



Dynamique faisceau dans l'anneau de stockage

Alexis Gamelin¹, Marica Biagini¹, Christelle Bruni¹, Iryna Chaikovska¹,
Sophie Chancé¹, Nicolas Delerue¹, Mohamed El Khaldi¹, Luca Garolfi¹,
Hayg Guler¹, Jacques Haissinski¹, Damien Le Guidec¹, Pierre Lepercq¹,
Alexandre Loulergue², Hugues Monard¹, Harsh Purwar¹, Cynthia
Vallerand¹



¹Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL)

²Synchrotron SOLEIL



Buts de l'étude

Quoi

- Nous cherchons à minimiser la dégradation du faisceau due aux effets collectifs dans l'anneau de stockage de ThomX.

Pourquoi

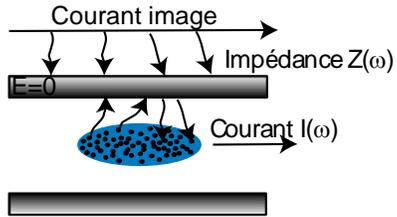
- En l'absence d'amortissement, les dégradations du faisceau entraînent une baisse du flux total et spectral des X.

Comment

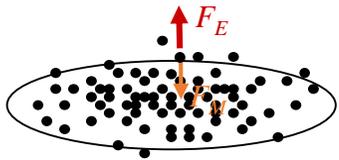
- En comprenant et en simulant ces effets collectifs et en utilisant des stratégies de minimisation de ces effets.

Effets collectifs

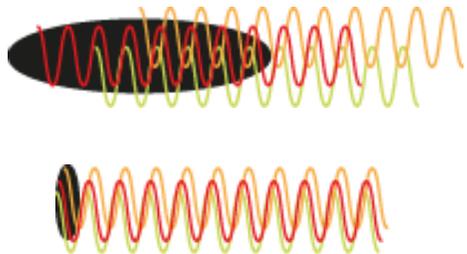
- Champ de sillage et impédances (RW and géométrique)



- Charge d'espace (SC)



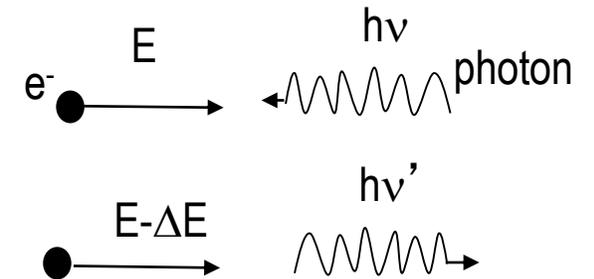
- Rayonnement synchrotron cohérent (CSR)



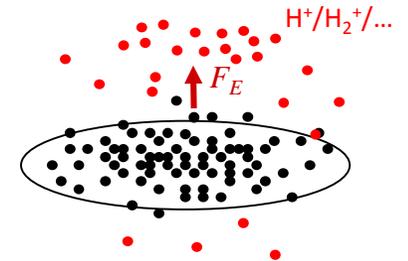
- Diffusion intra-faisceau (IBS) / Touschek



- Rétrodiffusion Compton (CBS)

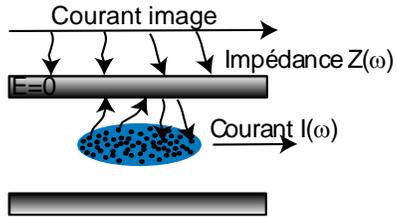


- Nuage d'ions

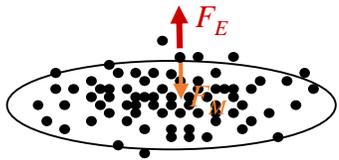


Effets collectifs

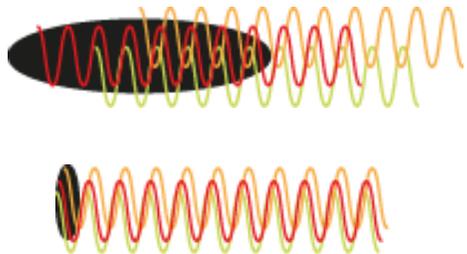
- Champ de sillage et impédances (RW and géométrique)



- Charge d'espace (SC)



- Rayonnement synchrotron cohérent (CSR)

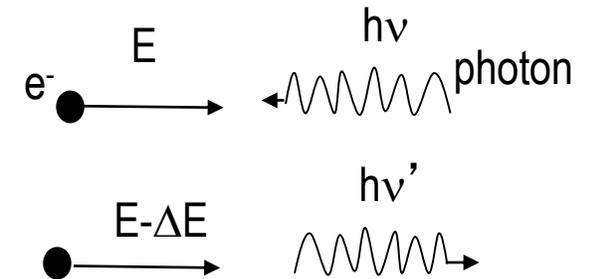


Limite la durée de vie

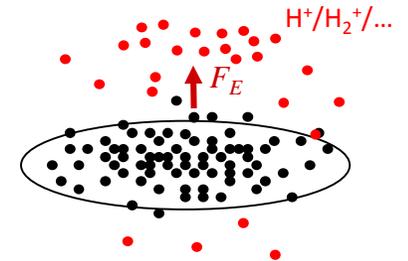
- Diffusion intra-faisceau (IBS) / Touschek



- Rétrodiffusion Compton (CBS)

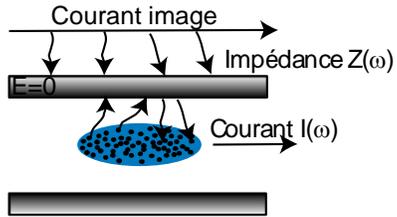


- Nuage d'ions

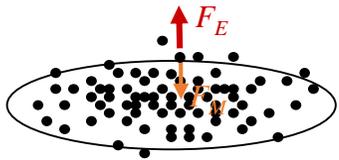


Effets collectifs

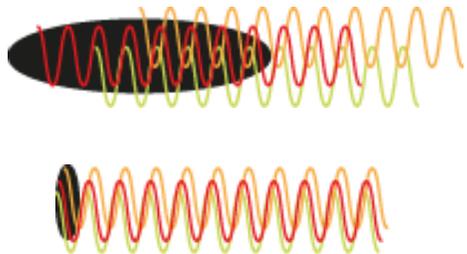
- Champ de sillage et impédances (RW and géométrique)



- Charge d'espace (SC)



- Rayonnement synchrotron cohérent (CSR)



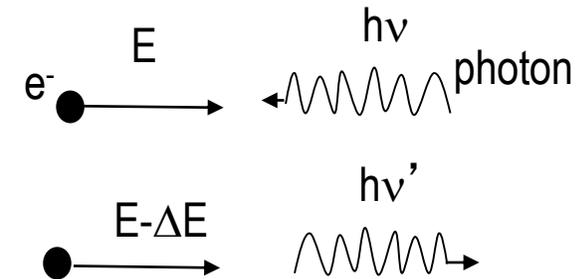
Limite la durée de vie

Dégrade l'émittance et/ou l'e-spread

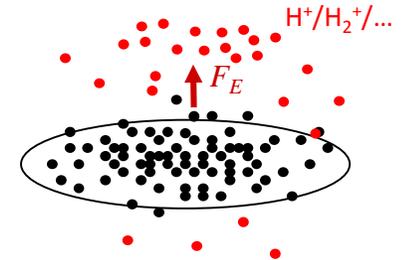
- Diffusion intra-faisceau (IBS) / Touschek



- Rétrodiffusion Compton (CBS)

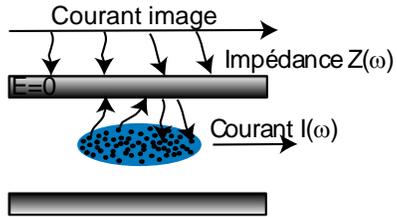


- Nuage d'ions

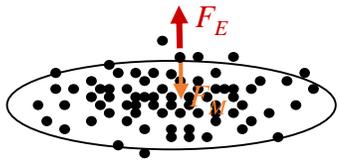


Effets collectifs

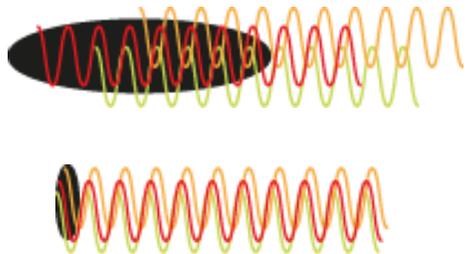
- Champ de sillage et impédances (RW and géométrique)



- Charge d'espace (SC)



- Rayonnement synchrotron cohérent (CSR)



Limite la durée de vie

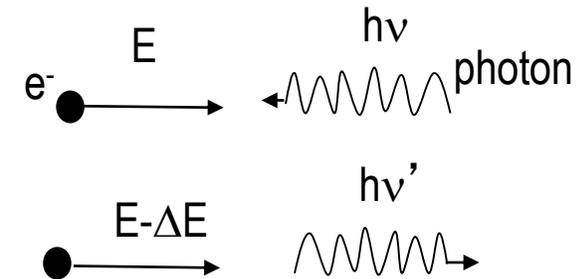
Dégrade l'émittance et/ou l'e-spread

Peut provoquer des instabilités

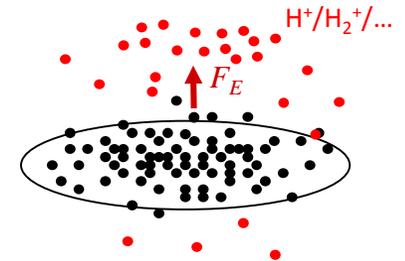
- Diffusion intra-faisceau (IBS) / Touschek



- Rétrodiffusion Compton (CBS)

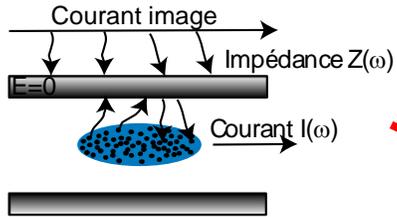


- Nuage d'ions

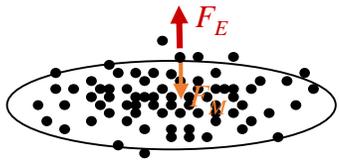


Effets collectifs

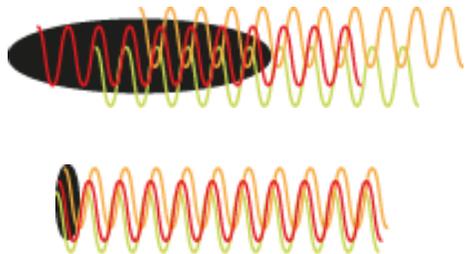
- Champ de sillage et impédances (RW and géométrique)



- Charge d'espace (SC)



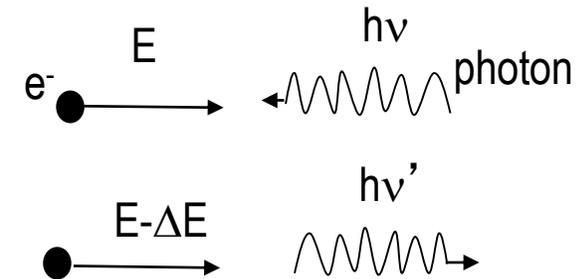
- Rayonnement synchrotron cohérent (CSR)



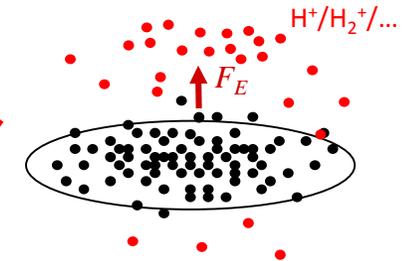
- Diffusion intra-faisceau (IBS)



- Rétrodiffusion Compton (CBS)



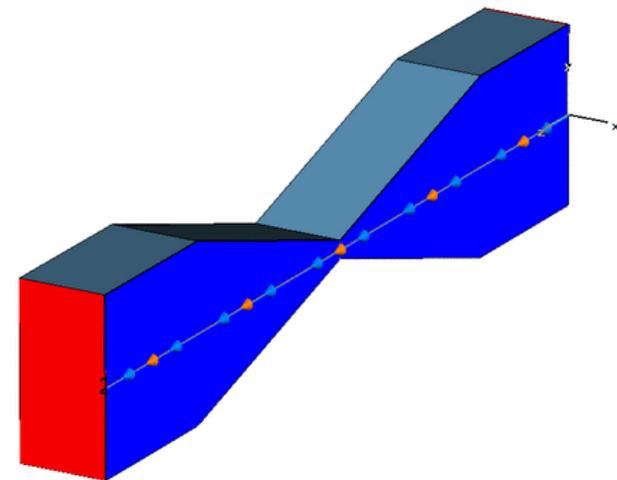
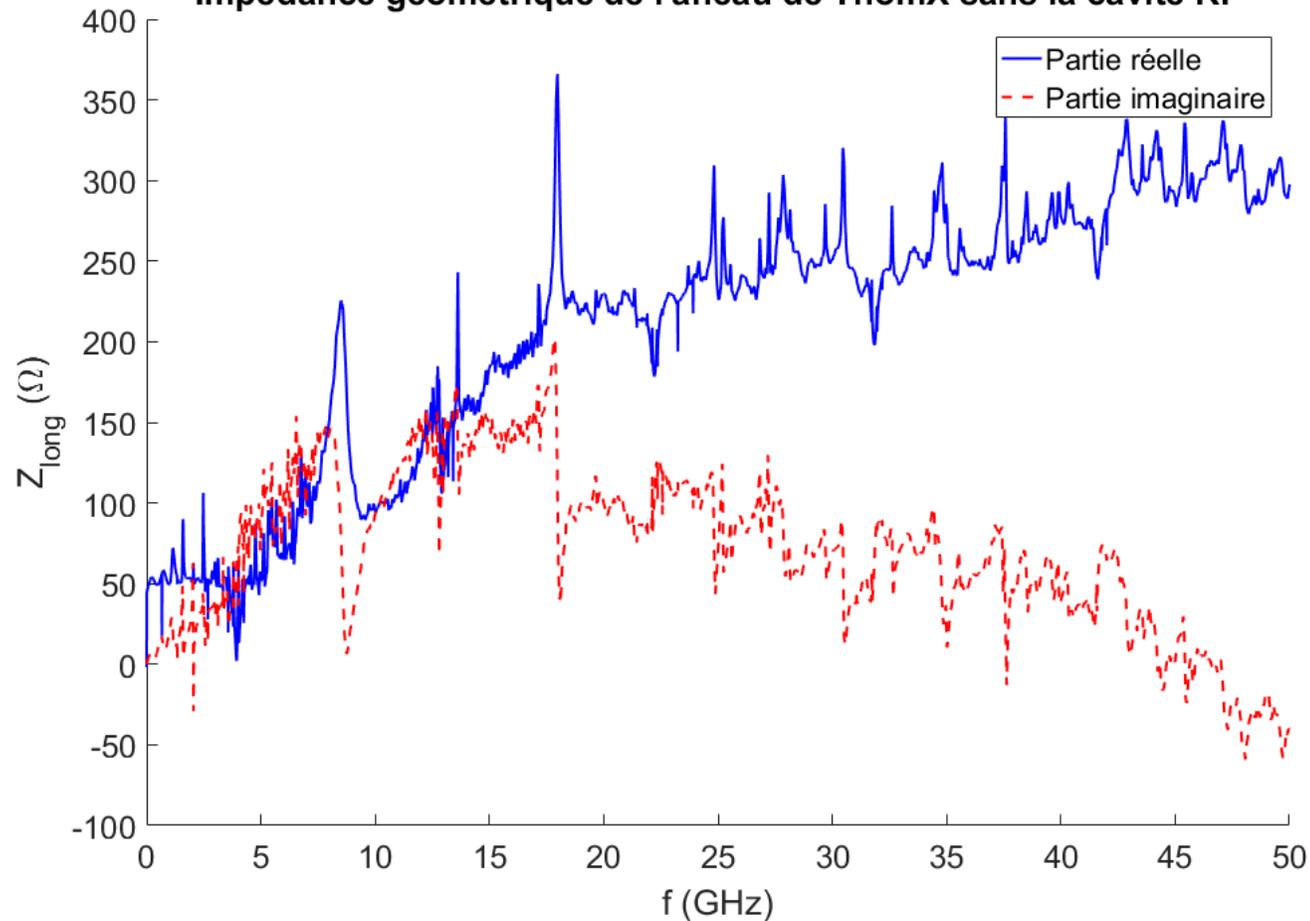
- Nuage d'ions



