

# Étude et conception d'un anneau de désintégration pour une usine à neutrinos utilisant les décroissances $\beta$ d'ions radioactifs

Antoine CHANCÉ

Laboratoire d'Étude et de Développement des Accélérateurs  
CEA Saclay

26 Septembre 2007

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Plan

## Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- 1 Principe d'une usine à neutrinos
- 2 Paramétrage des  $\beta$ -beams
- 3 Pertes par décroissance  $\beta$
- 4 Pertes liées au système d'injection
- 5 Stabilité transverse du faisceau
- 6 Conclusion

# Plan

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- 1 Principe d'une usine à neutrinos
- 2 Paramétrage des  $\beta$ -beams
- 3 Pertes par décroissance  $\beta$
- 4 Pertes liées au système d'injection
- 5 Stabilité transverse du faisceau
- 6 Conclusion

# Bref historique

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- Les neutrinos ont été introduits en 1933 par Pauli pour expliquer l'énergie manquante dans la décroissance  $\beta$ .
- 3 saveurs de neutrinos :  $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ .
- 3 sources ont été utilisées :
  - 1 Soleil  
⇒ Flux prédit différent du flux mesuré.
  - 2 Atmosphère  
⇒ Flux détecté dépendant de la direction de propagation.
  - 3 Centrales nucléaires  
⇒ Flux détecté dépendant de la distance parcourue.

⇒ Mise en évidence de l'oscillation du neutrino entre ses différentes saveurs et donc de la masse non nulle des neutrinos.

# Principe de l'oscillation du neutrino

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

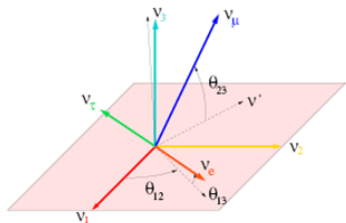
Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

États propres  
Opérateur de  
l'interaction  
faible

États propres  
Opérateur de  
masse



$$\theta_{23} \text{ (atmosphérique)} = 45^\circ$$

$$\theta_{12} \text{ (solaire)} = 30^\circ$$

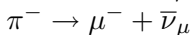
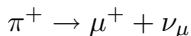
$$\theta_{13} \text{ (Chooz)} < 13^\circ$$

Angles de mélange  $\theta_{12}$  et  $\theta_{23}$  déterminés par les expériences.  
Problème : Valeurs de l'angle de mélange  $\theta_{13}$  et de la phase  $\delta$  ?  
 $\Rightarrow$  Besoin d'une source intense de neutrinos dont le spectre en énergie est connu.

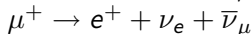
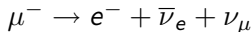
# Quelle usine à neutrinos ?

3 concepts proposés d'accélérateurs reposant sur la désintégration de particules :

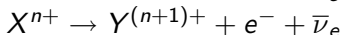
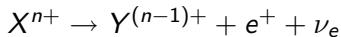
- « Super beams » : utilisation de la décroissance de pions issus d'intenses faisceaux de protons frappant une cible.



- « Neutrino factory » : utilisation de la décroissance de muons après accélération.



- «  $\beta$ -beam » : utilisation de la décroissance  $\beta$  d'ions radioactifs.



Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Plan

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- 1 Principe d'une usine à neutrinos
- 2 Paramétrage des  $\beta$ -beams**
- 3 Pertes par décroissance  $\beta$
- 4 Pertes liées au système d'injection
- 5 Stabilité transverse du faisceau
- 6 Conclusion

# Choix des noyaux radioactifs $\beta$

Critères pour le choix :

- Taux de production des ions suffisant.
- Gaz nobles de préférence - diffusion simple en dehors de la cible, gazeux à température ambiante.
- Temps de vie assez long pour conserver des intensités raisonnables en fin de ligne.
- Temps de vie assez court pour avoir un taux suffisant de décroissance par seconde à haute énergie.
- Les produits de décroissance ne sont pas à longue durée de vie (problèmes d'activation).

Meilleur compromis ( ${}^9\text{Li}^{3+}$ ,  ${}^{19}\text{Ne}^{10+}$ ,  ${}^8\text{B}^{4+}$ , ...) :

- Hélium-6 :  ${}^6\text{He}^{2+} \rightarrow {}^6\text{Li}^{3+} + e^- + \bar{\nu}_e$   
 $\langle E_{\bar{\nu}} \rangle = 1.94 \text{ MeV}$ ,  $\tau_{1/2} = 0.81 \text{ s}$
- Néon-18 :  ${}^{18}\text{Ne}^{10+} \rightarrow {}^{18}\text{F}^{9+} + e^+ + \nu_e$   
 $\langle E_{\nu} \rangle = 1.86 \text{ MeV}$ ,  $\tau_{1/2} = 1.67 \text{ s}$

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

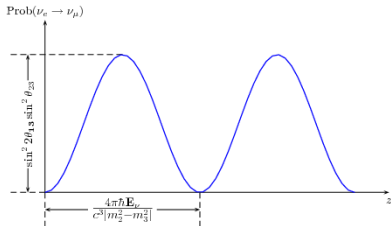
Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion



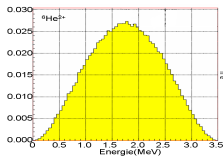
Pour un complexe basé au CERN et pour une détection au LSM (à 130 km), le meilleur compromis est :  $\gamma = 100$ .

Faisceau pur de  $\nu_e, \bar{\nu}_e$  pour étudier  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ .

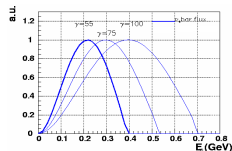


La longueur d'onde de l'oscillation du neutrino dépend de son énergie et de la différence entre les masses au carré des états propres.

Transformation de Lorentz pour un faisceau collimaté.



