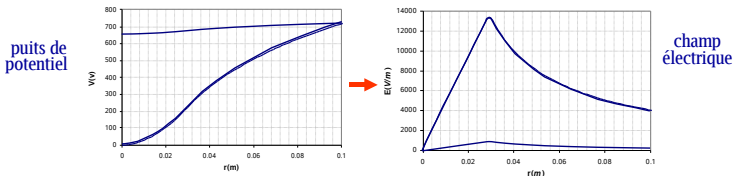
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



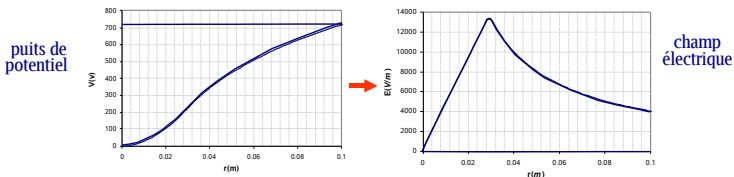
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV



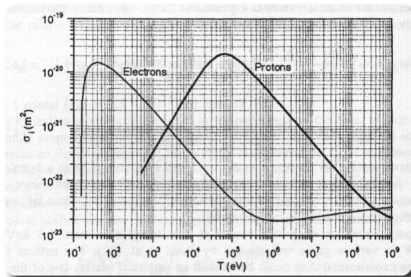
Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

Illustration pour un faisceau uniforme de 100 mA à 100 keV

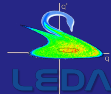


Les e^- sont trappés dans le faisceau et les ions H_2^+ ejectés vers la paroi. On vise donc la neutralité électrique du faisceau \Rightarrow **Compensation de la charge d'espace**

- L'ionisation du gaz par les électrons doit être prise en compte si l'on souhaite intégrer convenablement le taux de production des paires par unité de temps.



- Cet apport n'est cependant a priori pas fondamental.



Autres collisions ?

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Ionisation par le
faisceau

Réduction du
potentiel

Autres collisions

Critères

Motivation
pour un code
PIC

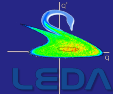
Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- Le phénomène de recombinaison est négligeable pour le jeu de paramètres choisi.
- La thermalisation des électrons est un processus trop lent pour un un faisceau de 100 mA et une énergie de 100 keV ($\tau_n \ll \tau_{ee}$), mais elle peut être pertinente pour des courants plus faibles ($\tau_{ee} \searrow$) ou bien des énergies plus importantes ($\tau_n \nearrow$).
- La diffusion des électrons sur les ions secondaires est encore plus lente ($\tau_{ei} > \tau_{ee}$).
- La diffusion des électrons sur les particules du faisceau (chauffage) est pertinente si l'on cherche à caractériser précisément l'état d'équilibre.



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Nécessité

Le degré de
compensation

Le temps
d'établissement

Inertie des ions

Le cas du faisceau
en paquets

Application à l'ESS

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation**
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions

- Lors de la conception d'un secteur de l'accélérateur (ligne de transfert, structure périodique accélératrice), une première phase d'exploration rapide du transport est réalisée à l'aide des équations d'enveloppes faisceau (1^{er} ordre) qui intègrent la force de charge d'espace:

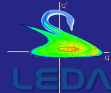
$$R''(s, t) + k^2(s, t)R - \frac{K(s, t)}{R(s, t)} - \frac{\varepsilon_r^2}{R(s, t)^3} = 0$$

avec $K(s, t) = \frac{qI_{eff}(s, t)}{2\pi\epsilon_0 m(\gamma\beta)^3}$ la pervéance généralisée ($I_{eff}(s, t) \equiv$ courant effectif).

- Lors de de cette phase initiale, il est nécessaire pour le concepteur d'évaluer la pertinence de la neutralisation dans le secteur simulé et donc de trouver la valeur de I_{eff} en fonction du temps et de s .

- Plusieurs formulations ont été proposées pour évaluer le degré de neutralisation D_n tel que $I_{eff} = D_n I_{faisceau}$:
 - le ratio entre le puits de potentiel à un instant t et une position s et celui du faisceau seul à cette même position,
 - le ratio entre la charge neutralisante et celle du faisceau.
- Afin de pouvoir injecter D_n dans l'équation d'enveloppe précédente, nous avons proposé la formulation suivante [Ben Ismail et al, PRSTAB, 2007]:

$$\begin{aligned}
 D_n(t) &= 1 - \gamma^2 \frac{\int_0^{r_b} r E_r(r,t) \rho(r,t) dr}{\int_0^{r_b} r E_r(r,0) \rho(r,0) dr} \\
 &= 1 - f
 \end{aligned}$$



Le temps d'établissement

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Nécessité

Le degré de
compensation

Le temps
d'établissement

Inertie des ions

Le cas du faisceau
en paquets

Application à l'ESS

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Définition

Temps écoulé entre le début du pulse faisceau et l'instant où le système est estimé stable (émittance? potentiel?).