**Présentation d'aujourd'hui
(uniquement 15 min ...)**

Impédance géométrique

Impédance géométrique de l'anneau de ThomX sans la cavité RF

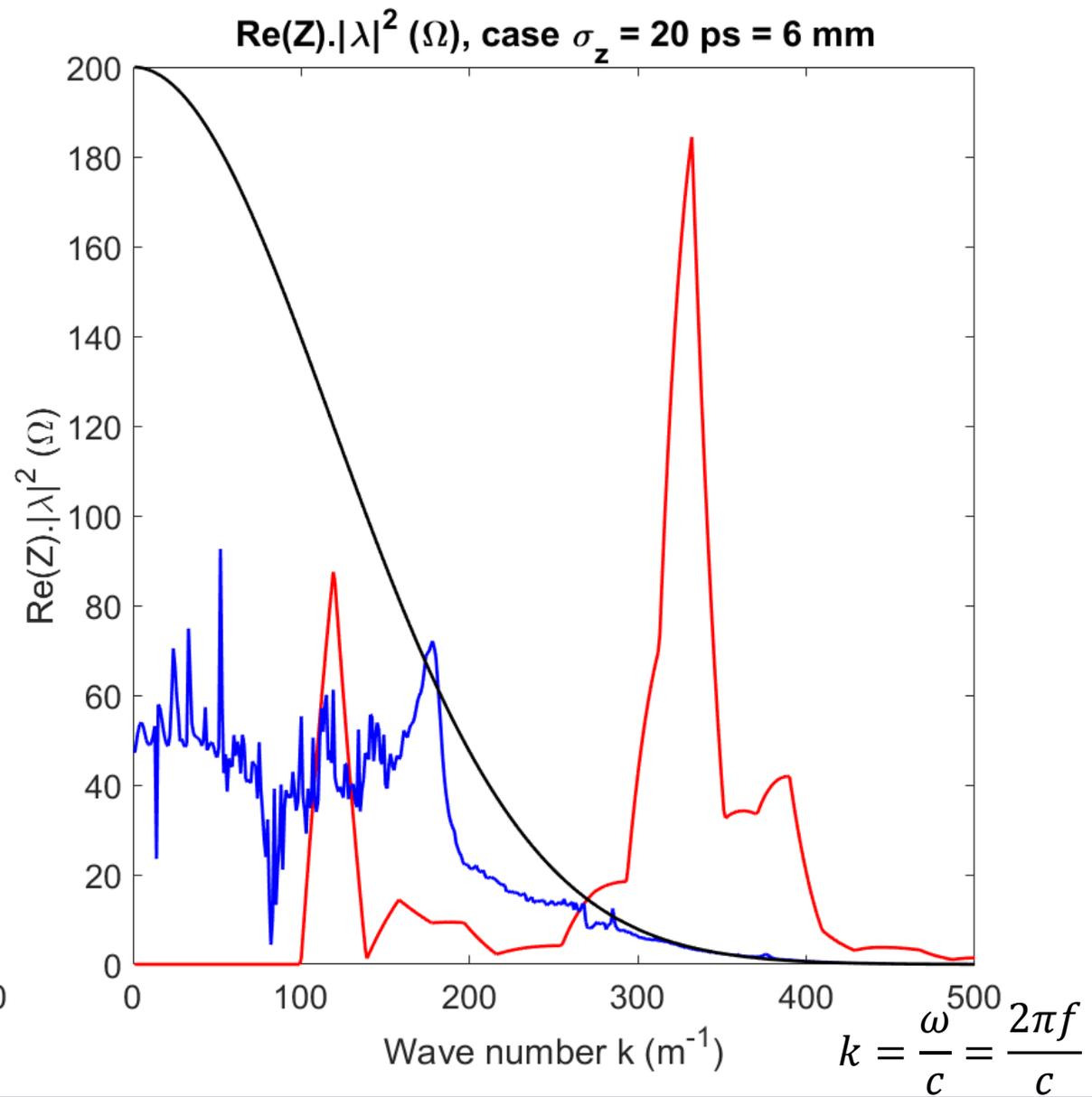
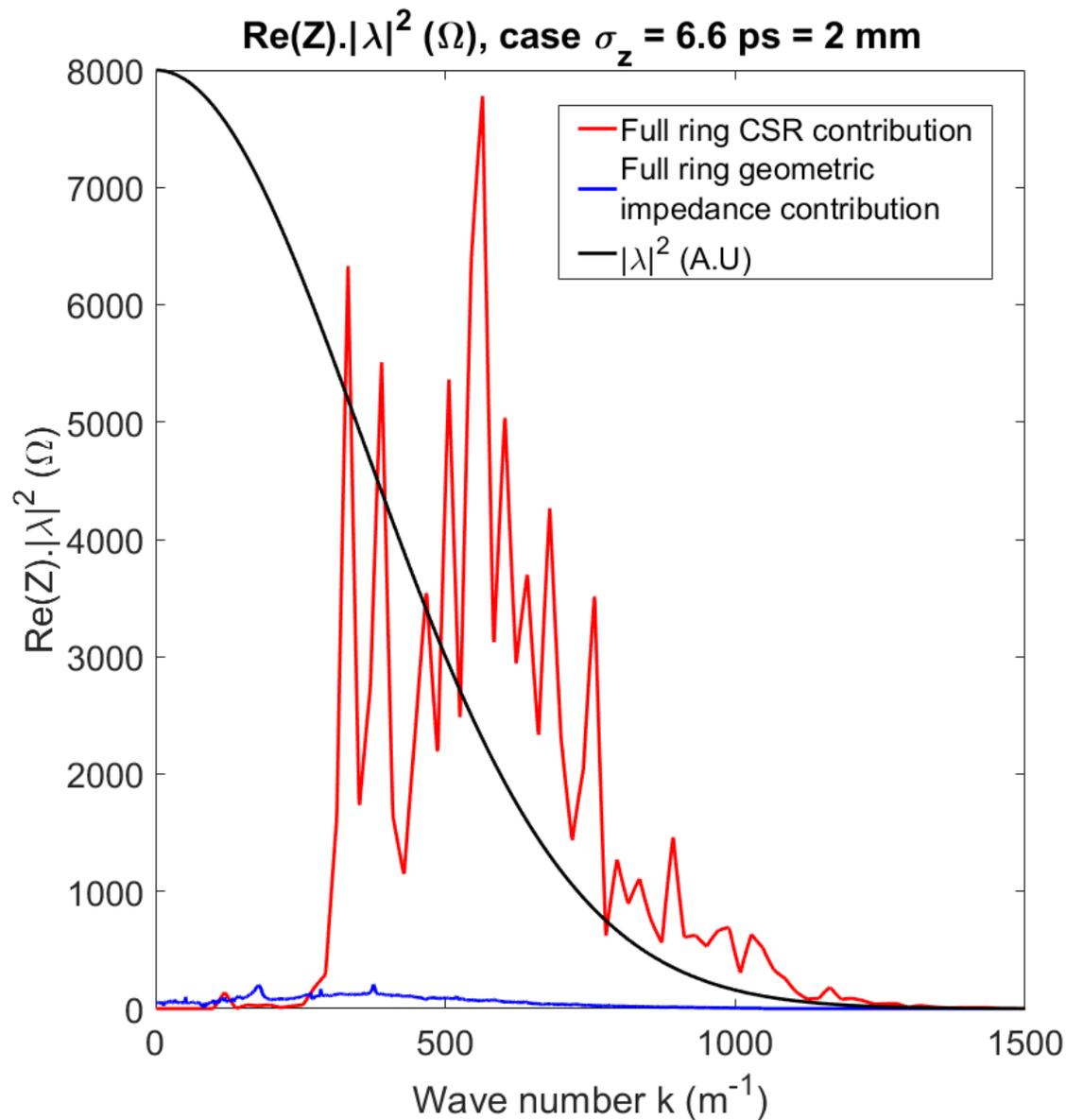


Profil du faisceau en fréquence

Energie totale perdue par paquet :

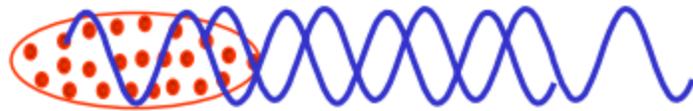
$$\Delta E = -\frac{e^2}{2\pi} \int \left| \hat{\lambda}(\omega) \right|^2 \text{Re} [Z_{\parallel}(\omega)] d\omega$$

Impédance géométrique / Impédance CSR



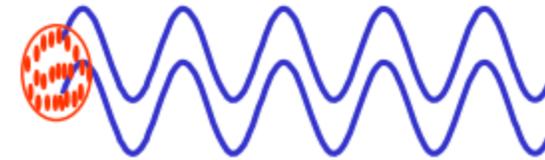
Coherent Synchrotron Radiation (CSR)

incoherent emission

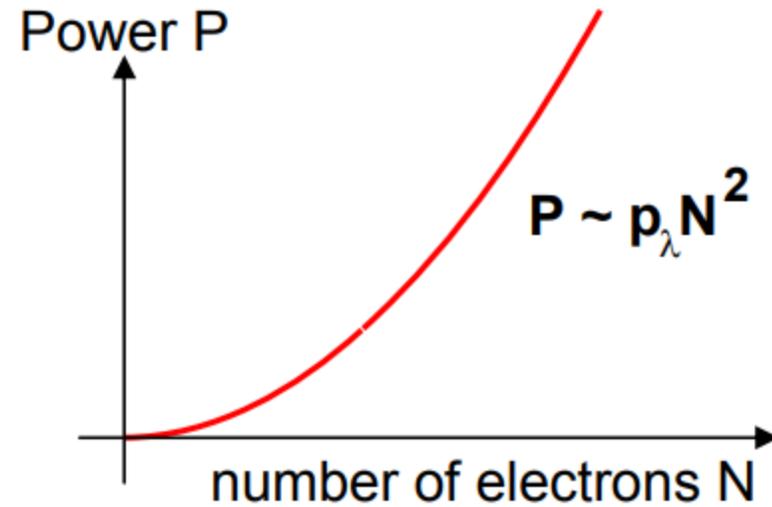
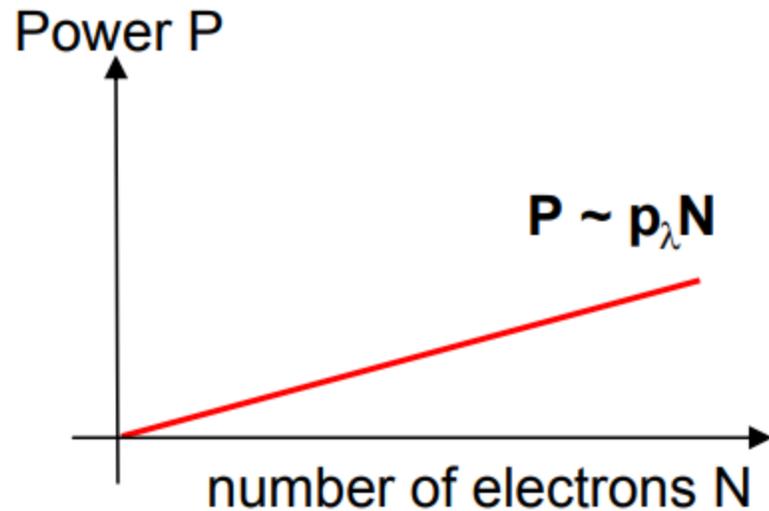


long bunch* $\sigma > \lambda$

coherent emission



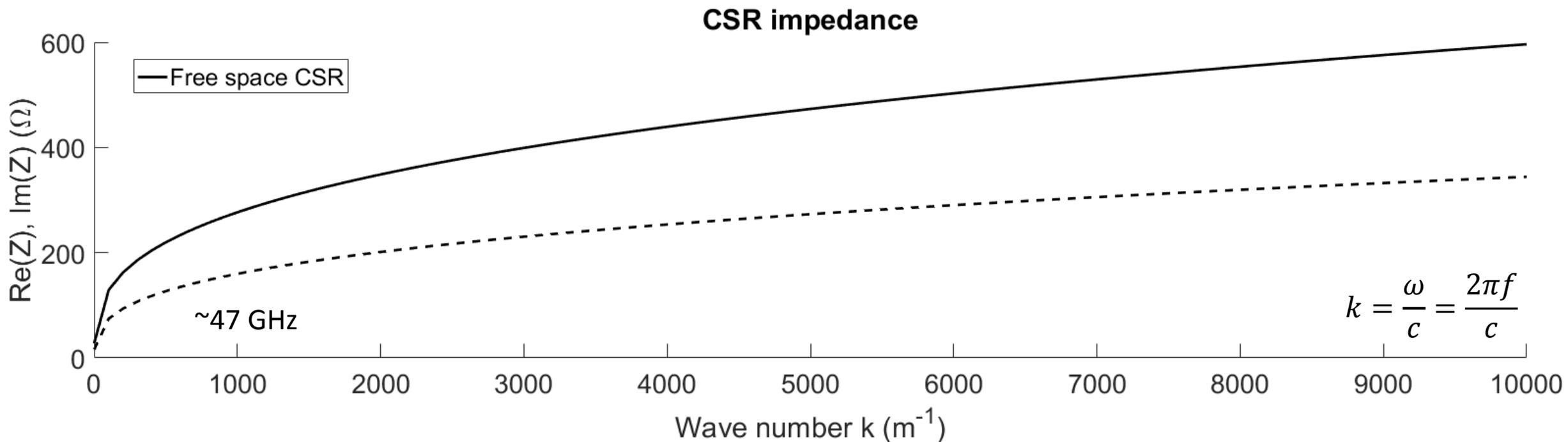
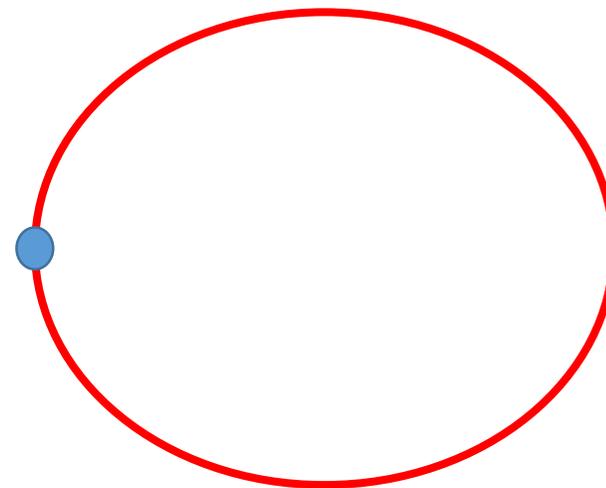
short bunch $\sigma < \lambda$



Modèles usuels pour le CSR

- Impédance CSR du vide
- Impédance CSR de plaques parallèles

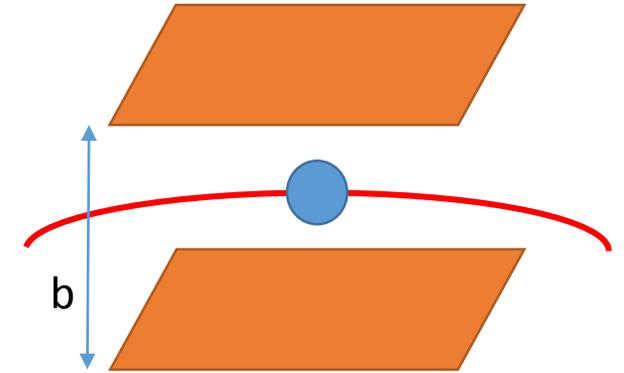
Pour une charge ponctuelle se déplaçant dans le vide sur un cercle de rayon R, l'impédance en régime permanent est donnée par :