Lorentz  $\rightarrow$



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

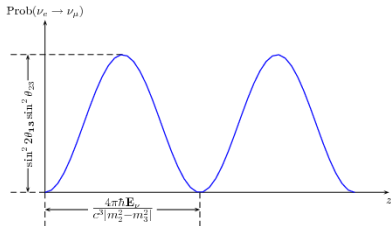
Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

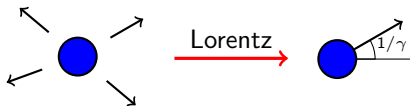
Pour un complexe basé au CERN et pour une détection au LSM (à 130 km), le meilleur compromis est :  $\gamma = 100$ .

Faisceau pur de  $\nu_e, \bar{\nu}_e$  pour étudier  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ .



La longueur d'onde de l'oscillation du neutrino dépend de son énergie et de la différence entre les masses au carré des états propres.

Transformation de Lorentz pour un faisceau collimaté.



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

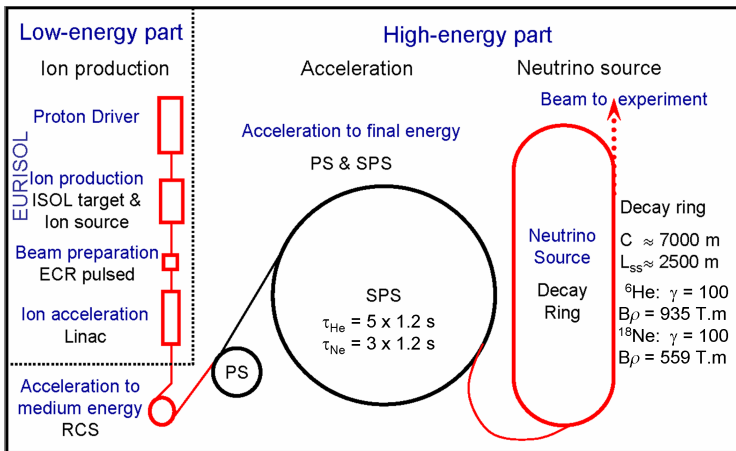
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Schéma de principe



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

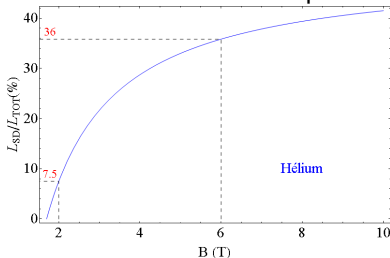
Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Choix de dipôles supraconducteurs dans l'arc

Le rapport entre la longueur des sections droites et celle de l'arc doit être la plus grande possible pour maximiser le flux de neutrinos émis vers le détecteur.

L'arc est supposé constitué à 50 % de dipôles.



Avec un champ de 6 T dans les dipôles, le ratio est de 36 % alors qu'il ne serait que de 7.5 % pour un champ de 2 T.

⇒ Technologie supraconductrice pour les dipôles des arcs.

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Paramètres $\beta$ -Beams

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

	Unités	${}^6\text{He}^{2+}$	${}^{18}\text{Ne}^{10+}$
$B\rho$	T.m	934.93	559.26
<b>Nombre de <math>\nu</math> utiles désiré</b>	$\text{an}^{-1}$	$2.9 \times 10^{18}$	$1.1 \times 10^{18}$
Portion utile	%	36	36
Nombre total $\nu$	$\text{an}^{-1}$	$8.2 \times 10^{18}$	$3.1 \times 10^{18}$
Temps demi-vie au repos	s	0.81	1.67
Nombre d'ions stockés	-	$9.66 \times 10^{13}$	$7.42 \times 10^{13}$
Temps entre 2 injections	s	6	3.6
Nombre d'ions injectés	-	$9 \times 10^{12}$	$4.3 \times 10^{12}$

Nombre d'harmoniques	-	924	924
Nombre de paquets	-	20	20
Émittance hor. rms	mm.mrad	0.11	0.22
Émittance ver. rms	mm.mrad	0.06	0.22
Émittance long. total injecté	mm.mrad	170	125
Émittance long. total stocké	mm.mrad	2550	2550

# Résumé des contraintes sur l'optique

- Afin de maximiser le flux incident sur le détecteur, il faut :
  - ⇒ des fonctions bêatron élevées dans les longues sections droites (mailles FODO). L'angle rms  $\sqrt{\gamma_x \epsilon_x}$  des ions doit être faible devant l'angle du cône d'émission ( $1/\gamma \approx 10$  mrad).
- Le système d'injection impose :
  - ⇒ une insertion à haute dispersion et à bas  $\beta_x$ . L'insertion pour l'injection sera dans l'arc : dispersion naturellement présente, fonctions bêatron faibles et dipôles déjà présents.
  - ⇒ une collimation des ions qui ne sont plus acceptés après l'injection.
- Tous les ions injectés sont perdus dans l'anneau . Il faut donc :
  - ⇒ extraire les produits de décroissance quand c'est possible.
  - ⇒ limiter les dépôts dans les éléments magnétiques.

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

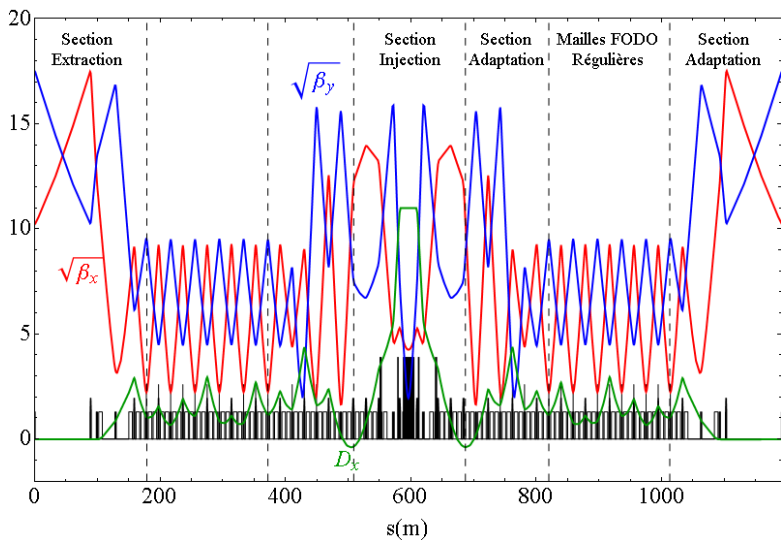
Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Fonctions optiques de l'arc