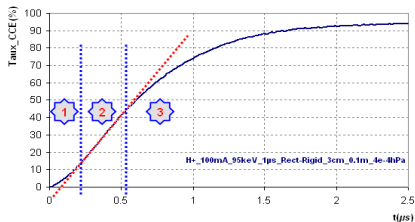
- D'un point de vue électrique, le système est stable lorsque les termes source égalisent les termes perte pour les particules chargées. Ceci est équivalent à l'instant où les particules créées puis perdues lors du transitoire ne le sont plus (H_2^+ pour un faisceau de protons).
- Dans une approche simplifiée, cela se traduit par une force électrique défocalisante pour ces particules rendue négligeable **mais cela ne veut pas dire que la densité de charges totale est devenu nulle!**

- En première approche, ce temps peut être estimé à l'aide de l'expression suivante (cas continu):

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma N_{gaz} \beta c}$$

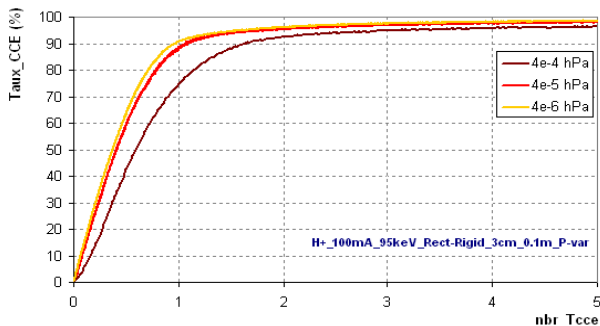
avec σ la section efficace d'ionisation, $N_{gas} = P/kT_{labo}$ et β la vitesse réduite du faisceau.

- Evolution de f en fonction du temps pour un faisceau de protons de 100 mA et 100 keV dans un glissement (calcul avec un code PIC 1,5D):



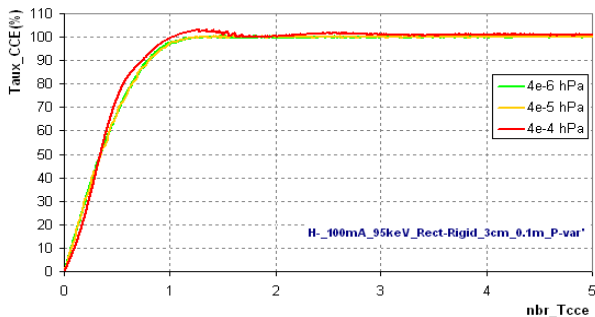
- Transitoire non linéaire: inertie ionique, T_{e^-} .

- Faisceau de protons de 100 mA et 100 keV dans un glissement pour différentes pressions:



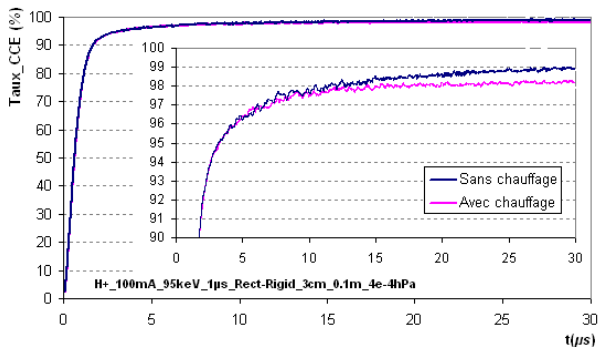
- Transitoire non linéaire par inertie ionique inexistante au début si $P < 10^{-5}$ hPa.

- Faisceau de H^- de 100 mA et 100 keV dans un glissement pour différentes pressions:



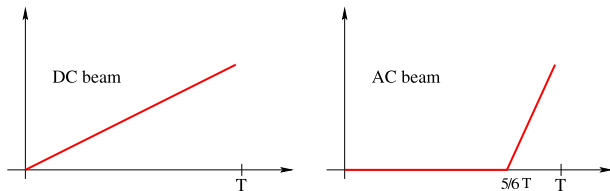
- Transitoire linéaire (éjection e^- rapide, ions froids).
- L'inertie ionique induit une surcompensation [Baartman, EPAC '88].

- Faisceau de H^+ de 100 mA et 100 keV dans un glissement avec et sans chauffage électronique:



- L'équilibre est en fait atteint à qqs τ_n .
- Impossibilité d'atteindre une neutralisation totale [Fleury, thèse].

- Si nous traçons l'évolution de la charge neutralisante produite pendant T par un faisceau continu et un faisceau en paquets de longueur $T/6$ et de période de répétition T (même courant):



- On peut constater que la même quantité de charge a été produite.

- Evaluons le kick induit par faisceau uniforme:

$$\dot{x} = \int_0^T F_x \frac{dt}{m}$$

- Avec un champ linéaire produit par la charge neutralisante entre les paquets $E_x = -\frac{\rho_b L_b \sigma N_{gas} C}{2\epsilon_0 \lambda} x n$ et quand le faisceau est présent, on a $E_x = \frac{\rho_b}{2\epsilon_0} x \left(1 - \frac{L_b \sigma N_{gas} C}{\lambda} n\right)$ avec n le nombre de période écoulé.