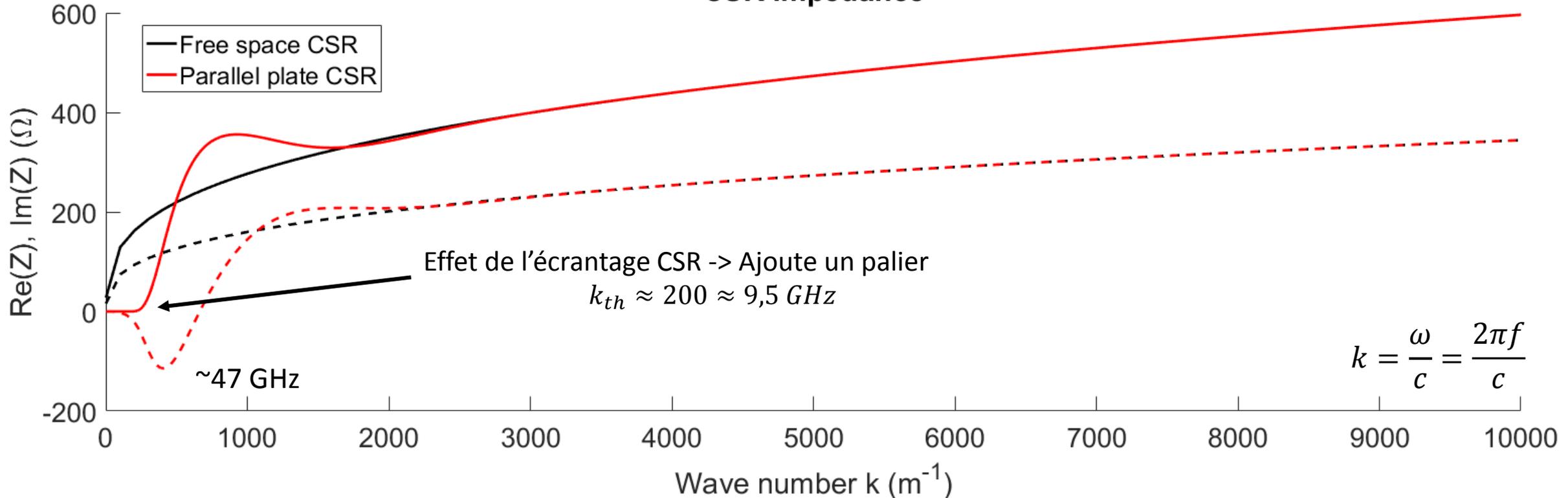
Modèles usuels pour le CSR

- Impédance CSR du vide
- **Impédance CSR de plaques parallèles**

Pour une charge ponctuelle se déplaçant entre deux plaques conductrices dans le plan horizontal sur un cercle de rayon R, l'impédance en régime permanent est donnée par :



CSR impedance



Modèles usuels pour le CSR

Ces modèles analytiques sont très utiles car général mais ils négligent toute une série d'effets qui peuvent avoir un impact :

- Effets transitoires  Dans une machine réelle, il y a des sections droites entre les dipôles. On n'est pas dans le cas d'un régime permanent de rotation autour d'un axe
- Taille transverse du faisceau
- Ecrantage transverse
- Résonance des champs CSR dans un dipôle
- Interférences entre les champs CSR

Modèles usuels pour le CSR

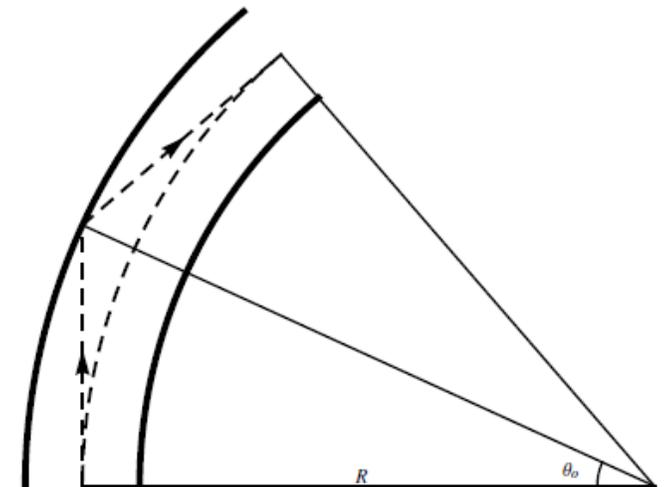
Ces modèles analytiques sont très utiles car général mais ils négligent toute une série d'effets qui peuvent avoir un impact :

- Effets transitoires  Dans une machine réelle, il y a des sections droites entre les dipôles. On n'est pas dans le cas d'un régime permanent de rotation autour d'un axe
- Taille transverse du faisceau  Le faisceau n'est pas infiniment fin en transverse
- Ecrantage transverse
- Résonance du champ CSR dans un dipôle
- Interférences entre les champs CSR

Modèles usuels pour le CSR

Ces modèles analytiques sont très utiles car général mais ils négligent toute une série d'effets qui peuvent avoir un impact :

- Effets transitoires → Dans une machine réelle, il y a des sections droites entre les dipôles. On n'est pas dans le cas d'un régime permanent de rotation autour d'un axe
- Taille transverse du faisceau → Le faisceau n'est pas infiniment fin en transverse
- Ecrantage transverse → Réflections possibles des champs CSR sur la chambre à vide du faisceau pouvant provoquer des interactions tête-queue ou queue-tête
- Résonance des champs CSR dans un dipôle
- Interférences entre les champs CSR



Modèles usuels pour le CSR

Ces modèles analytiques sont très utiles car général mais ils négligent toute une série d'effets qui peuvent avoir un impact :

- Effets transitoires  Dans une machine réelle, il y a des sections droites entre les dipôles. On n'est pas dans le cas d'un régime permanent de rotation autour d'un axe
- Taille transverse du faisceau  Le faisceau n'est pas infiniment fin en transverse
- Ecrantage transverse  Réflections possibles des champs CSR sur la chambre à vide du faisceau pouvant provoquer des interactions tête-queue ou queue-tête
- Résonance des champs CSR dans un dipôle  Certains modes peuvent être excités par le faisceau et dominer l'impédance CSR
- Interférences entre les champs CSR

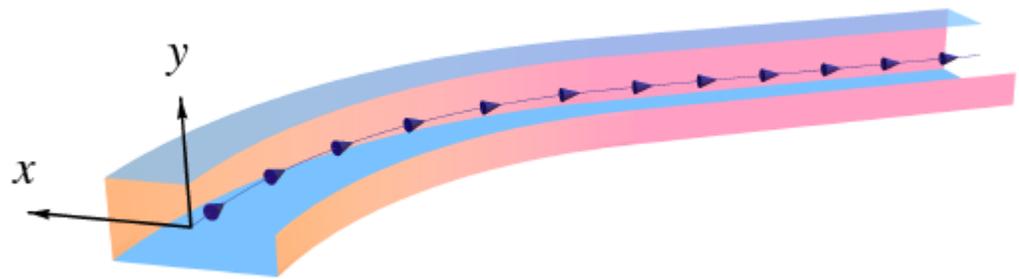
Modèles usuels pour le CSR

Ces modèles analytiques sont très utiles car général mais ils négligent toute une série d'effets qui peuvent avoir un impact :

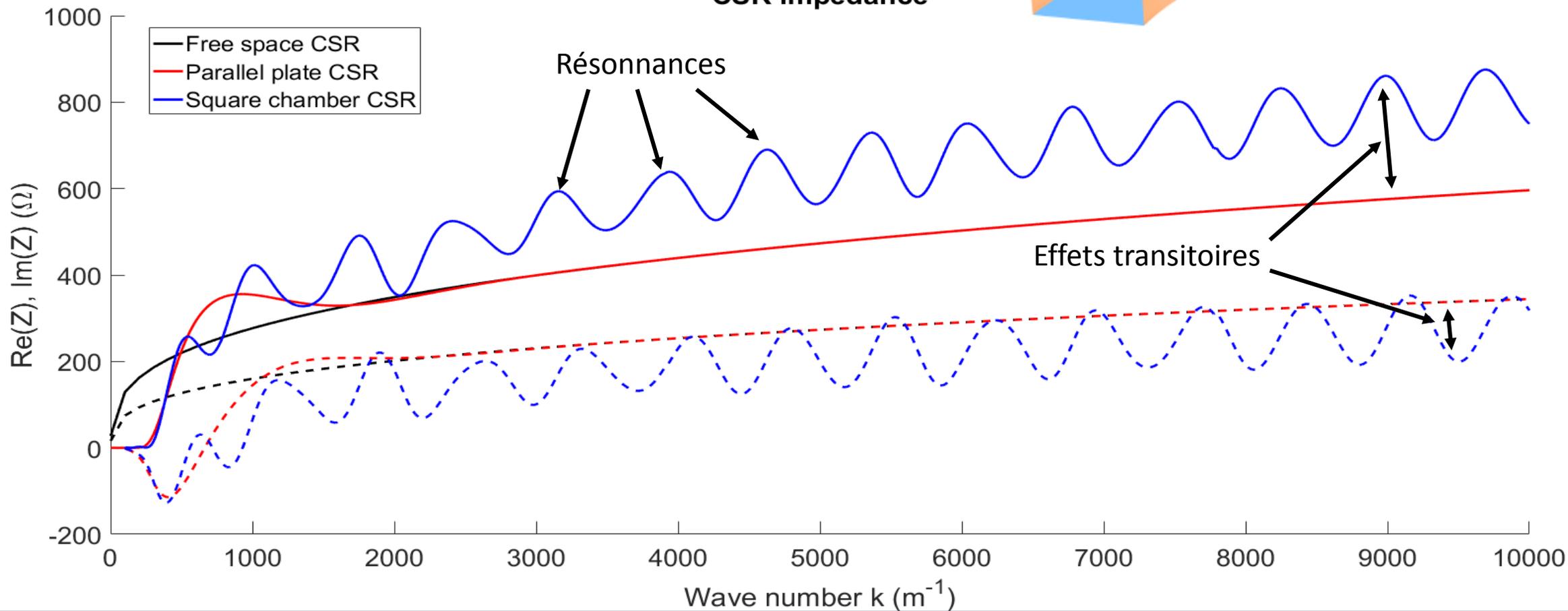
- Effets transitoires  Dans une machine réelle, il y a des sections droites entre les dipôles. On n'est pas dans le cas d'un régime permanent de rotation autour d'un axe
- Taille transverse du faisceau  Le faisceau n'est pas infiniment fin en transverse
- Ecrantage transverse  Réflections possibles des champs CSR sur la chambre à vide du faisceau pouvant provoquer des interactions tête-queue ou queue-tête
- Résonance des champs CSR dans un dipôle  Certains modes peuvent être excités par le faisceau et dominer l'impédance CSR
- Interférences entre les champs CSR  Les champs CSR émis dans chaque dipôle peuvent interagir et interférer

Modélisation numérique du CSR avec CSRZ (Demin Zhou)

Intégration numérique des équations de Maxwell le long d'une trajectoire arbitraire pour une chambre à vide rectangulaire :

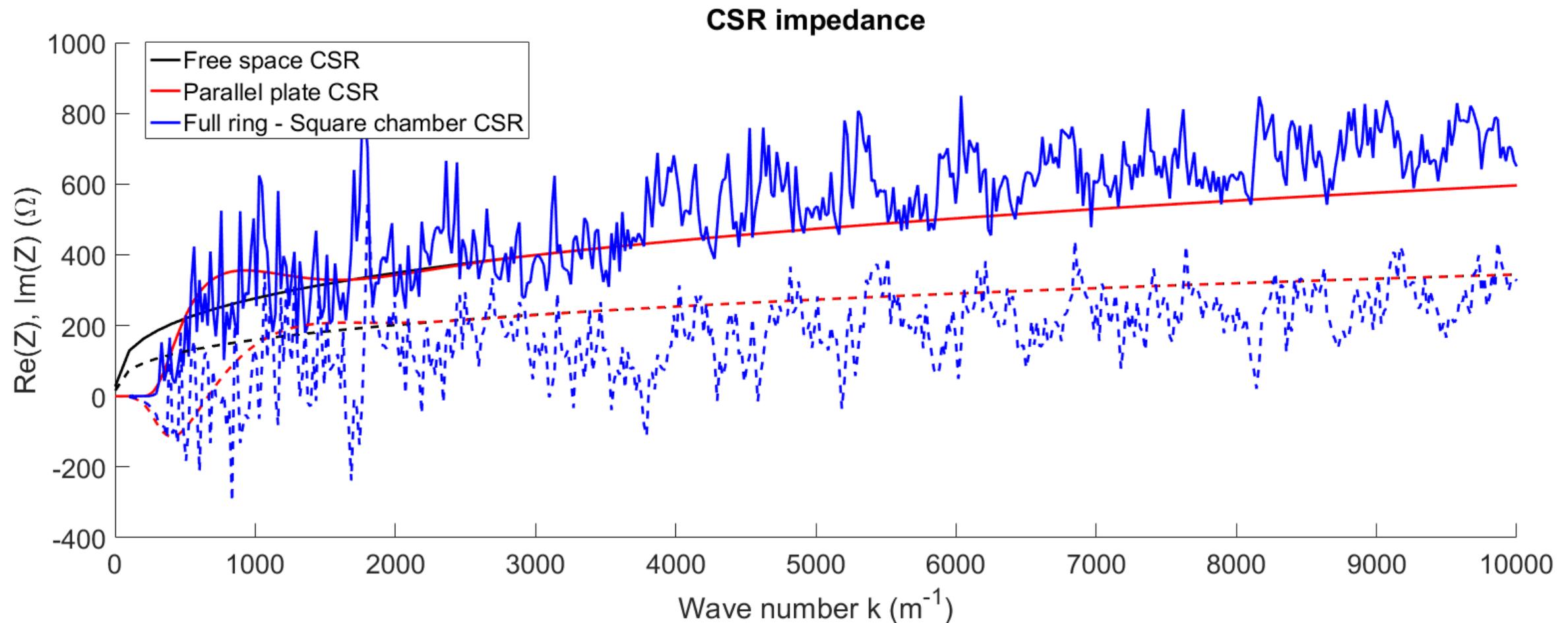


CSR impedance



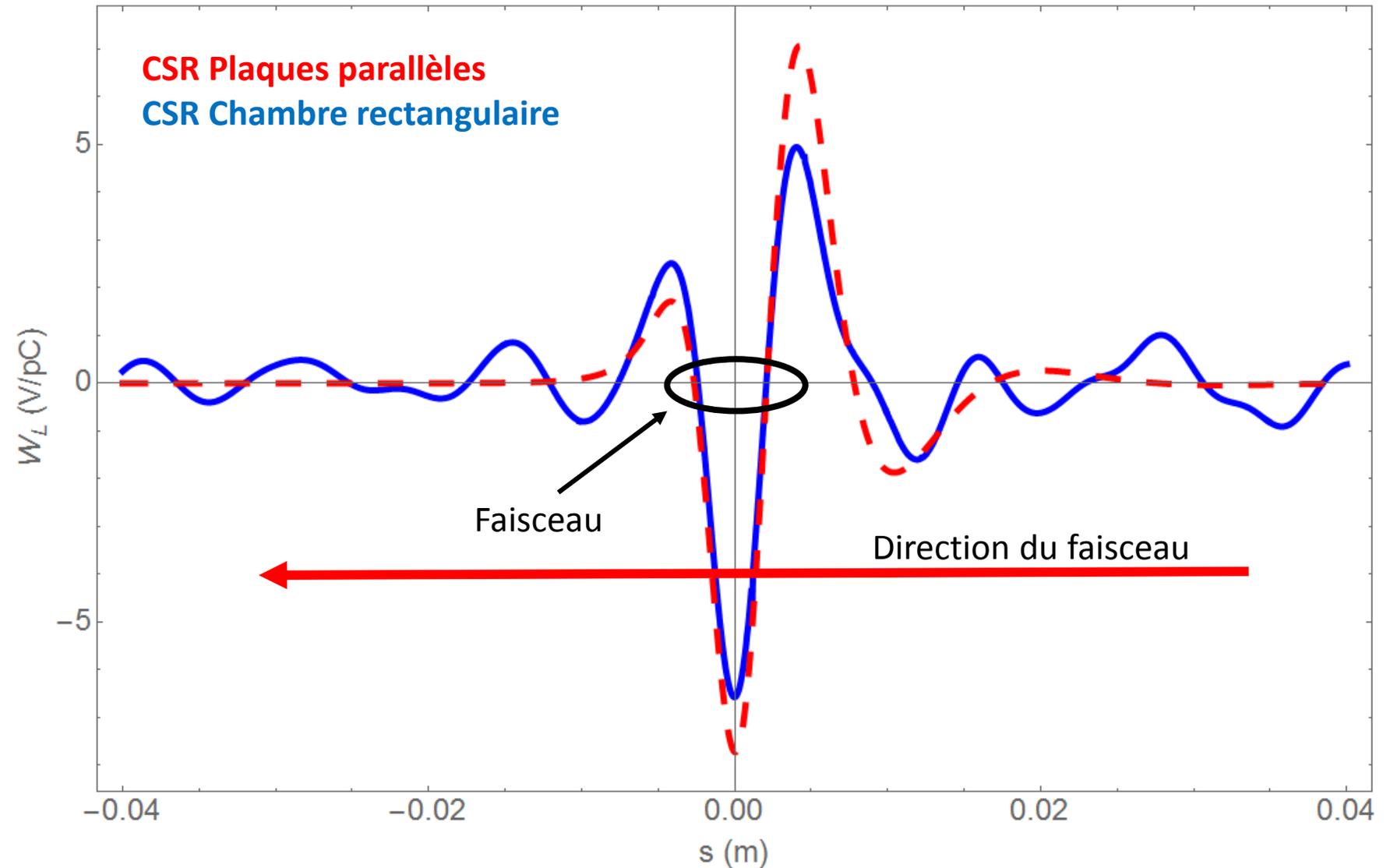
Modélisation numérique du CSR avec CSRZ (Demin Zhou)