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Plan

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- 1 Principe d'une usine à neutrinos
- 2 Paramétrage des  $\beta$ -beams
- 3 Pertes par décroissance  $\beta$**
- 4 Pertes liées au système d'injection
- 5 Stabilité transverse du faisceau
- 6 Conclusion



# Pertes liées aux décroissances $\beta$ dans l'anneau

La décroissance des ions stockés entraîne une perte continue de puissance dont la valeur moyenne est :

$$P = 10.8 \text{ W/m pour } {}^6\text{He}^{2+}$$

$$P = 11.8 \text{ W/m pour le } {}^{18}\text{Ne}^{10+}$$

La différence relative en rigidité magnétique  $\frac{P}{Q}$  est :

$$\delta \approx -33\% \text{ pour } {}^6\text{He}^{2+} \quad ({}^6\text{He}^{2+} \rightarrow {}^6\text{Li}^{3+} + e^- + \bar{\nu}_e)$$

$$\delta \approx +11\% \text{ pour le } {}^{18}\text{Ne}^{10+} \quad ({}^{18}\text{Ne}^{10+} \rightarrow {}^{18}\text{F}^{9+} + e^+ + \nu_e)$$

La différence en rigidité est trop importante pour accepter les produits de décroissance dans les arcs : ils sont perdus après transport dans quelques dipôles.

⇒ Pics de dépôt après les longues sections droites : plusieurs dizaines de kiloWatt ! **Nécessité d'extraire.**

⇒ Nécessité de limiter le dépôt dans les éléments magnétiques de l'arc en dessous de 10 W/m.

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

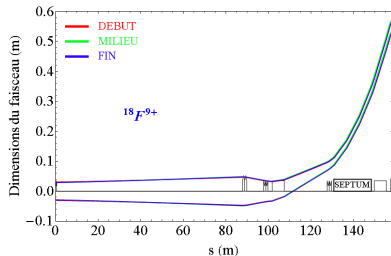
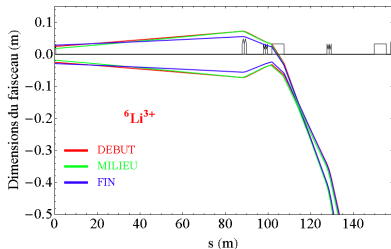
Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Extraction des produits de décroissance issus des sections droites

Les dimensions du faisceau sont données à  $\pm 6\sigma$  et le transport des produits de décroissance a été réalisé en différents points de la section droite.



Le premier dipôle de l'arc est utilisé pour séparer les produits de décroissance.

Dans le cas de  ${}^6\text{He}^{2+}$ , la différence en rigidité est suffisante pour extraire les produits de décroissance à l'entrée de l'arc.

Dans le cas du  ${}^{18}\text{Ne}^{10+}$ , il est nécessaire d'ajouter un septum d'extraction de 12 m et de 0.5 T.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

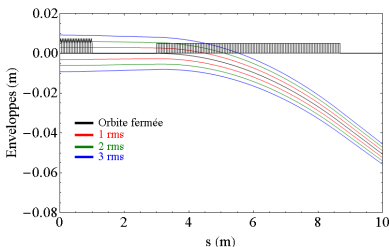
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Évaluation des dépôts dans l'arc



$N = \frac{N_S}{L} \int_{n_1\sigma}^{n_2\sigma} f_\sigma(x) dx$  ions par mètre sont entre les enveloppes à  $n_1\sigma$  et  $n_2\sigma$ .

Puissance perdue :

$$P(W) = N \frac{\log 2}{\tau_{1/2}} \frac{\gamma - 1}{\gamma} E_0$$

$\tau_{1/2}$  temps demi vie (au repos).

$E_0$  énergie de masse de l'ion.

$N_S$  nombre d'ions stockés.

$L$  longueur de l'anneau.

$f_\sigma$  distribution du faisceau.

$\sigma$  écart type de la distribution.

Nous pouvons situer les dépôts des ions situés entre les enveloppes à  $n_1\sigma$  et  $n_2\sigma$  (en comparant la taille de l'enveloppe et celle de la chambre). Ainsi, il est possible d'évaluer ces pertes dans chaque élément.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Avantages et inconvénients de la méthode

## Avantages :

- Rapidité du programme.
- Facilité d'utilisation.

## Inconvénients :

- Ne tient pas compte des interactions avec les parois.
- Le faisceau est supposé elliptique avec les deux plans découplés.
- La géométrie des chambres est simple (rectangulaire).

⇒ La méthode est utile pour évaluer rapidement le design de l'anneau. Mais des simulations plus poussées sont nécessaires (*FLUKA* par exemple).

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

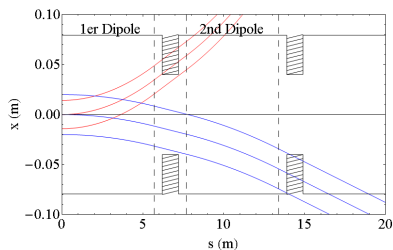
Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Résultats de l'optimisation

Des absorbeurs sont insérés entre les dipôles.

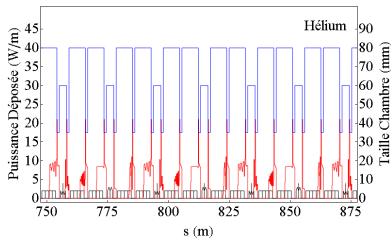


La longueur des dipôles et la position des absorbeurs sont optimisées (angles, ouverture aux absorbeurs, ...).

Les demi-ouvertures dans les dipôles sont de 8 cm pour des champs de 6 T.

Les absorbeurs protègent les éléments magnétiques.

Les simulations utilisant un transport particulaire et *FLUKA* sont en cours pour confirmer (F. Jones et E. Wildner THPAN006, PAC07, Albuquerque).



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Plan

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- 1 Principe d'une usine à neutrinos
- 2 Paramétrage des  $\beta$ -beams
- 3 Pertes par décroissance  $\beta$
- 4 Pertes liées au système d'injection**
- 5 Stabilité transverse du faisceau
- 6 Conclusion

# Pourquoi une injection "off momentum"

L'injection se fait en présence d'un faisceau circulant.