- La solution pour $\dot{x} = 0$ donne un nombre de période **identique au cas du faisceau continu!**
- Si l'on définit le facteur f tel que:

$$f = 1 - \frac{E_x(t \gg \tau_n)}{E_x(t=0)}$$

on trouve:

$$f = \frac{L_b}{\beta \lambda}$$

- Evaluons le kick induit par faisceau uniforme:

$$\dot{x} = \int_0^T F_x \frac{dt}{m}$$

- Avec un champ linéaire produit par la charge neutralisante entre les paquets $E_x = -\frac{\rho_b L_b \sigma N_{gas} C}{2\epsilon_0 \lambda} x n$ et quand le faisceau est présent, on a $E_x = \frac{\rho_b}{2\epsilon_0} x \left(1 - \frac{L_b \sigma N_{gas} C}{\lambda} n\right)$ avec n le nombre de période écoulé.

- La solution pour $\dot{x} = 0$ donne un nombre de période **identique au cas du faisceau continu!**
- Si l'on définit le facteur f tel que:

$$f = 1 - \frac{E_x(t \gg \tau_n)}{E_x(t=0)}$$

on trouve:

$$f = \frac{L_b}{\beta \lambda}$$

- Evaluons le kick induit par faisceau uniforme:

$$\dot{x} = \int_0^T F_x \frac{dt}{m}$$

- Avec un champ linéaire produit par la charge neutralisante entre les paquets $E_x = -\frac{\rho_b L_b \sigma N_{gas} C}{2\epsilon_0 \lambda} x n$ et quand le faisceau est présent, on a

$$E_x = \frac{\rho_b}{2\epsilon_0} x \left(1 - \frac{L_b \sigma N_{gas} C}{\lambda} n \right) \text{ avec } n \text{ le nombre de période écoulé.}$$

- La solution pour $\dot{x} = 0$ donne un nombre de période **identique au cas du faisceau continu!**
- Si l'on définit le facteur f tel que:

$$f = 1 - \frac{E_x(t \gg \tau_n)}{E_x(t=0)}$$

on trouve:

$$f = \frac{L_b}{\beta \lambda}$$

Compensation du faisceau en paquets (2/3)

- Evaluons le kick induit par faisceau uniforme:

$$\dot{x} = \int_0^T F_x \frac{dt}{m}$$

- Avec un champ linéaire produit par la charge neutralisante entre les paquets $E_x = -\frac{\rho_b L_b \sigma N_{gas} C}{2\epsilon_0 \lambda} x n$ et quand le faisceau est présent, on a $E_x = \frac{\rho_b}{2\epsilon_0} x \left(1 - \frac{L_b \sigma N_{gas} C}{\lambda} n\right)$ avec n le nombre de période écoulé.

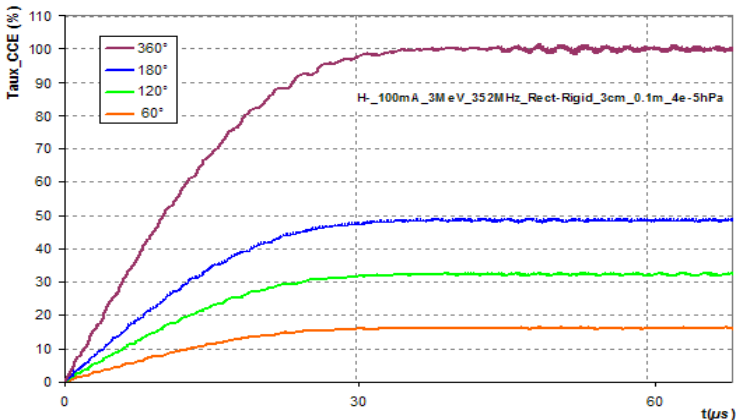
- La solution pour $\dot{x} = 0$ donne un nombre de période **identique au cas du faisceau continu!**
- Si l'on définit le facteur f tel que:

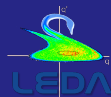
$$f = 1 - \frac{E_x(t \gg \tau_n)}{E_x(t=0)}$$

on trouve:

$$f = \frac{L_b}{\beta \lambda}$$

(Illustration)





Critère de stabilité pour les faisceaux en paquets

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Nécessité

Le degré de compensation

Le temps d'établissement

Inertie des ions

Le cas du faisceau en paquets

Application à l'ESS

Motivation pour un code PIC

Les secondaires

Gaz résiduel: nature et pression

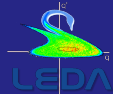
- A un s donné et pour un faisceau chargé positivement, les e^- subissent successivement une force focalisante (faisceau) puis aucune force (entre les paquets)
- Par une approche matriciel (canal FO), il a été démontré que le mouvement oscillant de l' e^- peut être stable si:

$$\Lambda = \frac{f_c}{f_b} < 1$$

avec:

$$f_c = \sqrt{\frac{r_e \cdot C}{2e \cdot m_p (m.a.u.)} \cdot \frac{I_b}{\beta R^2}}$$

où m_p est la masse du proton (u.m.a.), r_e le rayon classique de l' e^- ; I_b et f_b , respectivement le courant et la fréquence faisceau, et R sa demi-taille [Baconnier, CERN-SPS 80-2, '80].