Impédance normalisée par le nombre de dipôles pour comparaison :



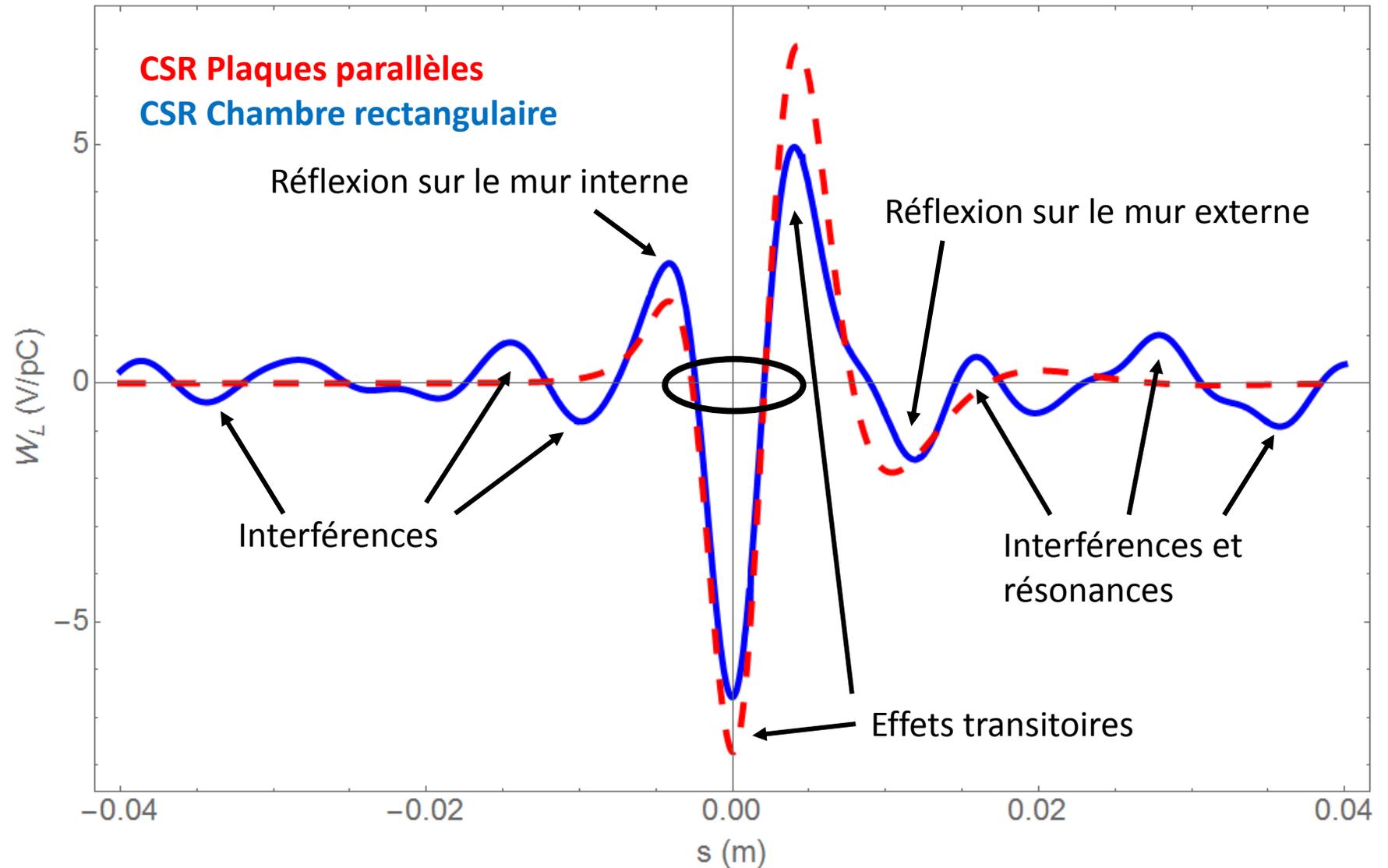
Modélisation numérique du CSR avec CSRZ (Demin Zhou)

Pour l'anneau complet et :
 $\sigma_z = 2 \text{ mm} = 6,6 \text{ ps}$



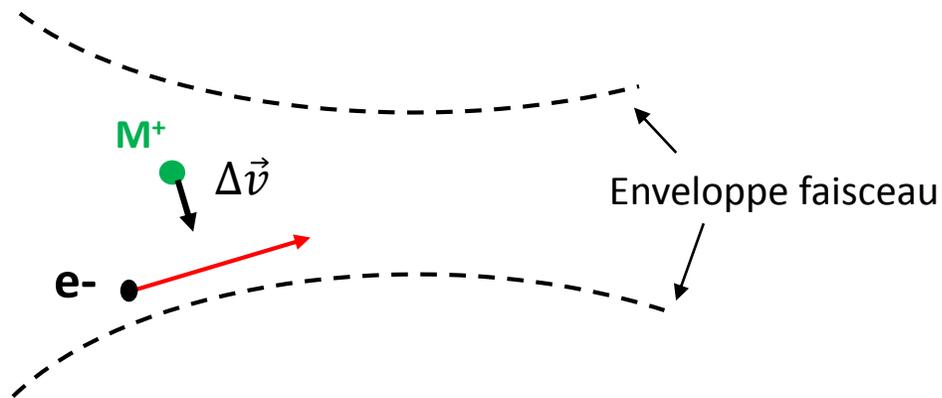
Modélisation numérique du CSR avec CSRZ (Demin Zhou)

Pour l'anneau complet et :
 $\sigma_z = 2 \text{ mm} = 6,6 \text{ ps}$



L'interaction ion-faisceau

- Les molécules résiduelles du vide sont ionisées par le passage du faisceau.
- Un ion va subir une déflexion de vitesse $\Delta\vec{v}$ lors de chacune de ses interactions avec le faisceau.
- L'ion va alors effectuer de très fortes oscillations transverses de part et d'autre de l'axe du faisceau.
- Mais il va aussi subir des déflexions longitudinales qui peuvent s'accumuler sur des milliers de tours.



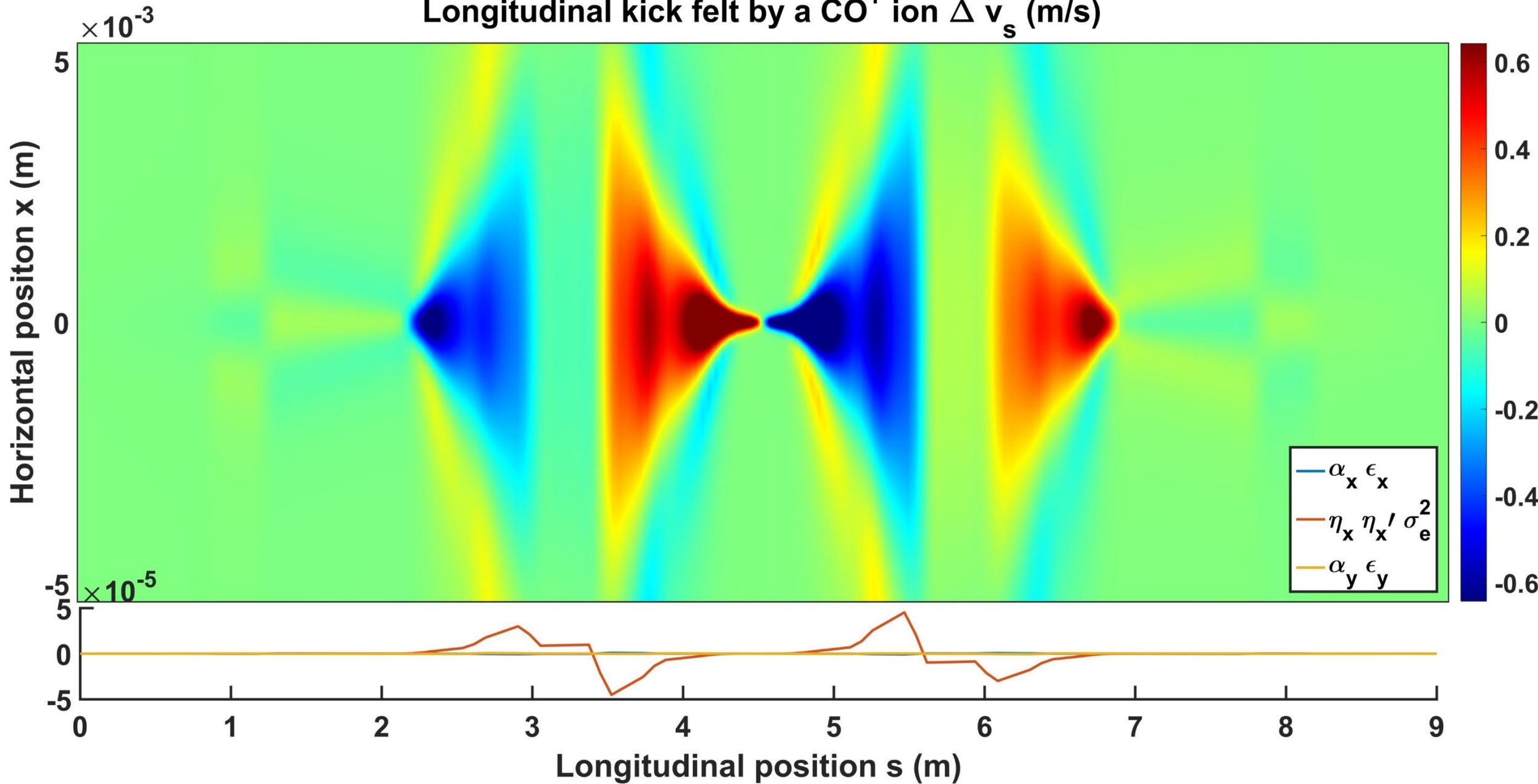
Modélisation de l'interaction ion-faisceau:

- Bassetti-Erskine¹ pour la dynamique transverse
- Sagan² pour la dynamique longitudinale

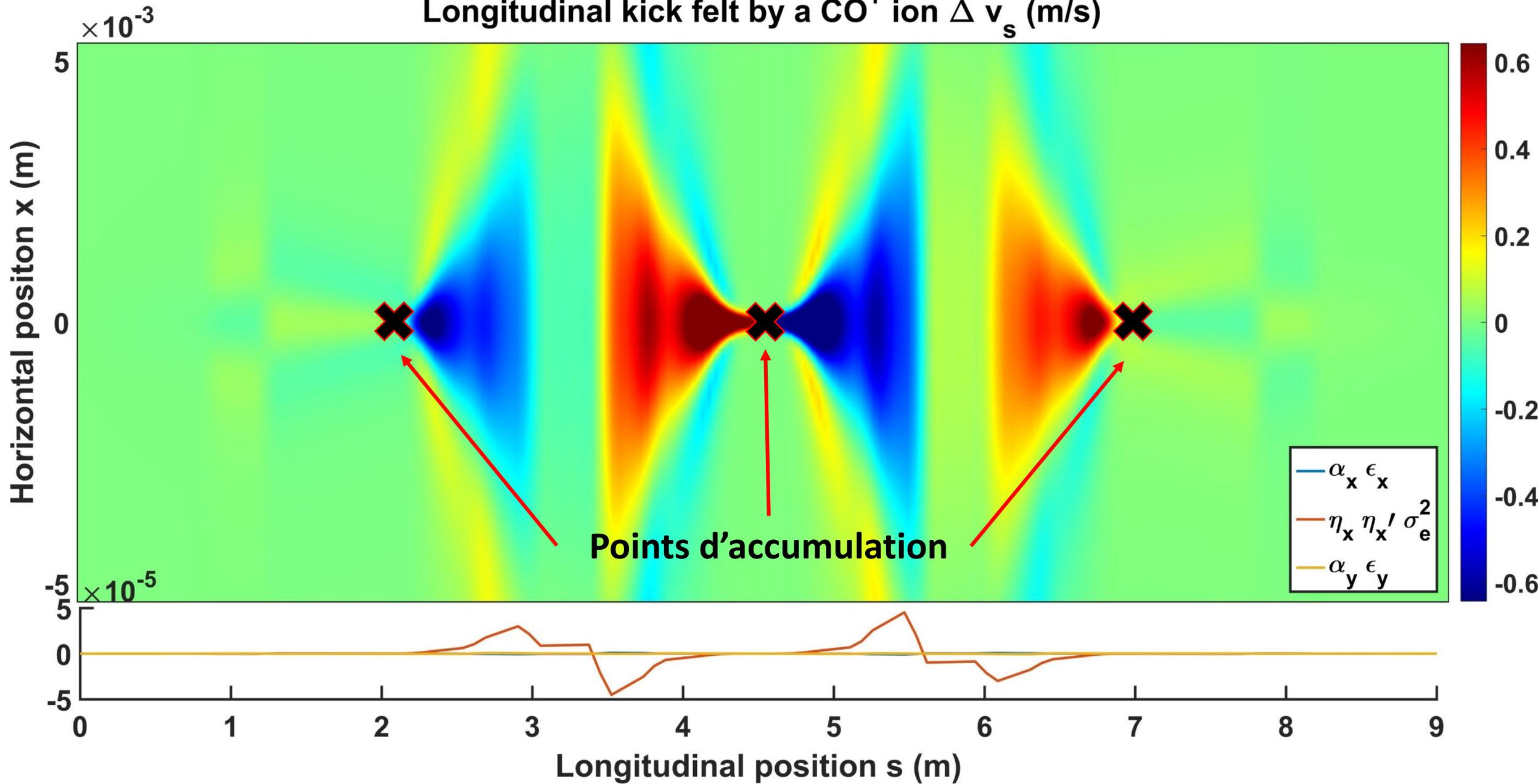
$$\Delta v_s = (-\alpha_x \epsilon_x + \eta \eta' \sigma_\epsilon^2) \frac{\partial \Delta_x}{\partial x} - \alpha_y \epsilon_y \frac{\partial \Delta_y}{\partial y}$$

La dynamique des ions est totalement déterminée par l'optique et le design de la maille