⇒ Pas d'injection sur l'axe.

Pas de phénomène d'amortissement entre deux injections.

⇒ Injection à l'énergie nominale avec déformation d'orbite fermée insuffisante.

La solution envisagée est d'injecter à une énergie différente de celle du faisceau stocké et, en utilisant un système RF approprié, de mélanger ensemble les faisceaux injecté et stocké.

**MAIS :**

- Dans l'espace longitudinal, le faisceau stocké grossit à chaque injection (Liouville).
- La présence de la lame du septum limite l'acceptance transverse et donc en énergie (zone dispersive) de l'anneau.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

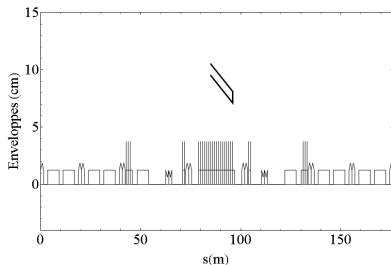
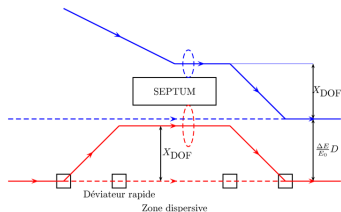
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Principe de l'injection "off momentum"



- 1 Le faisceau stocké est dévié par 4 déviateurs rapides.
- 2 Le faisceau entrant est injecté "off momentum" sur son orbite chromatique.
- 3 Les déviateurs sont éteints. Le faisceau injecté reste sur son orbite chromatique et passe sous la lame du septum.
- 4 Les 2 faisceaux sont mélangés par un programme RF adapté.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

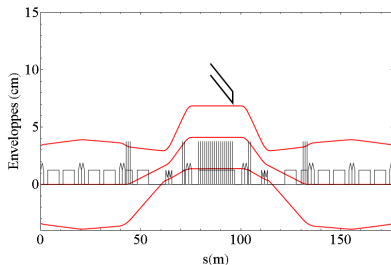
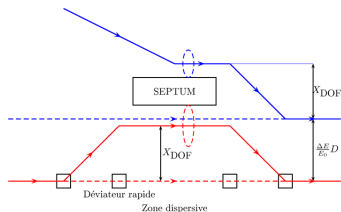
Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion



# Principe de l'injection "off momentum"



- 1 Le faisceau stocké est dévié par 4 déviateurs rapides.
- 2 Le faisceau entrant est injecté "off momentum" sur son orbite chromatique.
- 3 Les déviateurs sont éteints. Le faisceau injecté reste sur son orbite chromatique et passe sous la lame du septum.
- 4 Les 2 faisceaux sont mélangés par un programme RF adapté.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

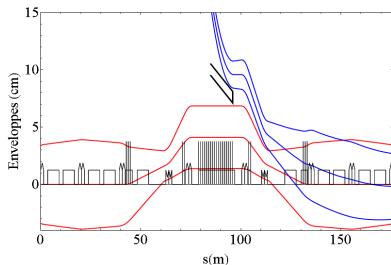
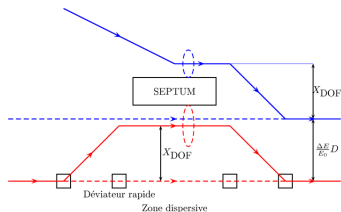
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Principe de l'injection "off momentum"



- 1 Le faisceau stocké est dévié par 4 déviateurs rapides.
- 2 Le faisceau entrant est injecté "off momentum" sur son orbite chromatique.
- 3 Les déviateurs sont éteints. Le faisceau injecté reste sur son orbite chromatique et passe sous la lame du septum.
- 4 Les 2 faisceaux sont mélangés par un programme RF adapté.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

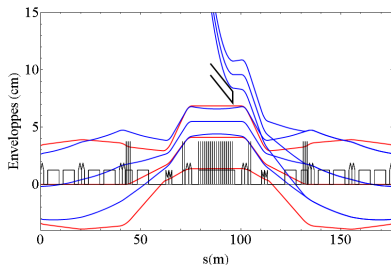
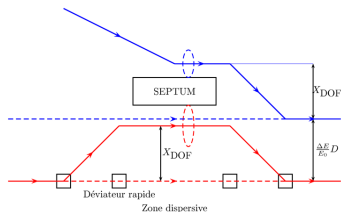
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Principe de l'injection "off momentum"



- 1 Le faisceau stocké est dévié par 4 déviateurs rapides.
- 2 Le faisceau entrant est injecté "off momentum" sur son orbite chromatique.
- 3 Les déviateurs sont éteints. Le faisceau injecté reste sur son orbite chromatique et passe sous la lame du septum.
- 4 Les 2 faisceaux sont mélangés par un programme RF adapté.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

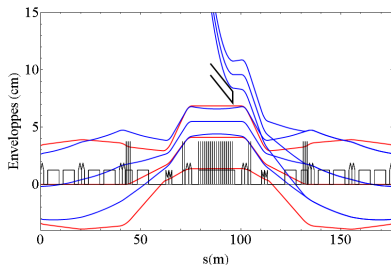
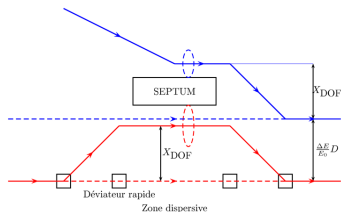
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Principe de l'injection "off momentum"



- 1 Le faisceau stocké est dévié par 4 déviateurs rapides.
- 2 Le faisceau entrant est injecté "off momentum" sur son orbite chromatique.
- 3 Les déviateurs sont éteints. Le faisceau injecté reste sur son orbite chromatique et passe sous la lame du septum.
- 4 Les 2 faisceaux sont mélangés par un programme RF adapté.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Principe du mélange avec 2 cavités

Utilisation de 2 familles de cavités de phase et tension variables dont l'une est à l'harmonique double.

$$V(\theta) = V_1 [\sin(h\theta + \theta_1) + r \sin(2h\theta + \theta_2)]$$

⇒ permet de moduler la forme des isohamiltoniennes afin d'avoir 2 phases synchrones stables : une pour le faisceau stocké et une autre pour le faisceau injecté.