Evolution des critères pour ESS (1/2)

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Nécessité

Le degré de compensation

Le temps d'établissement

Inertie des ions

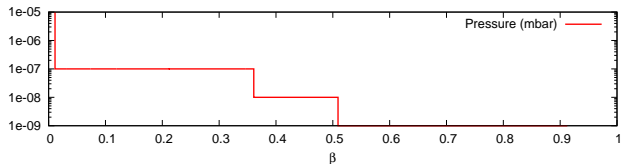
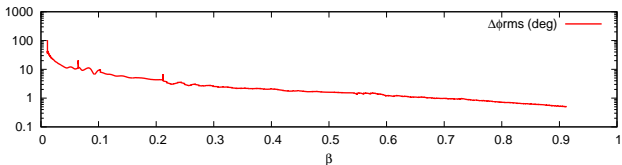
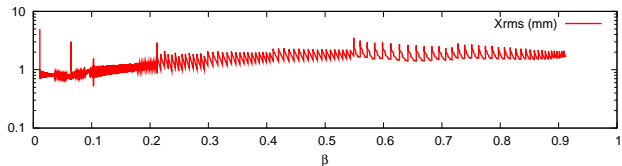
Le cas du faisceau en paquets

Application à l'ESS

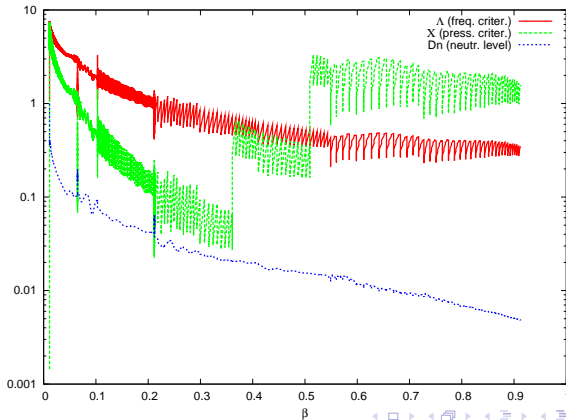
Motivation pour un code PIC

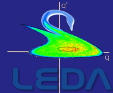
Les secondaires

Gaz résiduel: nature et pression



Si la partie haute énergie est faiblement dépendante de la distribution d'entrée (collimateurs), la neutralisation de charge d'espace est uniquement un problème pour l'injecteur.





Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

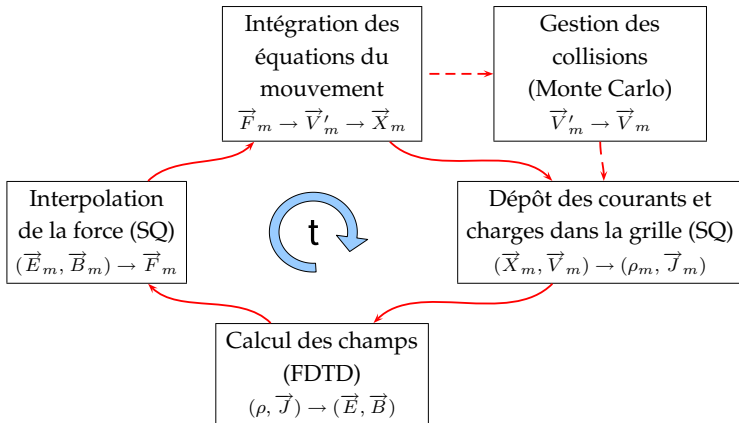
Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC**
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions

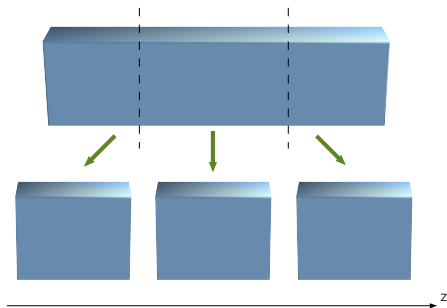
- Modélisation de toute la phase de compensation (transitoire + équilibre).
- Modélisation de:
 - 1 l'interaction faisceau/gaz résiduel,
 - 2 le comportement des particules secondaires,
 - 3 le couplage entre les différentes distributions,
 - 4 la dynamique du faisceau transporté,
 - 5 l'intégration des champs extérieurs,
 - 6 plusieurs espèces.