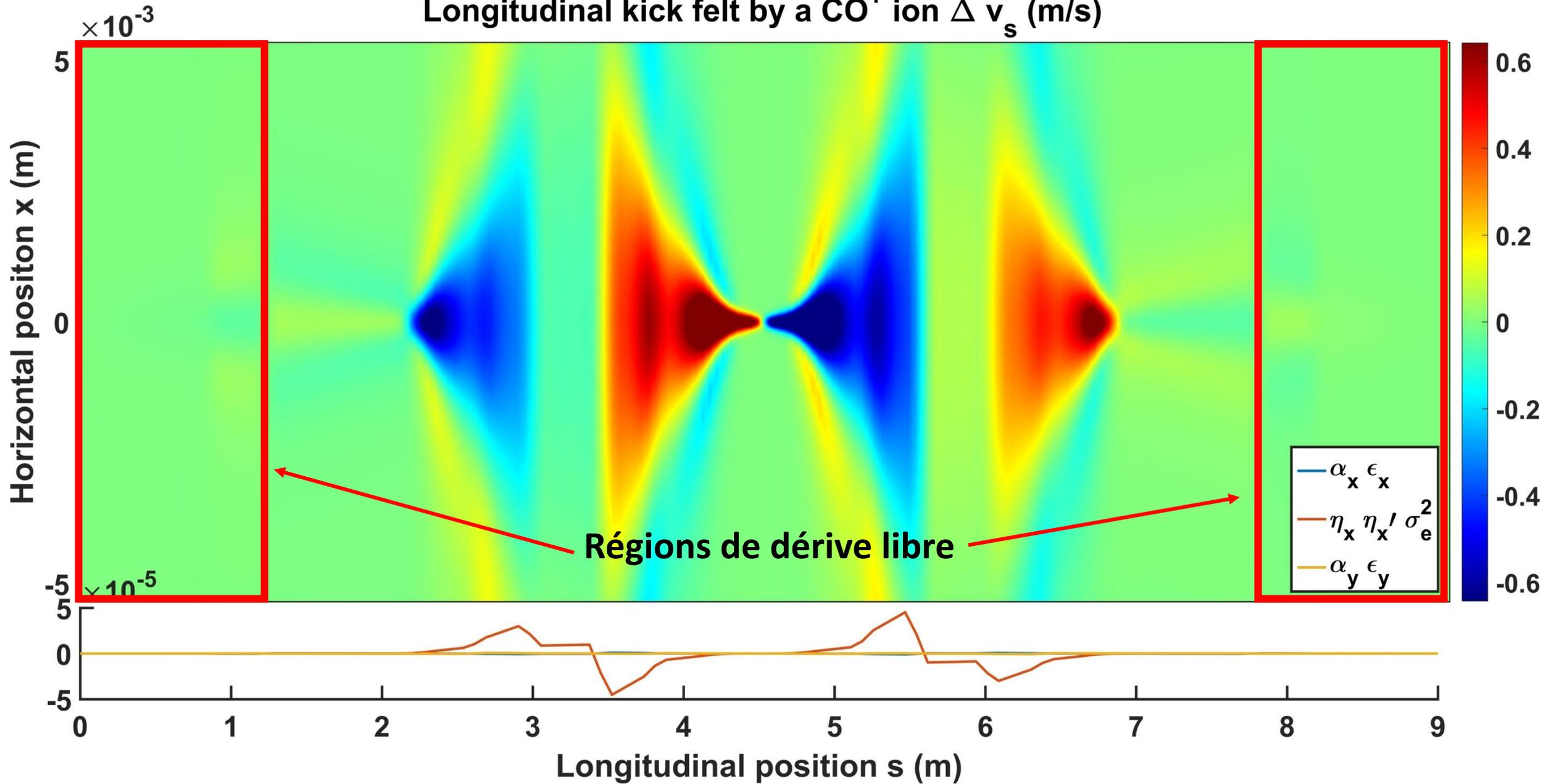
Longitudinal kick felt by a CO^+ ion Δv_s (m/s)



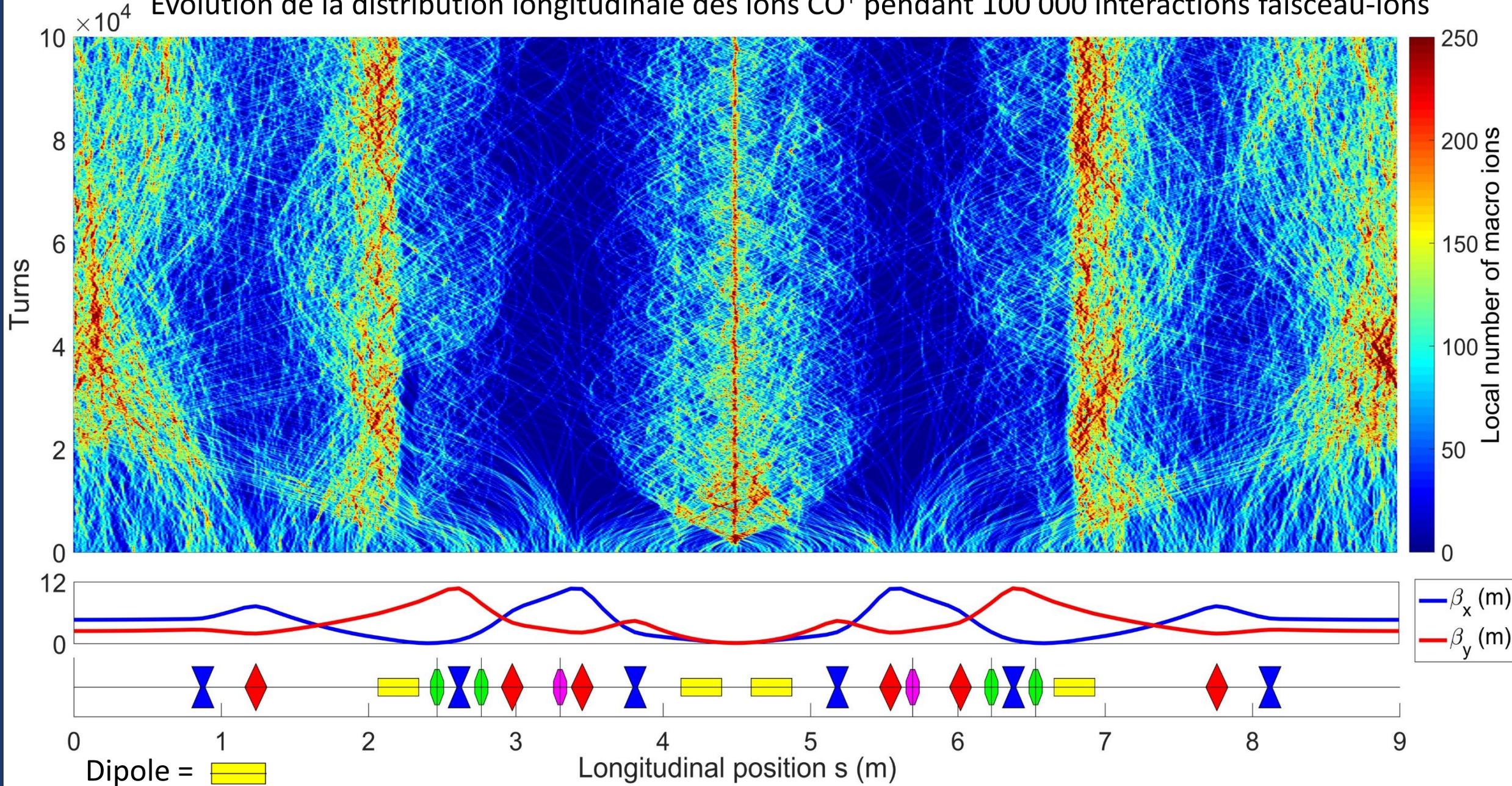
Longitudinal kick felt by a CO^+ ion Δv_s (m/s)



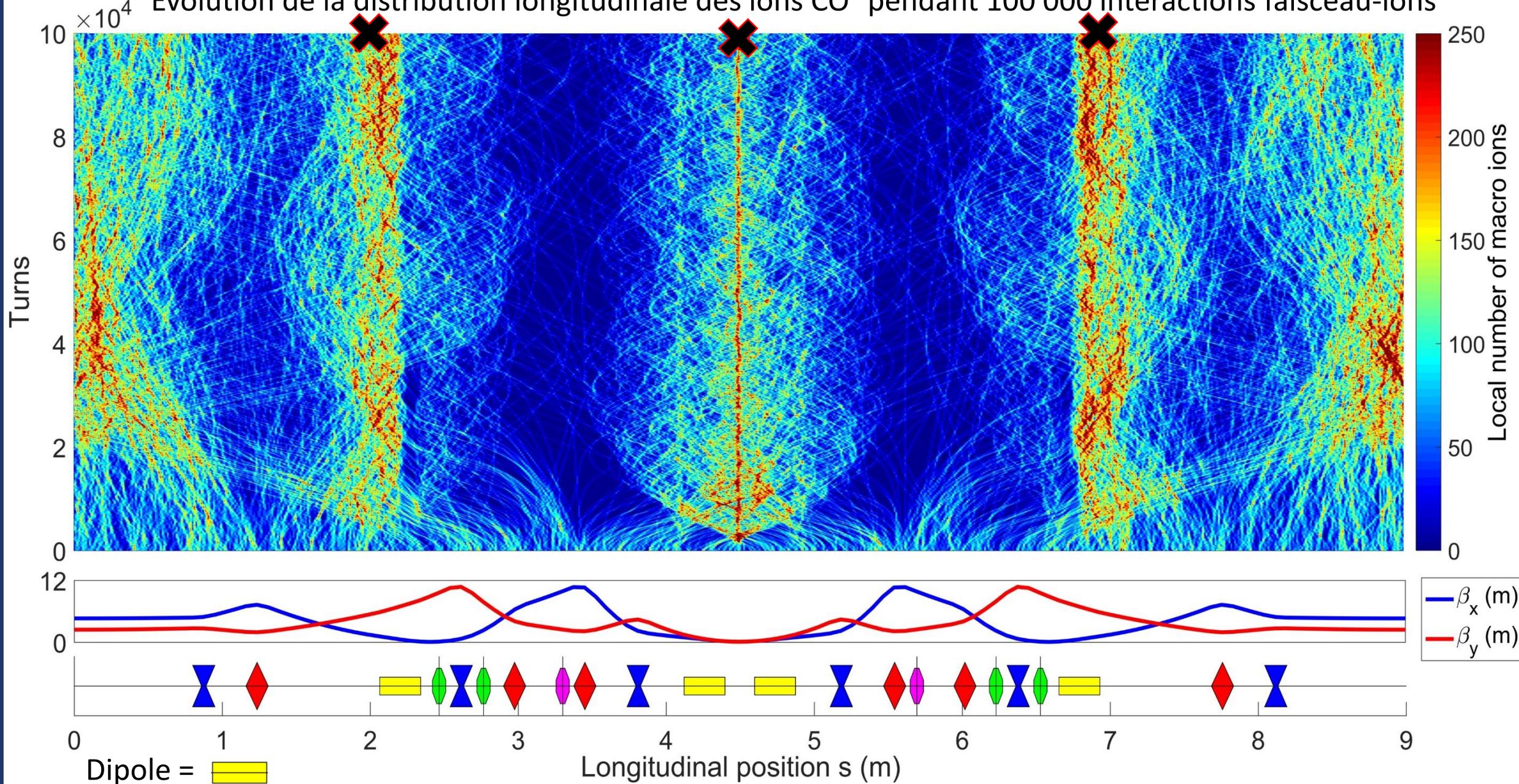
Longitudinal kick felt by a CO^+ ion Δv_s (m/s)



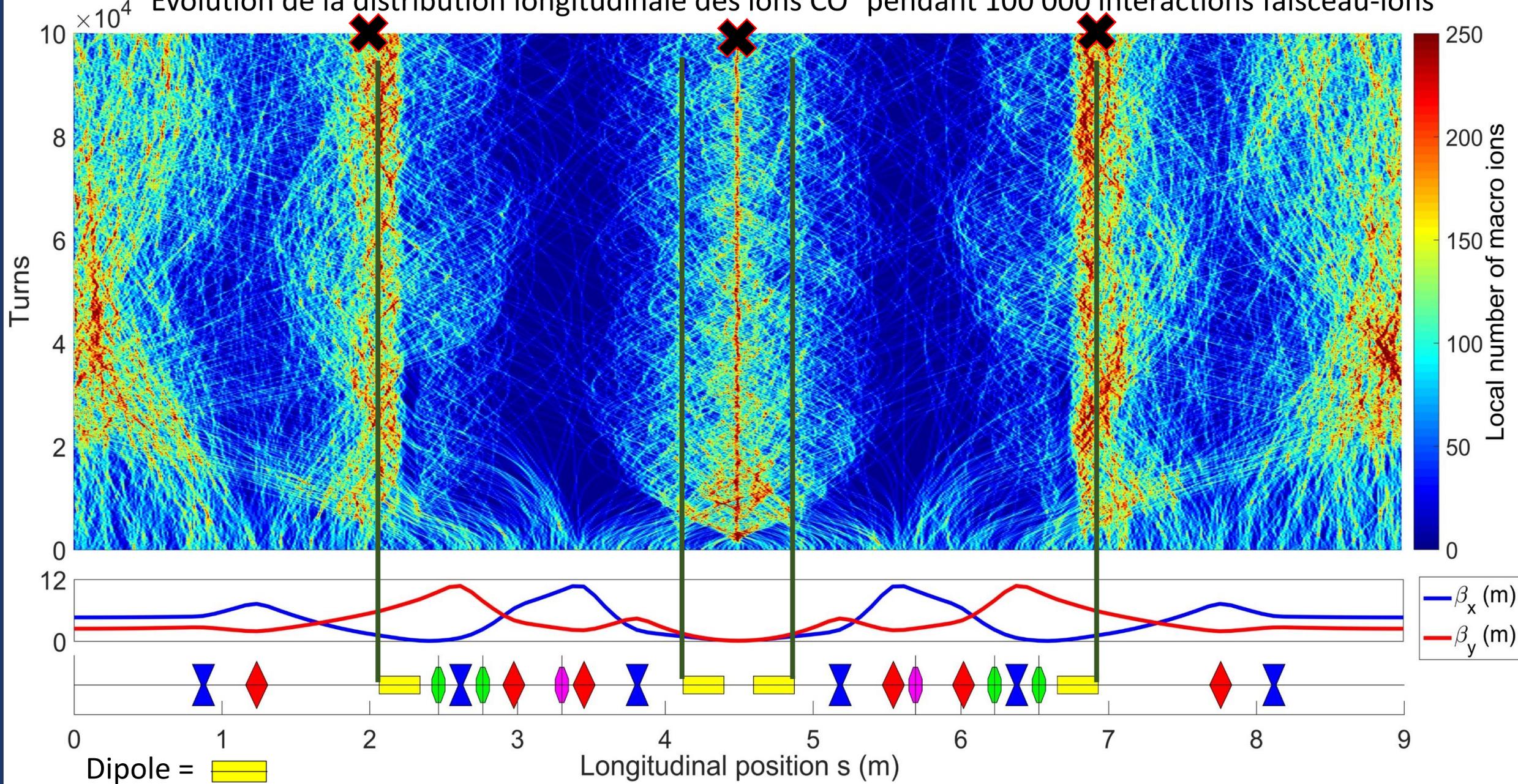
Evolution de la distribution longitudinale des ions CO^+ pendant 100 000 interactions faisceau-ions