5 grandes étapes dans le programme RF :

- 1 Rotation d'un quart de tour dans l'espace  $(I, \delta)$ .
- 2 La seconde cavité est allumée.
- 3 Mélange asymétrique avec une aire constante pour le lobe de capture.
- 4 Mélange symétrique.
- 5 Extinction progressive de la seconde cavité.

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Évolution du faisceau injecté au cours d'un programme RF

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

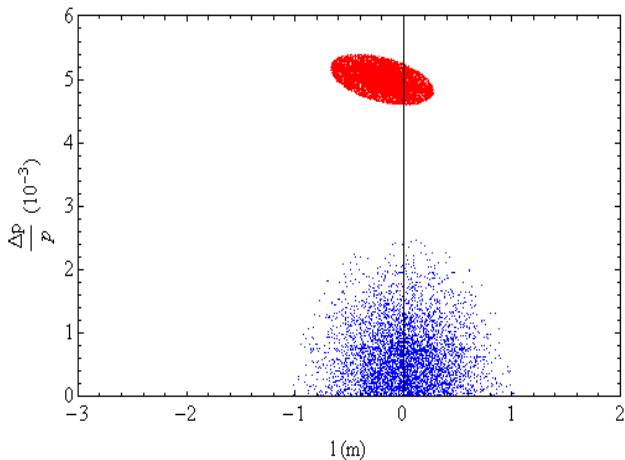
Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

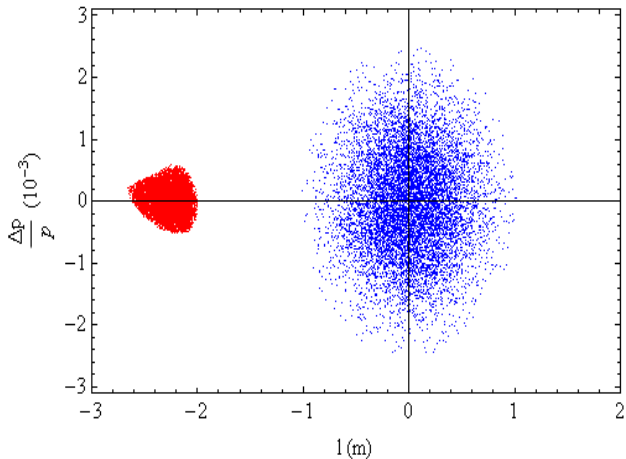
Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion



# Évolution du faisceau injecté au cours d'un programme RF



Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

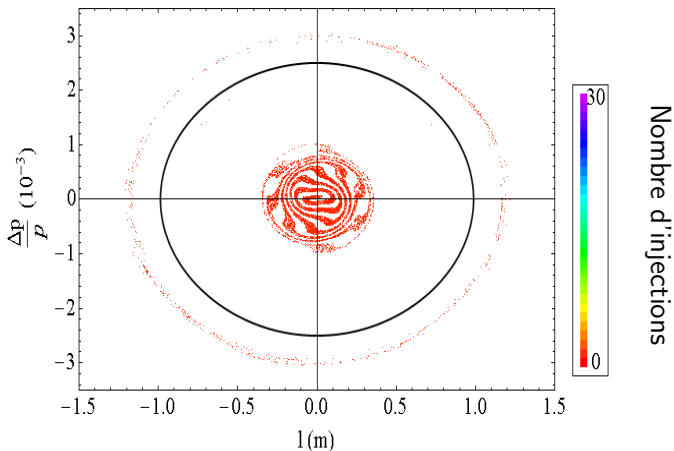
Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Évolution du faisceau au cours des injections progressives

La présence de la lame du septum réduit l'acceptance en énergie à  $\delta = 2.5\text{‰}$ .



Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion



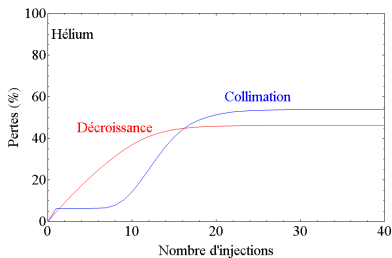
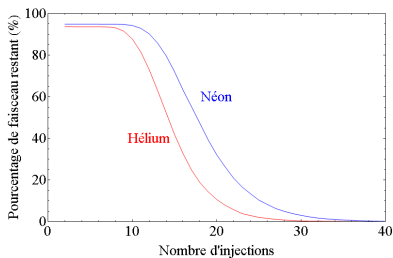
# Pertes liées au système d'injection

## ① Injection à $\delta = 5\text{‰}$ .

- ⇒ Déformation du faisceau injecté après un quart de tour synchrotron.
- ⇒ Une partie du faisceau injecté n'est pas capturée par le système RF.
- ⇒ **Formation d'un halo.**

## ② Gonflement dans l'espace $(I, \delta)$ injection après injection.

- ⇒ Après 15-20 injections, les ions ne sont plus acceptés.



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

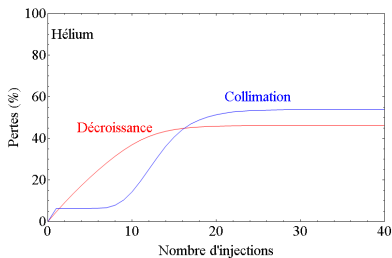
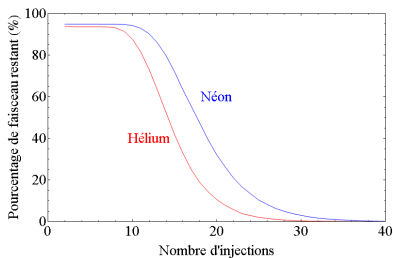
# Pertes liées au système d'injection

## ① Injection à $\delta = 5\text{‰}$ .

- ⇒ Déformation du faisceau injecté après un quart de tour synchrotron.
- ⇒ Une partie du faisceau injecté n'est pas capturée par le système RF.
- ⇒ Formation d'un halo.