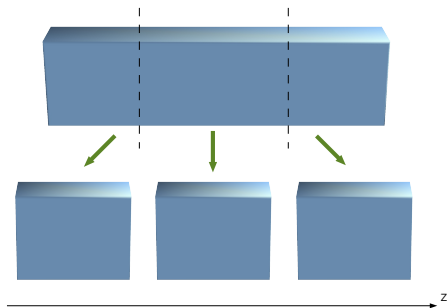
Modélisation par code PIC

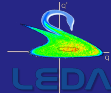


- Découpage longitudinale.
- La communication entre noeuds est assurée par la librairie MPI (Message Parsing Interface).
- Les calculs sont lancés sur DAPHPC (*le dieu de la neutralisation saura remercier les généreux donateurs*).



- Découpage longitudinale.
- La communication entre noeuds est assurée par la librairie MPI (Message Parsing Interface).
- Les calculs sont lancés sur DAPHPC (*le dieu de la neutralisation saura remercier les généreux donateurs*).





Parallélisation du code

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

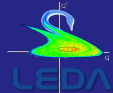
- Découpage longitudinale.
- La communication entre noeuds est assurée par la librairie MPI (Message Parsing Interface).
- Les calculs sont lancés sur DAPHPC (*le dieu de la neutralisation saura remercier les généreux donateurs*).

```
duperrier@daphpc:~$ ssh daphpc
Connection to daphpc closed.
duperrier@saampcc043:~$ ssh daphpc
duperrier@daphpc's password:
Last login: Thu May 15 17:19:51 2008 from saampcc043.extra.cea.fr

-----
* Ganglia : http://daphpc/ganglia/
* Wiki : http://daphpc/wiki/
-----

L'accès non autorisé à cet ordinateur est interdit.
Unauthorized access to this computer is prohibited.
-----

Pour avoir des infos sur daphpc n'oubliez pas de consulter la page suivante
http://www-dapniai.cea.fr/Informatique/Unix/public/daphpc/post_it.php
duperrier@daphpc ~]$
```

Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Glissement
Solénoïde

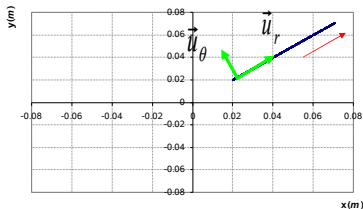
Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

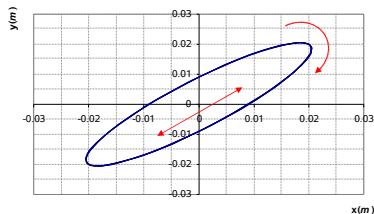
Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces**
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions

(Cas faisceau H^+ , 100 mA, 100 keV, $R_f = 3\text{cm}$)



Cas des ions



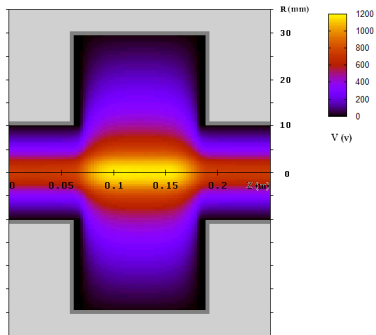
Cas des électrons



Faible probabilité de présence des électrons autour de l'axe (surtout au début)

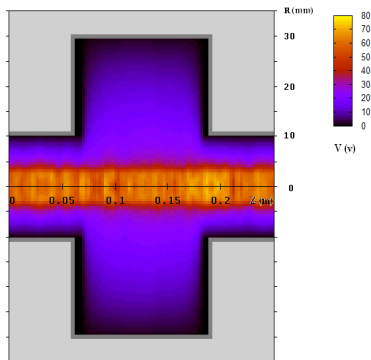
(Cas faisceau H^+ , 100 mA, 100 keV, $R_f = 3\text{cm}$)

- Effet de la charge image sur le faisceau
- La compensation atteinte est la même, seul un délai est induit (poche à e^-).

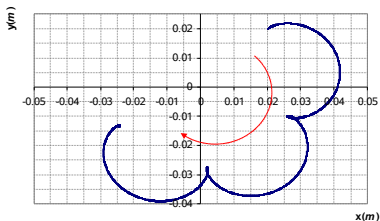


(Cas faisceau H^+ , 100 mA, 100 keV, $R_f = 3\text{cm}$)

- Effet de la charge image sur le faisceau?
- La compensation atteinte est la même, seul un délai est induit (poche à e^-).

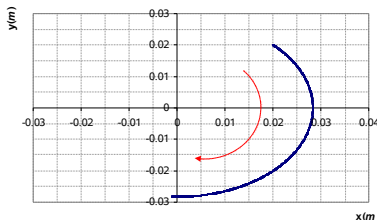


(Cas faisceau H^+ , 100 mA, 100 keV)

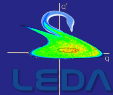


Cas des ions

Les ions ne sont plus éjectés!
Les e^- chauds non plus.