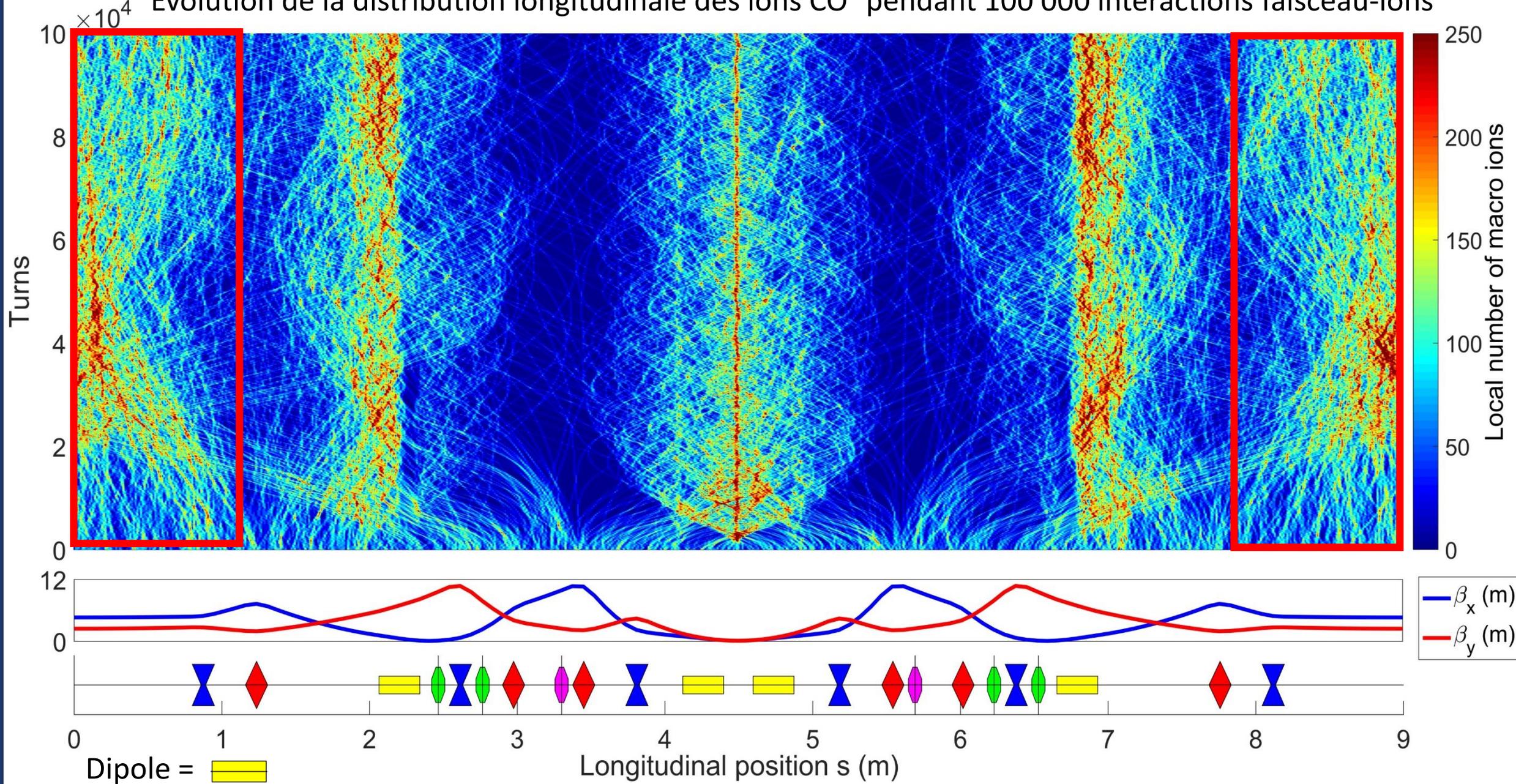
Evolution de la distribution longitudinale des ions CO^+ pendant 100 000 interactions faisceau-ions



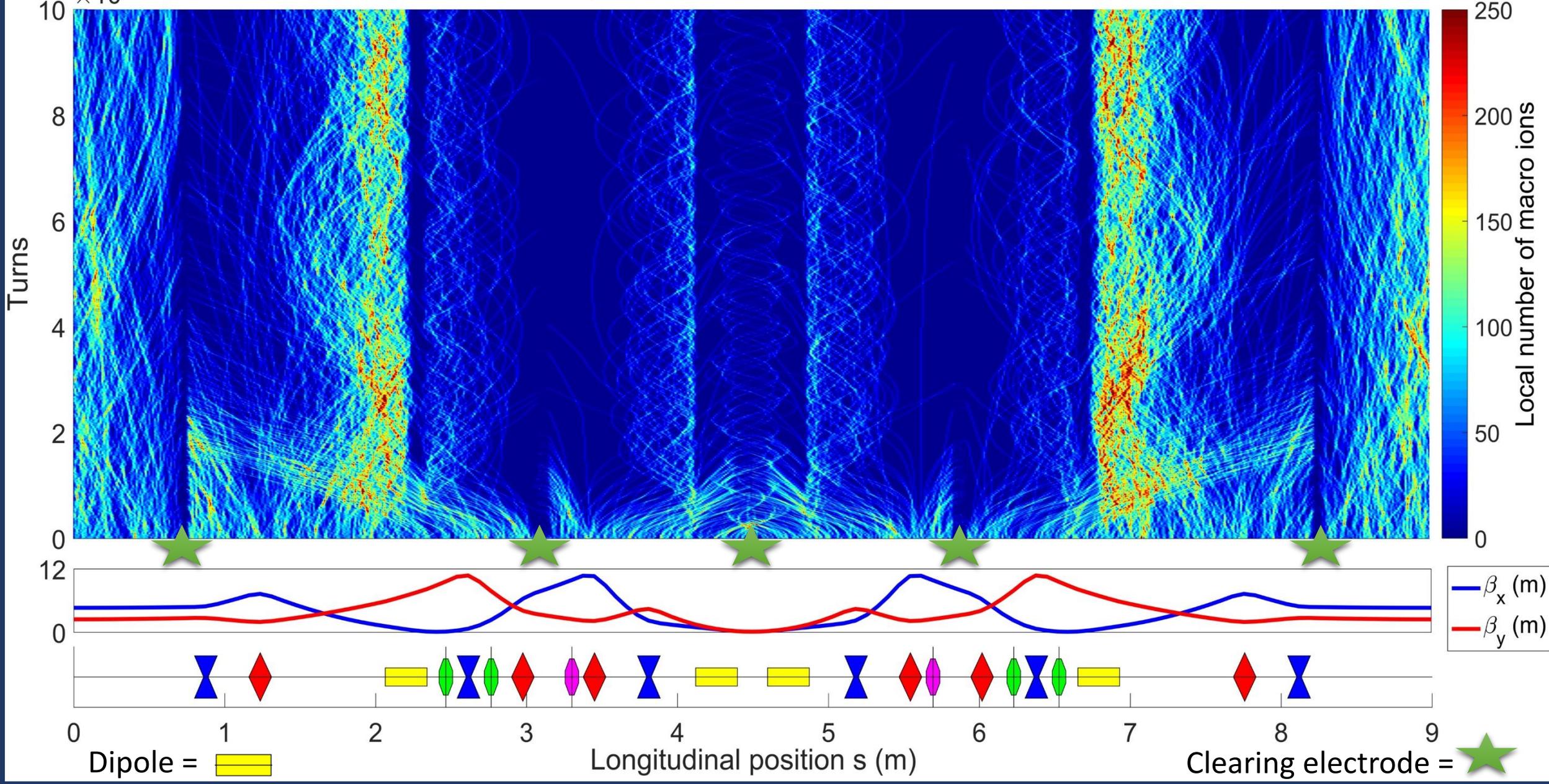
Evolution de la distribution longitudinale des ions CO^+ pendant 100 000 interactions faisceau-ions



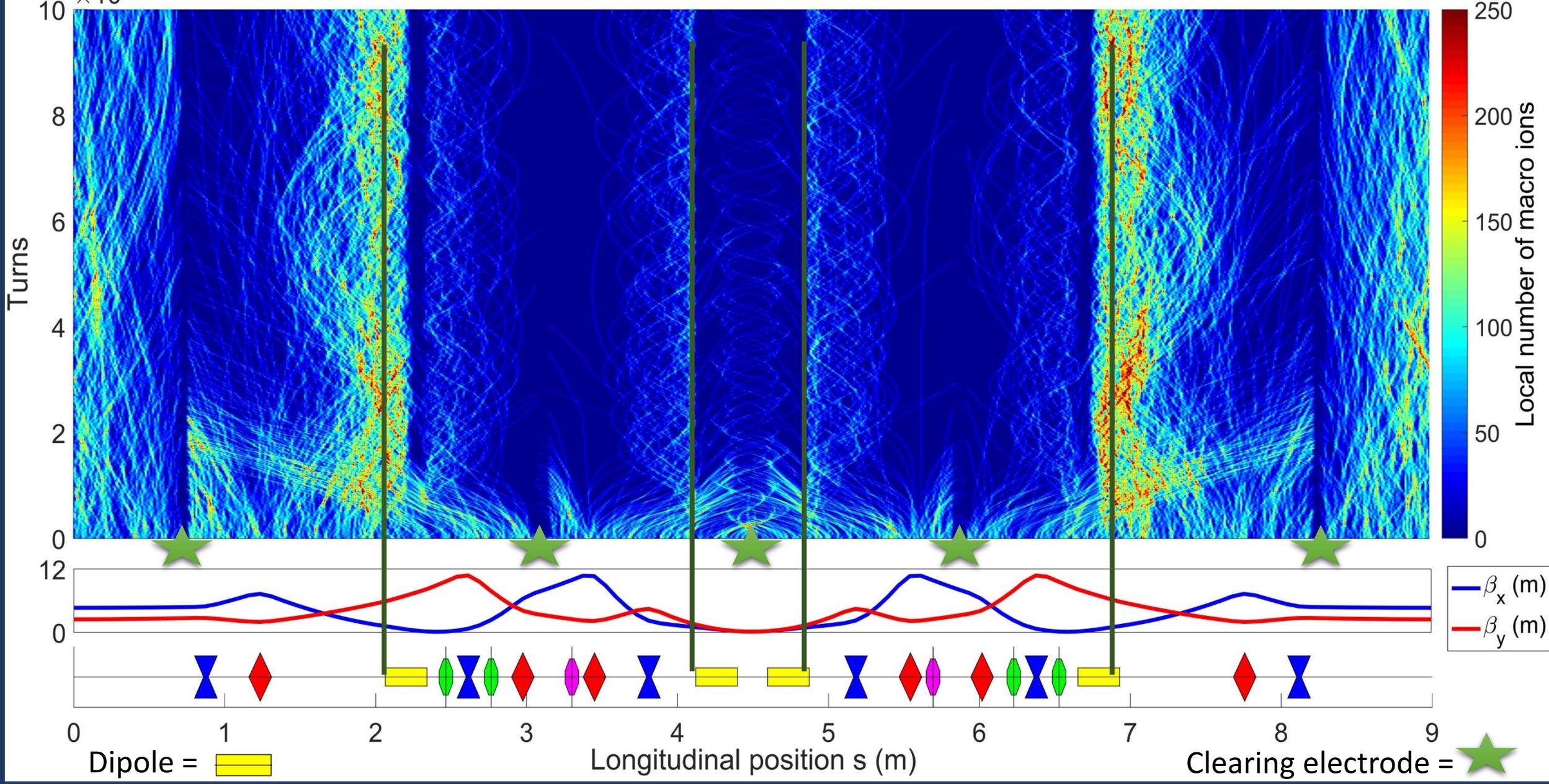
Evolution de la distribution longitudinale des ions CO⁺ pendant 100 000 interactions faisceau-ions



Evolution de la distribution longitudinale des ions CO⁺ en utilisant des électrodes de nettoyage

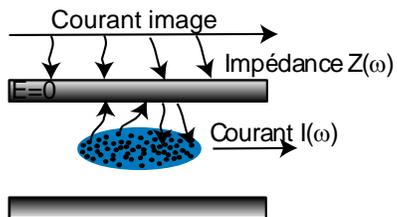


Evolution de la distribution longitudinale des ions CO⁺ en utilisant des électrodes de nettoyage

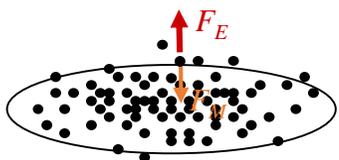


Stratégie et développements

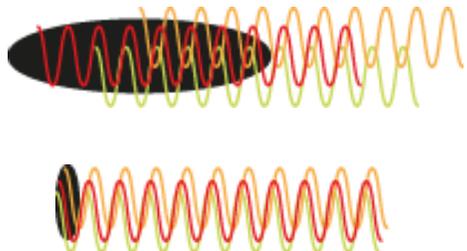
- Champ de sillage et impédances (RW and géométrique)



- Charge d'espace (SC)



- Rayonnement synchrotron cohérent (CSR)



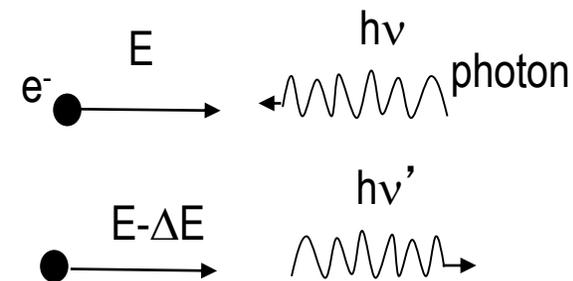
Branche ThomX de CODAL (A. Loulergue)
Code de dynamique faisceau
Simulation de la photocathode à l'anneau

Utilisation du code NUAGE pour la
minimisation du nombre d'ions

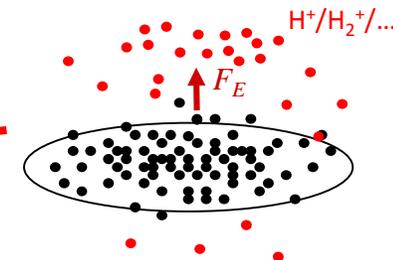
- Diffusion intra-faisceau (IBS) / Touschek



- Rétrodiffusion Compton (CBS)