## ② Gonflement dans l'espace $(I, \delta)$ injection après injection.

- ⇒ Après 15-20 injections, les ions ne sont plus acceptés.



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

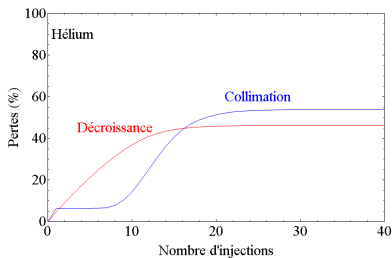
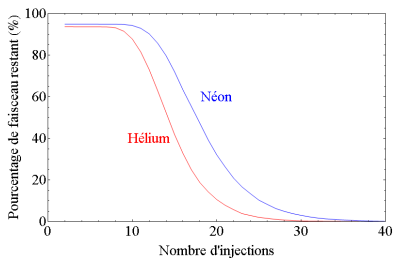
# Pertes liées au système d'injection

## ① Injection à $\delta = 5\text{‰}$ .

- ⇒ Déformation du faisceau injecté après un quart de tour synchrotron.
- ⇒ Une partie du faisceau injecté n'est pas capturée par le système RF.
- ⇒ Formation d'un halo.

## ② Gonflement dans l'espace $(I, \delta)$ injection après injection.

- ⇒ Après 15-20 injections, les ions ne sont plus acceptés.



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

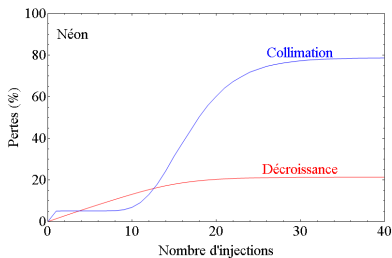
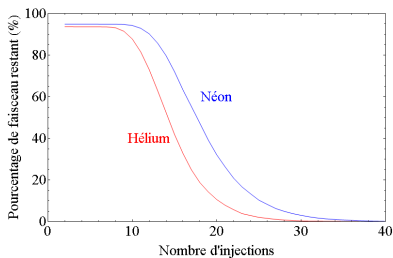
# Pertes liées au système d'injection

## 1 Injection à $\delta = 5\text{‰}$ .

- ⇒ Déformation du faisceau injecté après un quart de tour synchrotron.
- ⇒ Une partie du faisceau injecté n'est pas capturée par le système RF.
- ⇒ Formation d'un halo.

## 2 Gonflement dans l'espace $(I, \delta)$ injection après injection.

- ⇒ Après 15-20 injections, les ions ne sont plus acceptés.



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

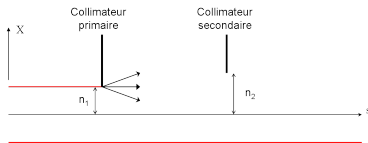
Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Principe du système de collimation

La puissance moyenne collimatée dans l'anneau est alors de **74 kW** pour l' ${}^6\text{He}^{2+}$  et atteint **248 kW** pour le  ${}^{18}\text{Ne}^{10+}$ .

⇒ Collimation à plusieurs étages en utilisant un collimateur primaire comme diffuseur et des collimateurs secondaires pour collecter les ions diffusés.



2 endroits possibles pour la section de collimation :

- 1 section d'injection dans l'arc : Dispersion normalisée élevée MAIS aimants supraconducteurs à proximité : **À ÉVITER.**
- 2 longue section droite ne pointant pas vers le détecteur : Très large place pour une insertion avec aimants chauds + Liberté d'optimiser la section.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

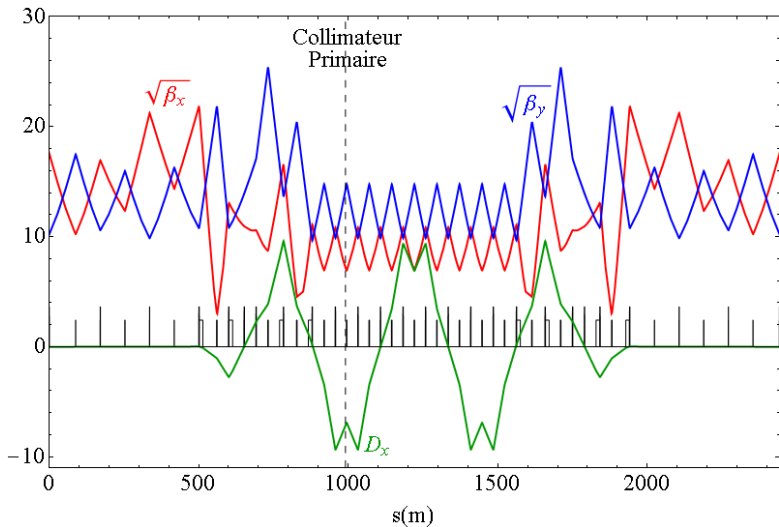
Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Optique de la section de collimation

- Plan
- Principe d'une usine à neutrinos
- Paramétrage des  $\beta$ -beams
- Pertes par décroissance  $\beta$
- Pertes liées au système d'injection
- Stabilité transverse du faisceau
- Conclusion



# Plan

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- 1 Principe d'une usine à neutrinos
- 2 Paramétrage des  $\beta$ -beams
- 3 Pertes par décroissance  $\beta$
- 4 Pertes liées au système d'injection
- 5 Stabilité transverse du faisceau**
- 6 Conclusion

# Pourquoi une correction de la chromaticité

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

Chromaticités naturelles dans l'anneau :

$$\xi_x = -1.667 \text{ et } \xi_y = -2.347$$

Point de fonctionnement dans l'anneau :

$$\nu_x = 22.23 \text{ et } \nu_y = 12.16$$

Dispersion en énergie du faisceau :

$$\delta = \pm 2.5\text{‰}$$

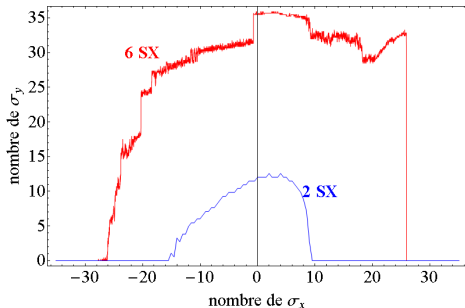
Variations du nombre d'onde dues à l'énergie :

$$\Delta\nu_x = \mp 0.093 \text{ et } \Delta\nu_y = \mp 0.071$$

⇒ Les variations sur les nombres d'onde nécessitent une correction de la chromaticité. Nécessité d'ajouter des hexapôles dans les régions dispersives de l'anneau.