Cas des électrons



Dynamique dans le champ de fuite du solénoïde

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation pour un code PIC

Les secondaires

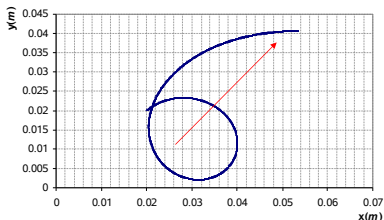
Glissement Solénoïde

Gaz résiduel: nature et pression

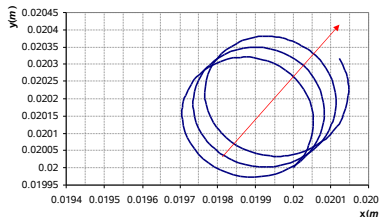
Applications

Conclusions

(Cas faisceau H^+ , 100 mA, 100 keV)



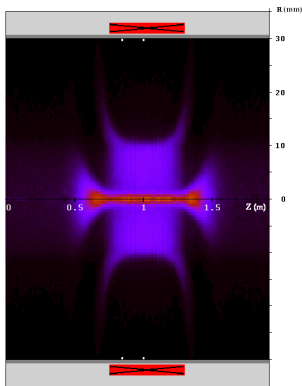
Cas des ions



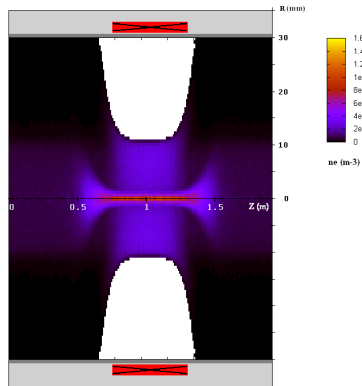
Cas des électrons

**Mouvement le long des lignes de champ:
dérive transverse.**

(Cas faisceau H^+ , 100 mA, 100 keV)

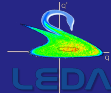


Cas des ions



Cas des électrons

- Miroir magnétique sur les côtés.
- Dérive transverse à l'intérieur.



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression**
- 7 Applications
- 8 Conclusions

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

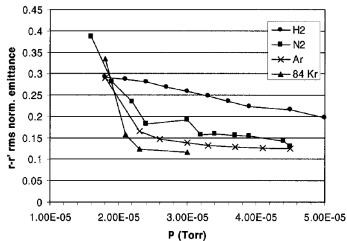
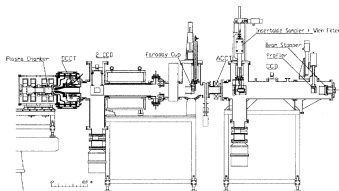
Motivation pour un code PIC

Les secondaires

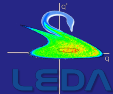
Gaz résiduel: nature et pression

Applications

Conclusions



[Gobin et al, Rev. Sci. Instr.,99]



Distribution au centre pour du D_2 @ $4 \cdot 10^{-5}$ hPa

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

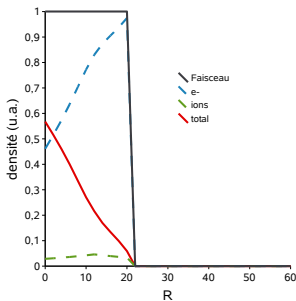
Motivation pour un code PIC

Les secondaires

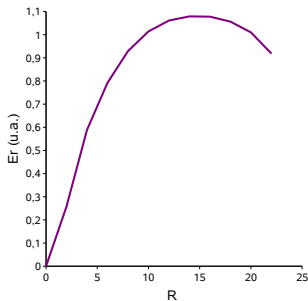
Gaz résiduel: nature et pression

Applications

Conclusions

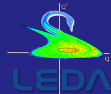


Distributions



Champ électrique

- Absence des ions.
- Distribution totale plus piquée.



Distribution au centre pour un lourd @ 4.10^{-5} hPa

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation pour un code PIC

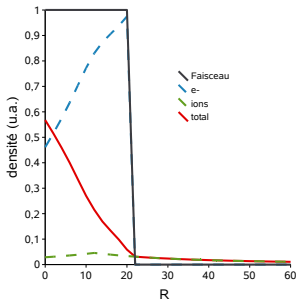
Les secondaires

Gaz résiduel: nature et pression

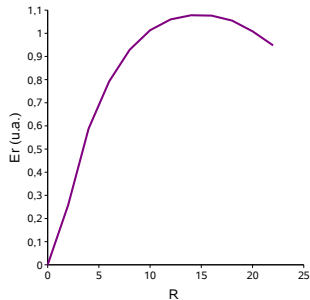
Applications

Conclusions

(Masse de 100, même section efficace que D_2)

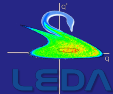


Distributions



Champ électrique

- Absence des ions.
- Distribution totale plus piquée.