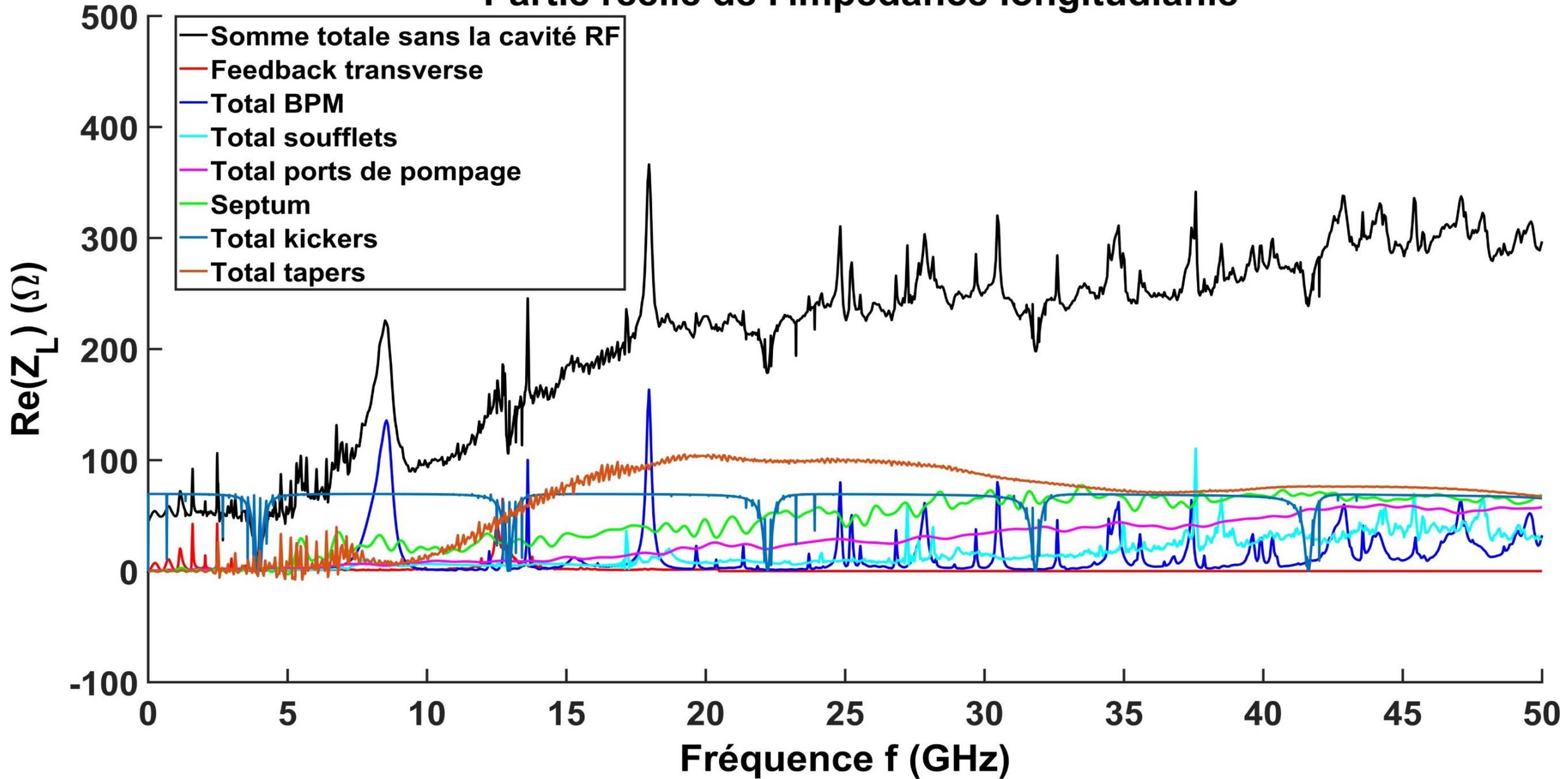


- Nuage d'ions

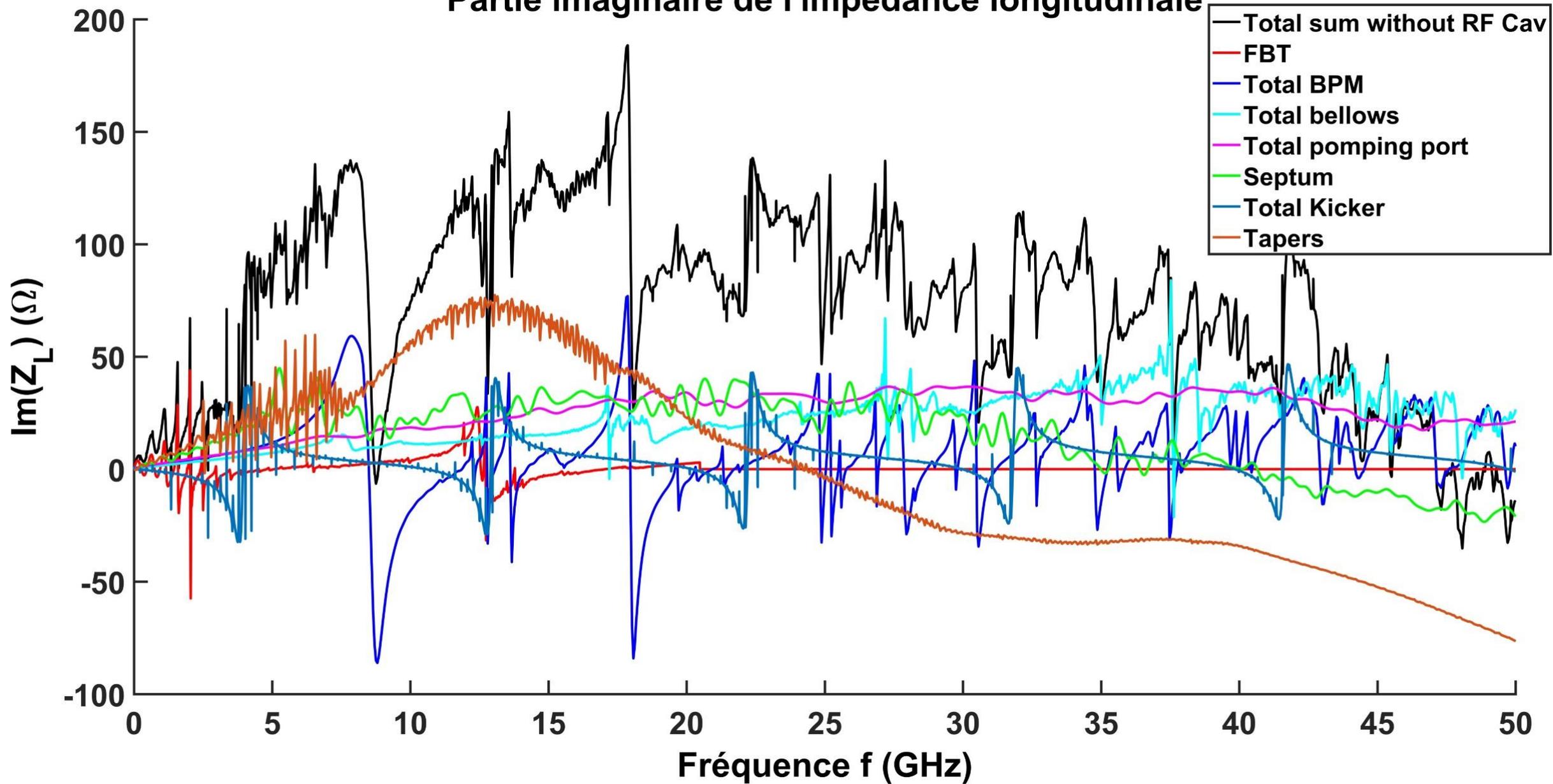


Merci !

Partie réelle de l'impédance longitudinale



Partie imaginaire de l'impédance longitudinale



Impact sur la dynamique faisceau

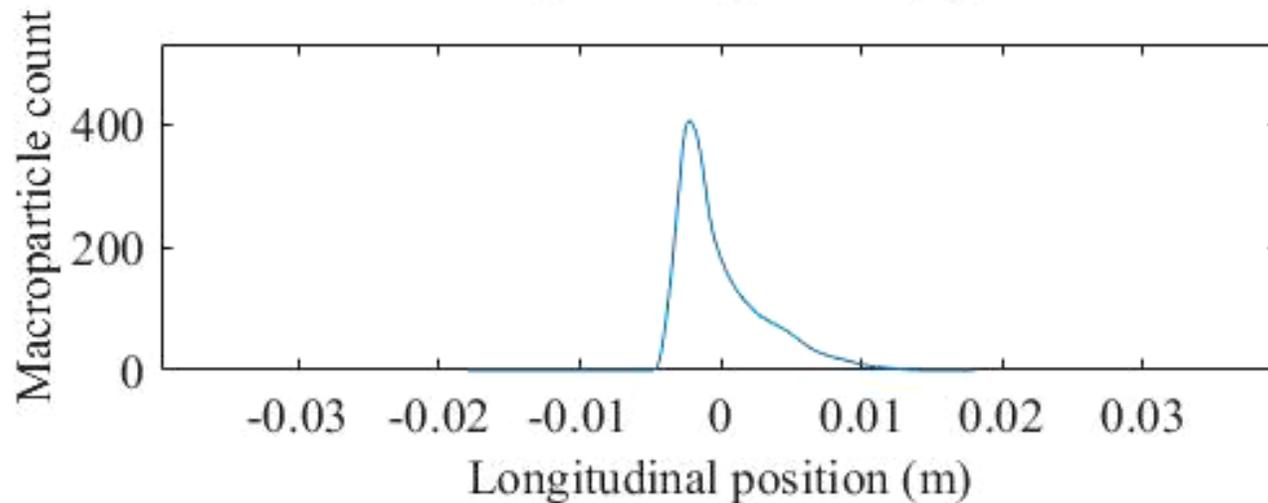
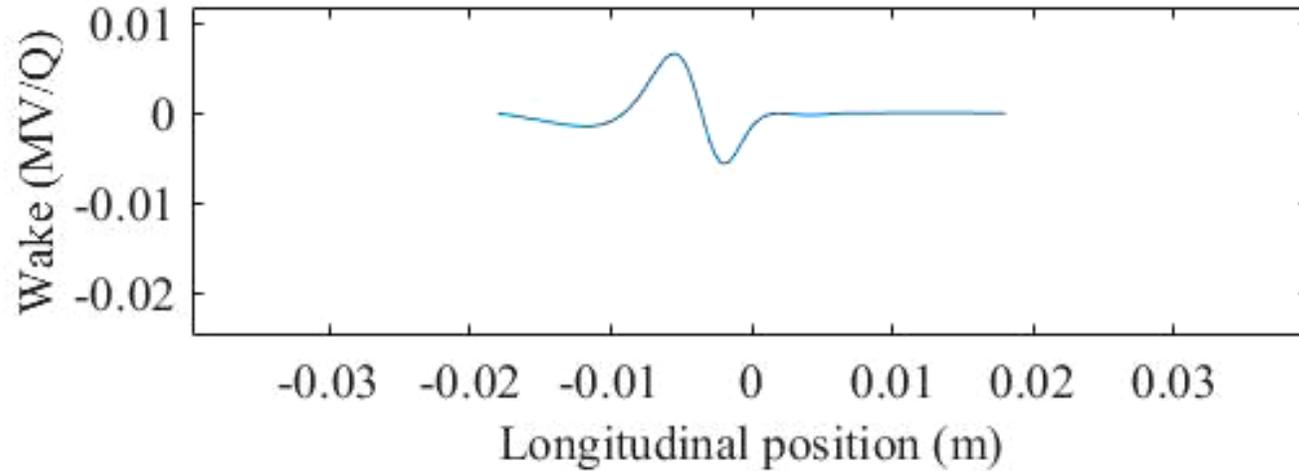
Simulation de principe : 10 000 particules avec CSR plaques parallèles
100 tours à l'injection

Bunch at injection :

Charge = 100 pC

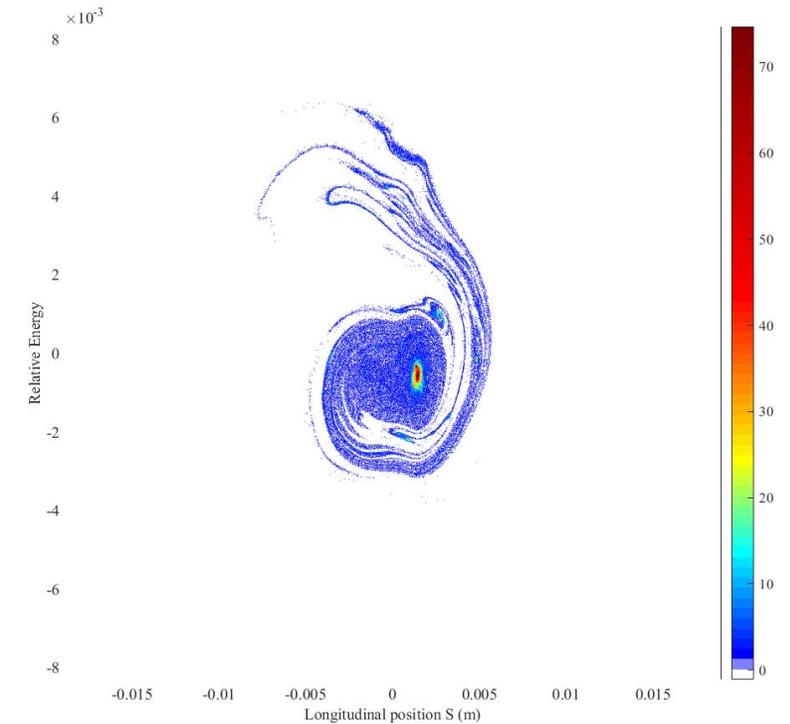
$\sigma_s = 6,6$ ps

$\sigma_\delta = 0,2$ %



Faisceau non Gaussien en longitudinal
Injection sans adaptation
Effets tête-queue et queue-tête important

Au bout
de 1000
tours



Impact sur la dynamique faisceau

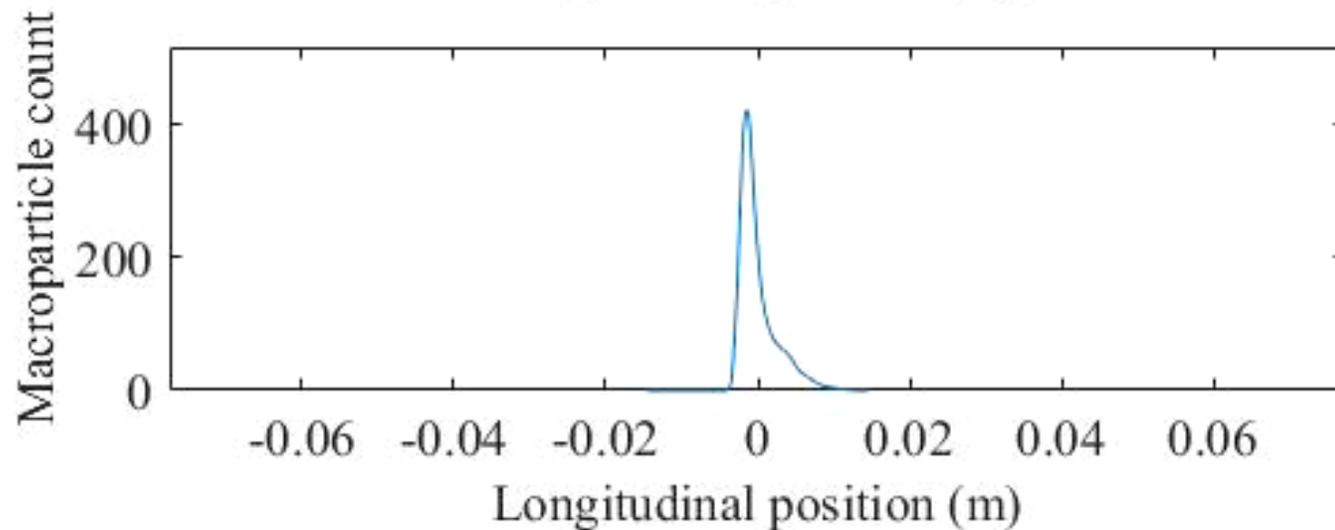
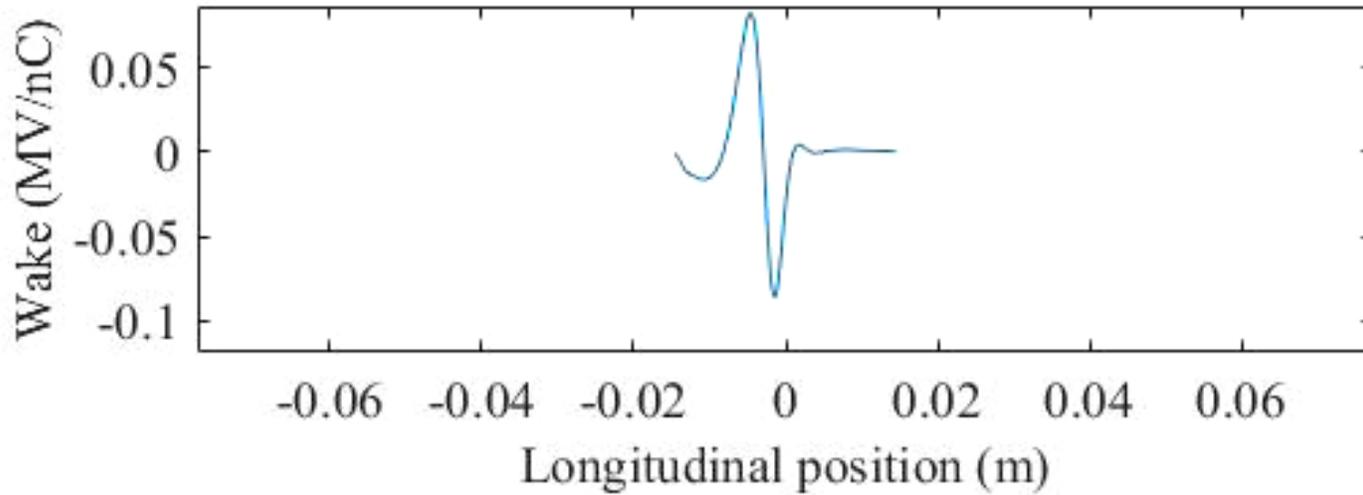
Simulation de principe : 10 000 particules avec CSR plaques parallèles
100 tours à l'injection

Bunch at injection :