# Ouverture dynamique sans défaut



Cas du Néon

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \epsilon_x} \approx 2 \text{ mm.}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\beta_y \epsilon_y} \approx 0.9 \text{ mm.}$$

$$\epsilon_x = 0.22 \text{ mm.mrad.}$$

$$\epsilon_y = 0.22 \text{ mm.mrad.}$$

Après compensation des résonances de troisième ordre et correction de la chromaticité, l'ouverture dynamique obtenue est très large.

6 familles de sextupôles ont été utilisées.

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

# Défauts multipolaires systématiques dans les dipôles

Les dipôles sont à large ouverture (16 cm). Le design des dipôles ne peut être parfait et des erreurs de champ multipolaires sont présentes.

La symétrie du dipôle fait que les défauts d'ordre pair sont en moyenne nuls.

*C. Vollinger, E. Wildner*

Multipôles	$b_n (10^{-4})$	$K_n L = \frac{b_n \theta}{R^{n-1}} (m^{1-n})$
1 (champ principal)	$10^4$	$\theta = \frac{\pi}{86} \text{ rad}$
3	-1.68	-0.00171
5	33.02	9.307
7	-50.12	-3924.5
9	29.58	643400

Influence sur l'ouverture dynamique ?

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

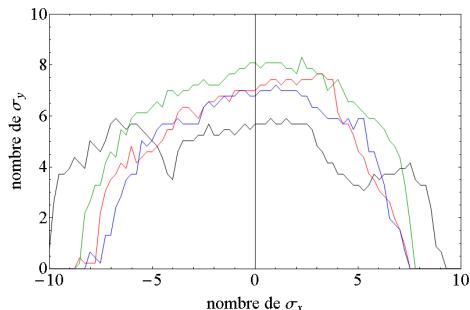
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Effets des défauts multipolaires sur l'ouverture dynamique



Cas du Néon

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \epsilon_x} \approx 2 \text{ mm}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\beta_y \epsilon_y} \approx 0.9 \text{ mm}$$

**—**  $n = 5$

**—**  $n = 7$

**—**  $n = 9$

**—** tous les multipôles

L'ouverture dynamique décroît fortement, principalement à cause des multipôles d'ordre 5 et 7.

Il est nécessaire d'élargir l'ouverture dynamique en présence des défauts multipolaires.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

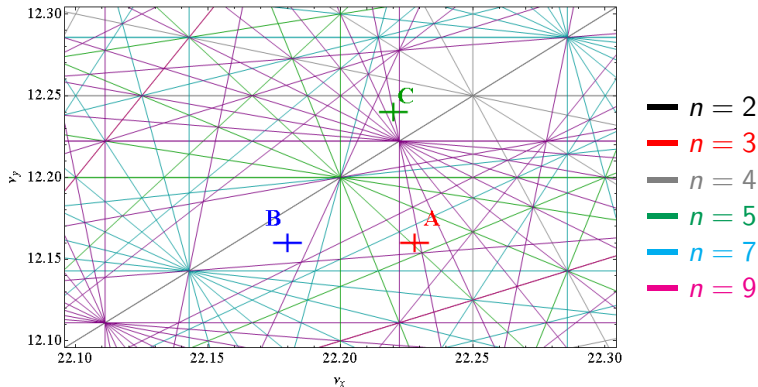
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Diagramme du nombre d'onde et résonances



Plusieurs points de fonctionnement ont été comparés pour minimiser les effets multipolaires sur la stabilité transverse du faisceau.

Cas 1  $\nu_x = 22.228, \nu_y = 12.16$

Cas 3  $\nu_x = 22.22, \nu_y = 12.24$

Cas 2  $\nu_x = 22.18, \nu_y = 12.16$

# Principe de l'optimisation

"Algorithm for chromatic sextupole optimization and dynamic aperture increase", E. Lebichev, P. Piminov, EPAC06

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

## But :

Trouver les forces pour les différentes familles (8) de sextupôles chromatiques afin d'avoir la plus grande ouverture dynamique.

## Idée de base :

2 familles de sextupôles suffisent pour obtenir n'importe quelle chromaticité.

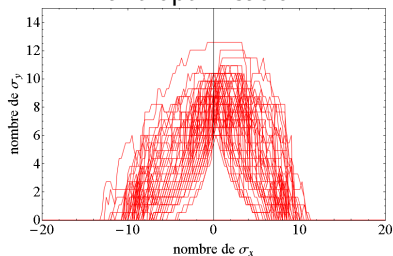
## Principe de l'algorithme :

La chromaticité est corrigée en  $N$  pas successifs.

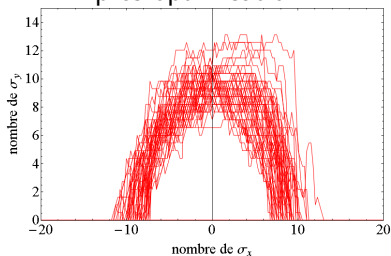
Sélection du "meilleur" couple de sextupôles à chaque étape (couple donnant la chromaticité voulue et avec la plus large ouverture dynamique).

# Exemple d'application

Avant optimisation :



Après optimisation :



L'exemple a été réalisé pour des jeux aléatoires de défauts décapolaires dans les dipôles.