Distribution au centre pour D_2 @ $4 \cdot 10^{-4}$ hPa

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

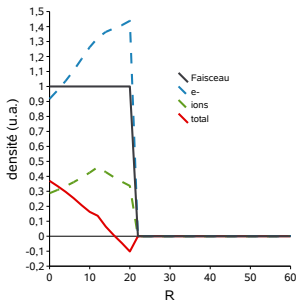
Motivation pour un code PIC

Les secondaires

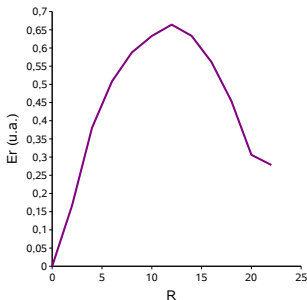
Gaz résiduel: nature et pression

Applications

Conclusions

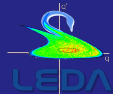


Distributions



Champ électrique

- Présence des ions.
- Distribution totale réduite.



Distribution au centre pour un lourd @ 4.10^{-4} hPa

La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation pour un code PIC

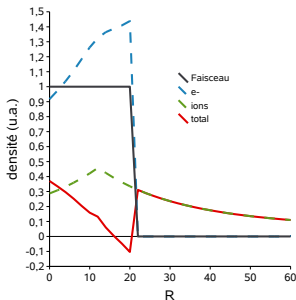
Les secondaires

Gaz résiduel: nature et pression

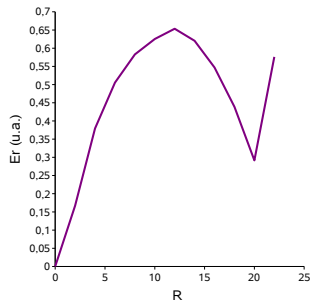
Applications

Conclusions

(Masse de 100, même section efficace que D_2)



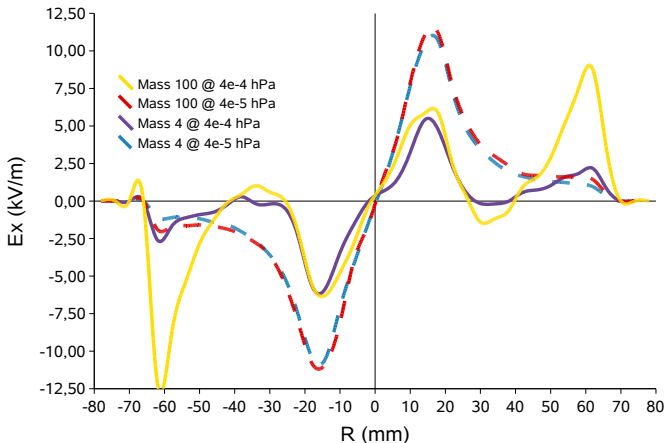
Distributions

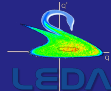


Champ électrique

- Présence des ions dans un domaine plus large radialement.
- Distribution totale réduite et plus étalée.

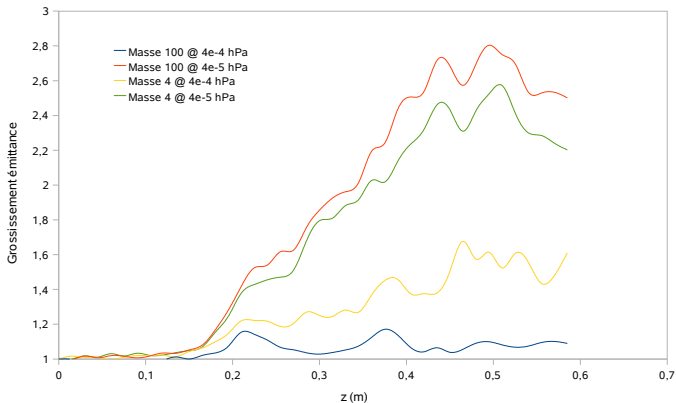
(calcul par code PIC)





Evolution de l'émittance

(calcul par code PIC)



La neutralisation de la charge d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