Charge = 1 nC

$\sigma_s = 6,6$ ps

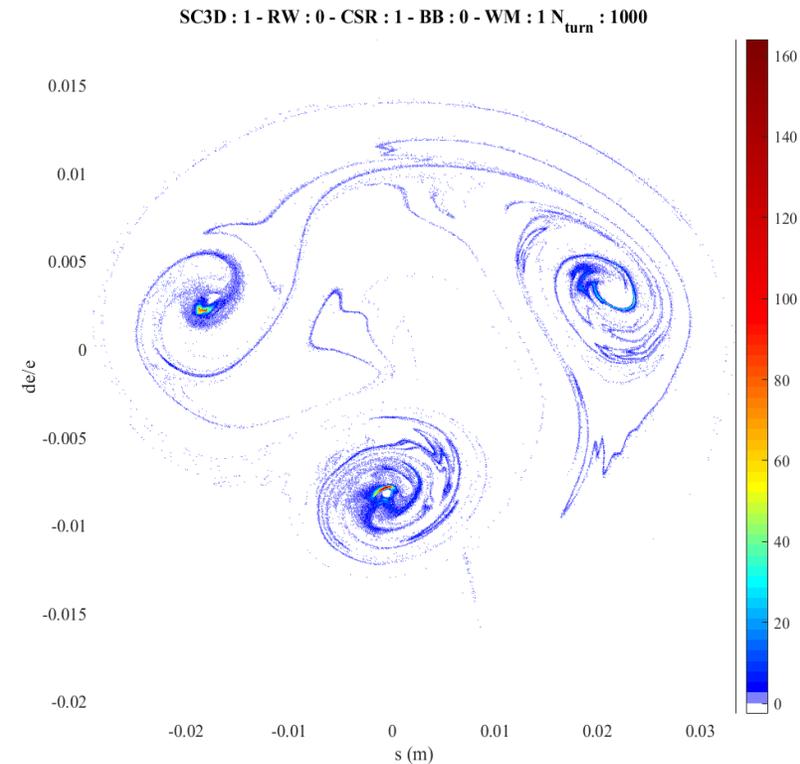
$\sigma_\delta = 0,2$ %



Au bout
de 1000
tours

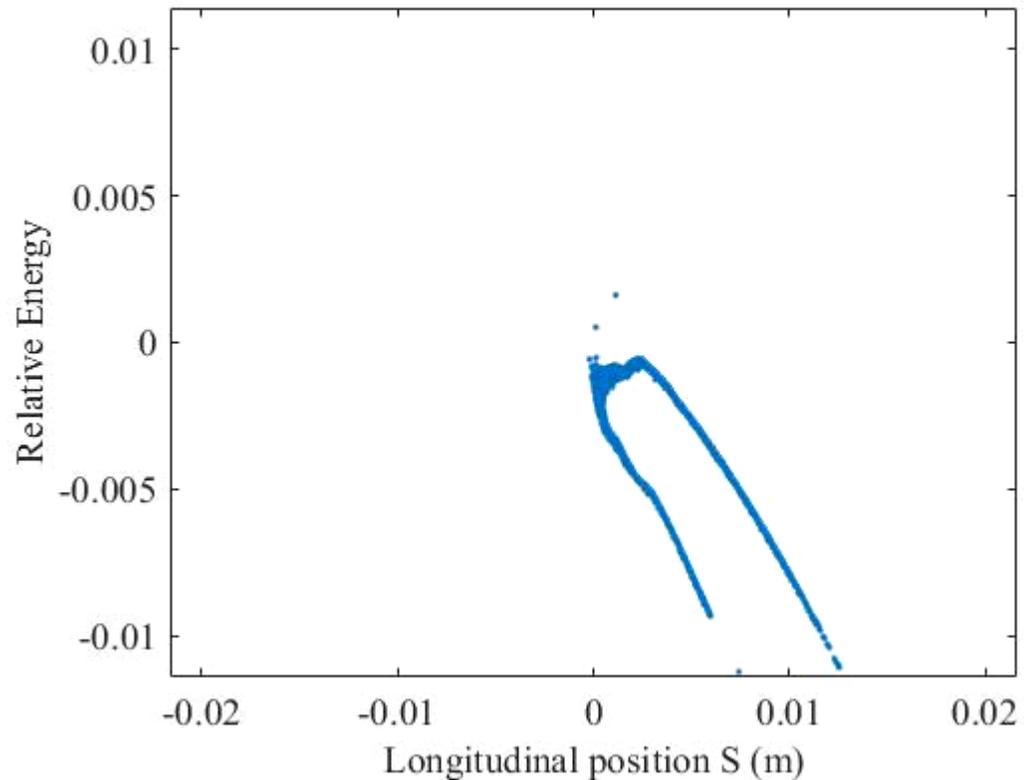


CSR $\propto N^2$



Injection sans adaptation

Sans effets collectifs, tracking uniquement
1000 tours



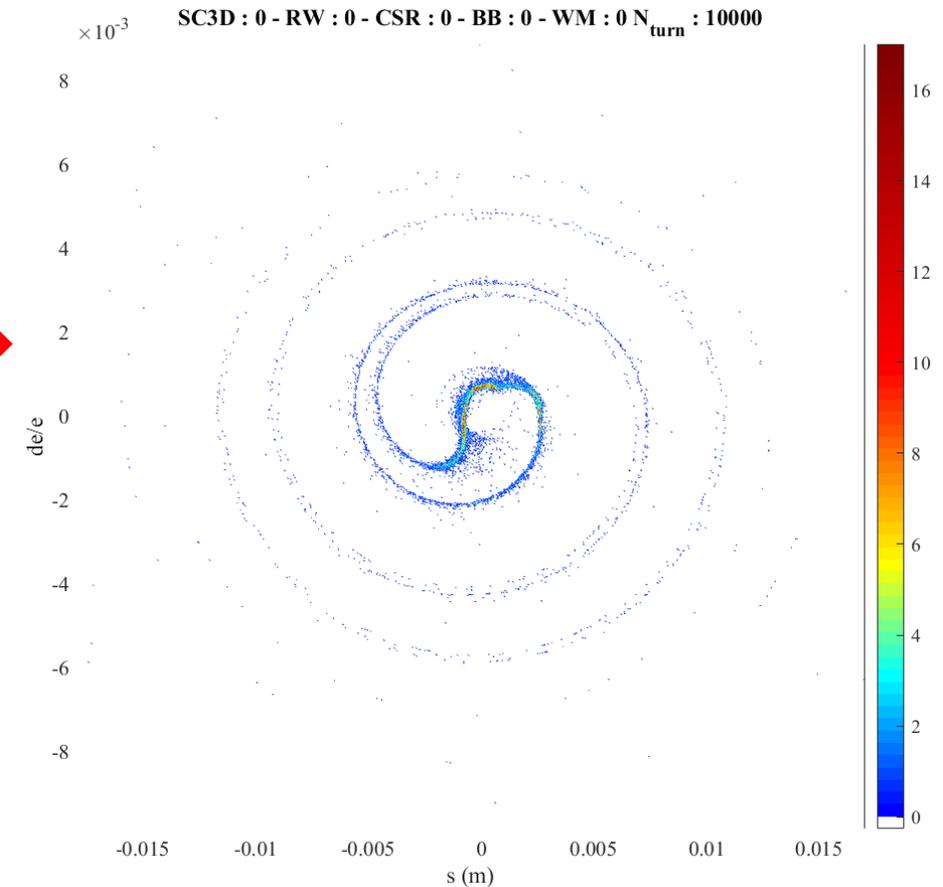
Filamentation lente
du paquet



On remplit
progressivement
l'acceptance RF

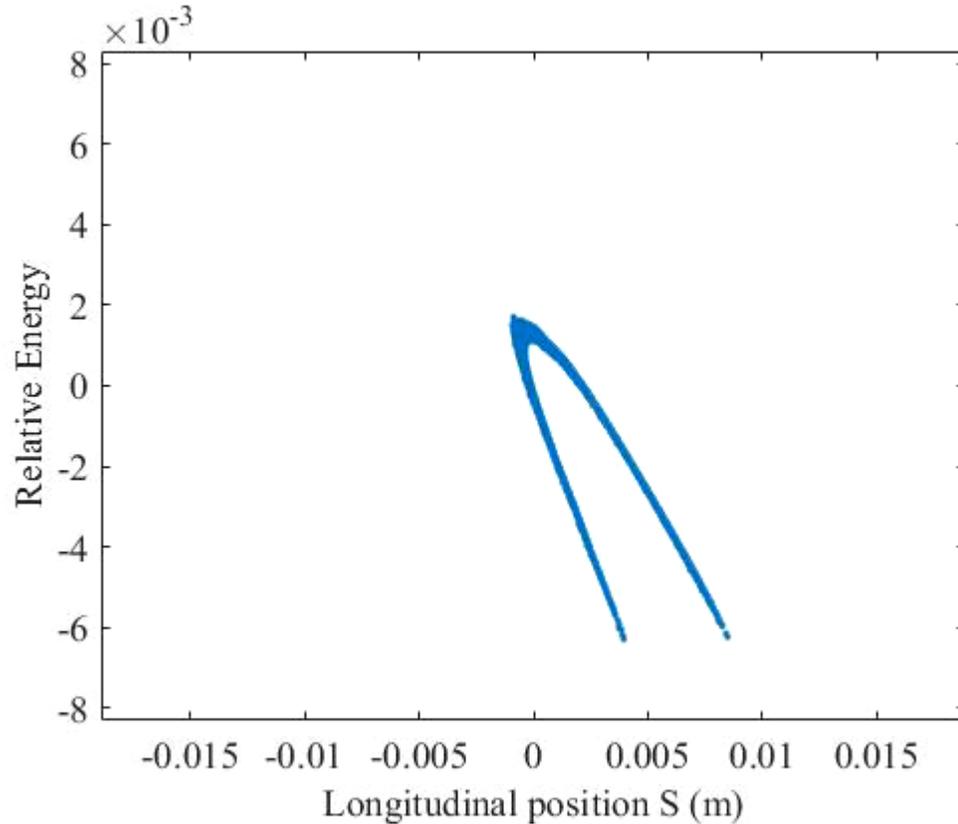
Paquet à l'injection :
Charge = 1 nC
 $\sigma_s = 6,6$ ps
 $\sigma_\delta = 0,2$ %

Sans effets collectifs, tracking uniquement
Au bout de 10 000 tours



Injection sans adaptation

Avec CSR, charge d'espace et impédances
1000 tours



Filamentation rapide
du paquet



On remplit
rapidement
l'acceptance RF

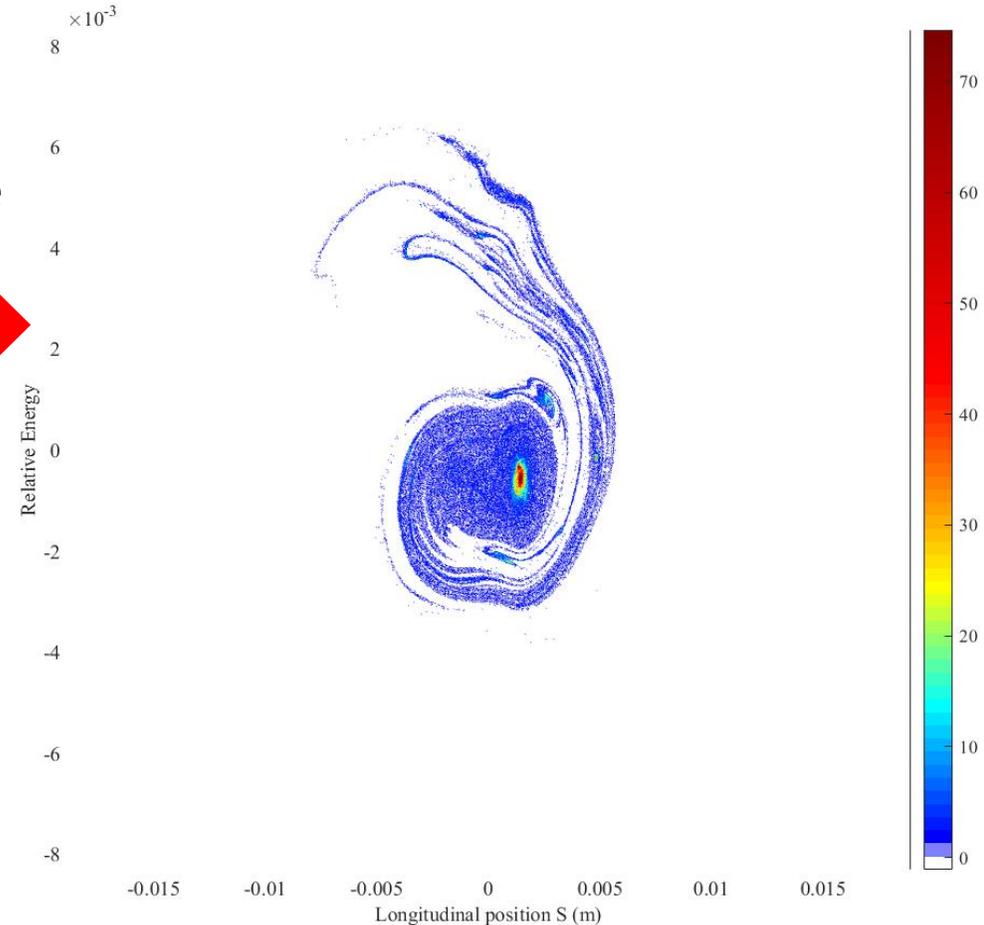
Paquet à l'injection :

Charge = 100 pC

$\sigma_s = 6,6$ ps

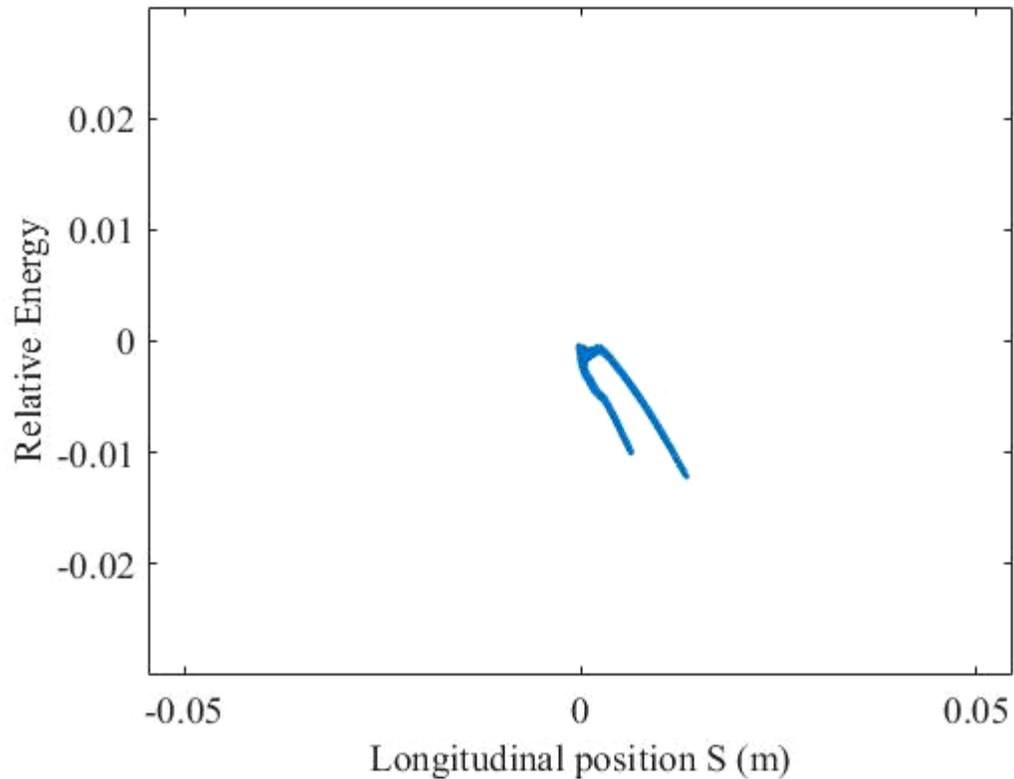
$\sigma_\delta = 0,2$ %

Avec CSR, charge d'espace et impédances
1000 tours



Injection sans adaptation

Avec CSR, charge d'espace et impédances
1000 tours



Explosion du paquet



Instabilité due au CSR

$$\text{CSR} \propto N^2$$

Paquet à l'injection :

Charge = 1 nC

$$\sigma_s = 6,6 \text{ ps}$$

$$\sigma_\delta = 0,2 \%$$

Avec CSR, charge d'espace et impédances
1000 tours

SC3D : 1 - RW : 0 - CSR : 1 - BB : 0 - WM : 1 $N_{\text{turn}} : 1000$