Le test montre une amélioration sur l'ouverture dynamique pour une grande partie des cas et une réduction sur la dispersion sur l'ouverture dynamique.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

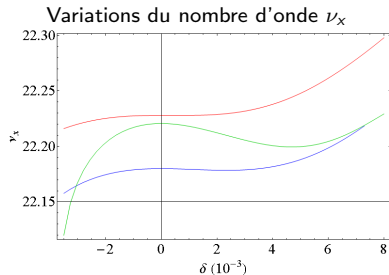
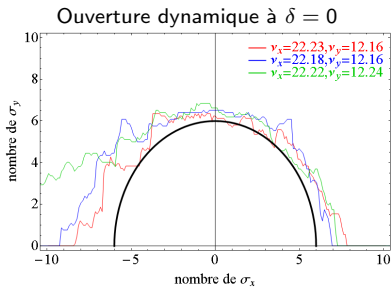
Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

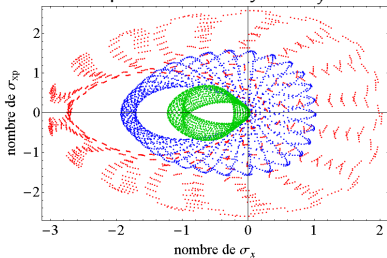
Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Ouvertures dynamiques à différents $\delta$



Positions successives prises par un ion  
d'amplitude initiale  $y = 5\sigma_y$



Le meilleur compromis entre les trois points de fonctionnement est le point  $\nu_x = 22.18$  et  $\nu_y = 12.16$  au regard du couplage entre les plans et de la gamme d'énergie considérée.

Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

Conclusion

# Plan

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- 1 Principe d'une usine à neutrinos
- 2 Paramétrage des  $\beta$ -beams
- 3 Pertes par décroissance  $\beta$
- 4 Pertes liées au système d'injection
- 5 Stabilité transverse du faisceau
- 6 Conclusion

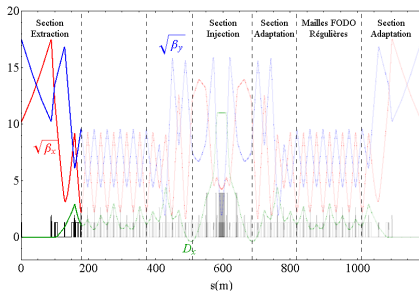


# BILAN

**BUT** : Concevoir un anneau de stockage pour les  $\beta$ -beams et étudier ses propriétés.

Des solutions pour faire face au dépôt des produits de décroissance ont été proposées :

- Section d'extraction à l'entrée des arcs.
- Insertion d'absorbeurs dans les arcs.



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

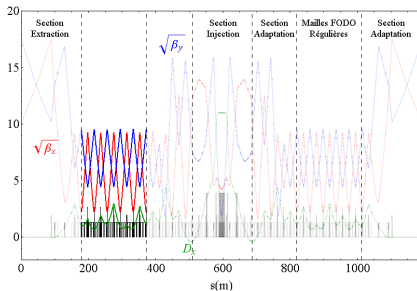
Conclusion

# BILAN

**BUT** : Concevoir un anneau de stockage pour les  $\beta$ -beams et étudier ses propriétés.

Des solutions pour faire face au dépôt des produits de décroissance ont été proposées :

- Section d'extraction à l'entrée des arcs.
- Insertion d'absorbeurs dans les arcs.



Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

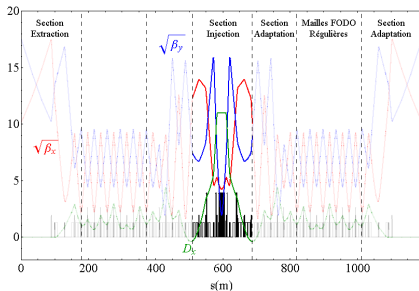
Conclusion

# BILAN II

Le système d'injection a également été développé :

- Réalisation d'une section dédiée dans l'un des arcs.
- Étude du système RF et du mélange des deux faisceaux.
- Évaluation des pertes liées à ce système.

Ceci a alors abouti à définir un système de collimation en énergie pour l'anneau.



Plan

Principe d'une usine à neutrinos

Paramétrage des  $\beta$ -beams

Pertes par décroissance  $\beta$

Pertes liées au système d'injection

Stabilité transverse du faisceau

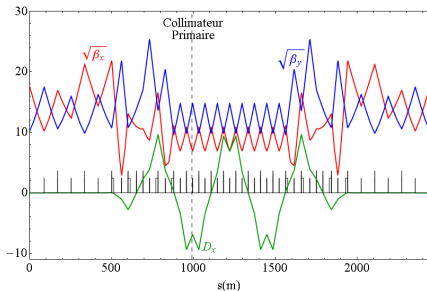
Conclusion

# BILAN II

Le système d'injection a également été développé :

- Réalisation d'une section dédiée dans l'un des arcs.
- Étude du système RF et du mélange des deux faisceaux.
- Évaluation des pertes liées à ce système.

Ceci a alors abouti à définir un système de collimation en énergie pour l'anneau.



# BILAN III

Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

Une optique de l'anneau a alors été réalisée et ses propriétés ont été évaluées.

## **En l'absence de défauts :**

Les propriétés aux premier et second ordres sont suffisantes.

## **En présence de défauts multipolaires :**

Besoin d'élargir l'ouverture dynamique.

⇒ Un algorithme automatique d'optimisation de l'ouverture dynamique a été réalisé.

⇒ Plusieurs points de fonctionnement ont été testés afin de limiter l'effet des résonances multipolaires.

# Perspectives

## Plan

Principe d'une  
usine à  
neutrinos

Paramétrage  
des  $\beta$ -beams

Pertes par  
décroissance  $\beta$

Pertes liées au  
système  
d'injection

Stabilité  
transverse du  
faisceau

Conclusion

- Réaliser des simulations de transport de faisceau dans la section de collimation. L'interaction avec les collimateurs devra être simulée.
- Poursuivre les études sur les défauts de champ dans les éléments et proposer des solutions pour en réduire l'effet ainsi que des valeurs limites.
- Poursuivre les simulations de dépôt dans les éléments.
- Étudier l'impact des hautes intensités stockées sur la dynamique du faisceau (beam loading, impédances, ...).
- Donner une évaluation des erreurs permises sur les phases et tensions des cavités pour le programme RF.