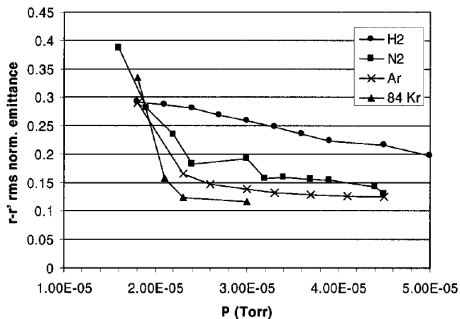
Motivation pour un code PIC

Les secondaires

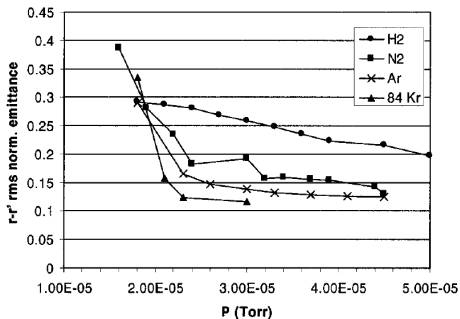
Gaz résiduel: nature et pression

Applications

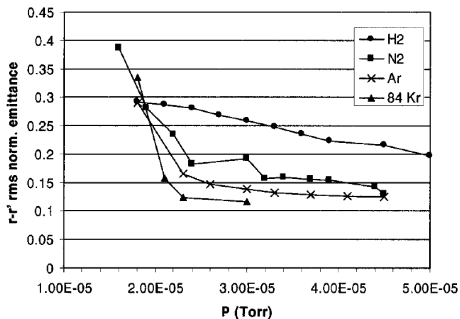
Conclusions



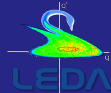
- Amélioration de l'émittance avec l'augmentation du taux de production de paires (pression et/ou section efficace).
- Rendement accru du lourd grâce à une section efficace multipliée par 5 et une masse plus importante.



- Amélioration de l'émittance avec l'augmentation du taux de production de paires (pression et/ou section efficace).
- Rendement accru du lourd grâce à une section efficace multipliée par 5 et une masse plus importante.



- Amélioration de l'émittance avec l'augmentation du taux de production de paires (pression et/ou section efficace).
- Rendement accru du lourd grâce à une section efficace multipliée par 5 et une masse plus importante.



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

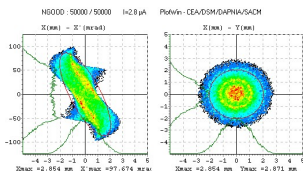
LINAC 4

IPHI

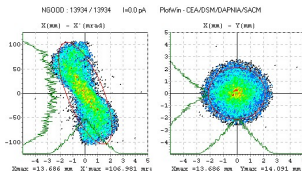
IFMIF

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications**
- 8 Conclusions

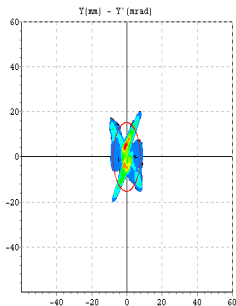


Sortie LBE
sans neutralisation



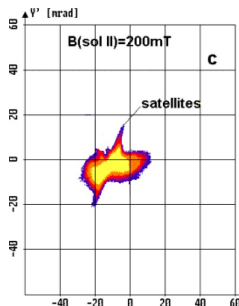
Sortie LBE
avec neutralisation

- La prise en compte de la compensation a induit :
 - une dégradation de l'émittance et une baisse de rendement du RFQ de 6%,
 - la nécessité d'un nouveau réglage.



Simulation

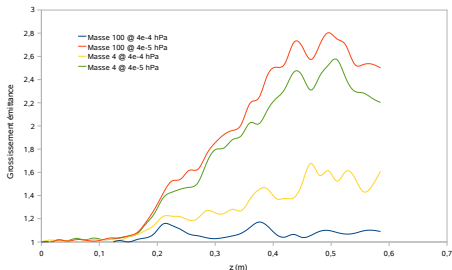
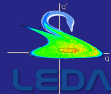
$$\varepsilon_{rms} = 0.41 \pi \cdot \mu\text{m}$$



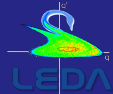
Mesure [Hollinger et al, linac '06]

$$\varepsilon_{rms} = 0.35 \pi \cdot \mu\text{m}$$

- Un bon accord qualitatif.
- L'accord quantitatif est discutable si on tient compte du facteur 10 sur la pression.



- Les specs ne pourront être atteintes avec une pression de quelques 10^{-5} hPa et un gaz support D_2 .
- Optimisation des pressions partielles du D_2 et du Kr en cours .
- Plusieurs limitations à augmenter la pression:
 - l'obtention du vide RFQ ($\sim 10^{-7}$ hPa),
 - la diffusion coulombienne du faisceau sur le gaz,
 - les pertes par recombinaison.



Sommaire

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

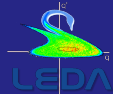
Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

- 1 Les accélérateurs linéaires de haute intensité
- 2 Le mécanisme de la neutralisation
- 3 Critères d'évaluation
- 4 Motivation pour un code PIC
- 5 La dynamique de chacune des espèces
- 6 Gaz résiduel: nature et pression
- 7 Applications
- 8 Conclusions

- La neutralisation permet la focalisation de faisceau dans les LBEs (lentille plasma).
- Son établissement passe par une phase transitoire dont la durée peut poser problème pour les machines pulsées.
- L'étude de la dynamique des particules secondaires montrent que la charge d'espace résiduelle peut induire un grossissement d'émittance conséquent (élément magnétique).
- La partie investigation fondamentale arrive à son terme, nous rentrons dans une phase d'optimisation des paramètres:
 - nature et pressions partielles des gaz,
 - élément magnétique,
 - électrode de nettoyage.



Bon appétit!

La
neutralisation
de la charge
d'espace

R. Duperrier

HPPA

Mécanisme

Critères

Motivation
pour un code
PIC

Les
secondaires

Gaz résiduel:
nature et
pression

Applications

Conclusions

