DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Simulation de détermination de l'espace de phase du faisceau par la méthode de variation des gradients dans l'accélérateur prototype d'IFMIF

Séminaire SACM | Romain Scherer

Tuteur P.A.P Nghiem

31 AOÛT 2012

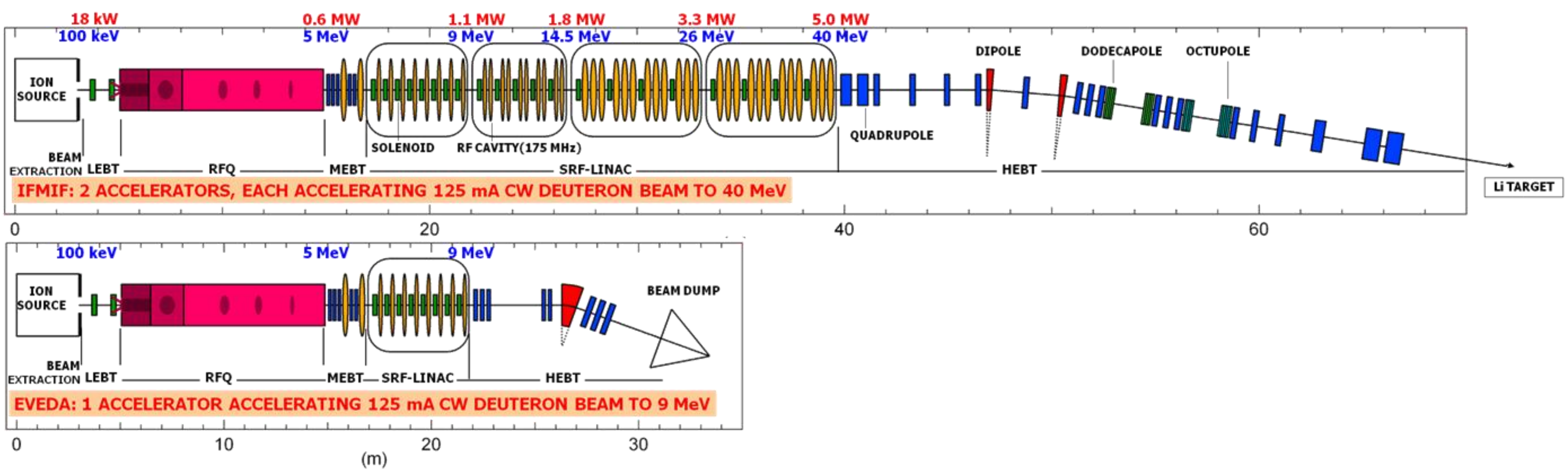
SOMMAIRE

LE LIPAc

LE LIPAc

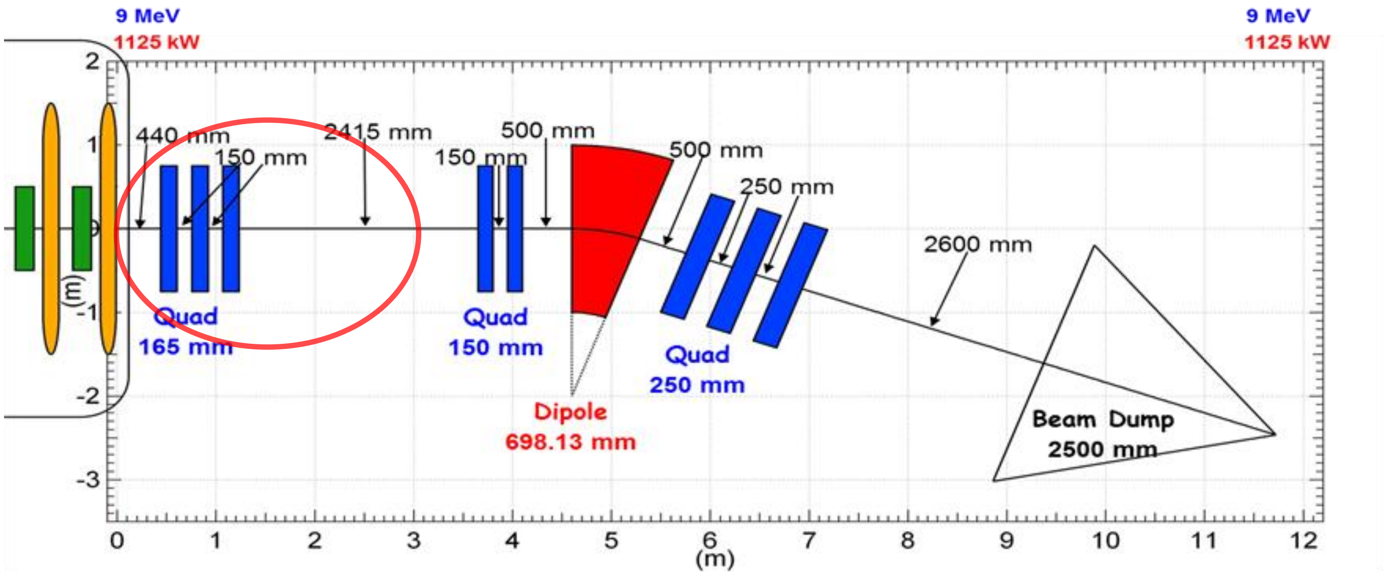
- Caractéristiques nominales du faisceau :

IFMIF	LIPAc
125 mA	125 mA
40 MeV	9 MeV
5 MW	1,1 MW



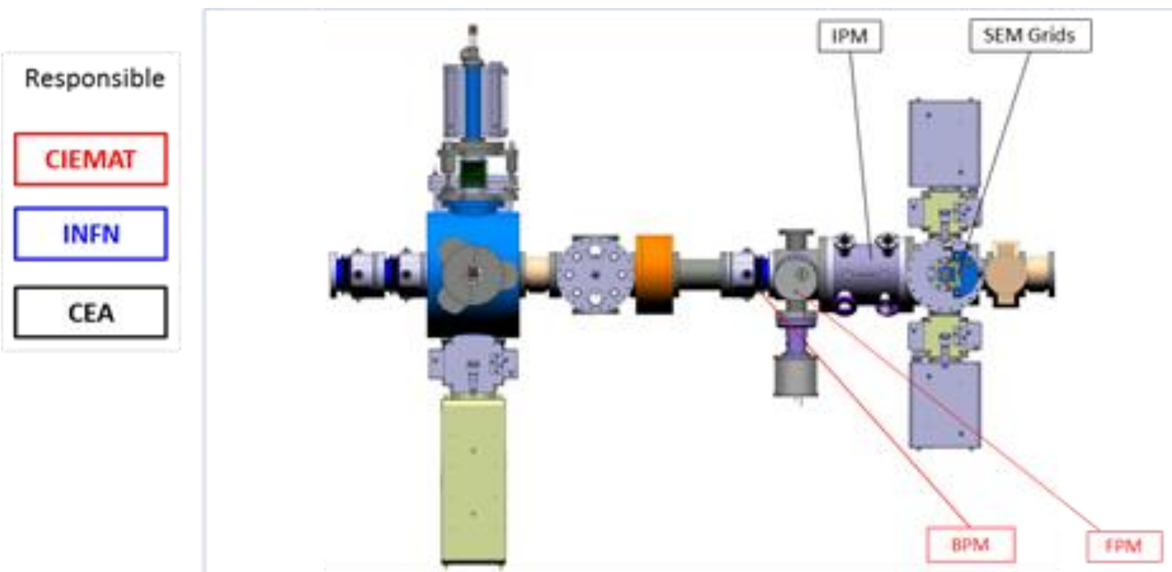
La ligne HEBT

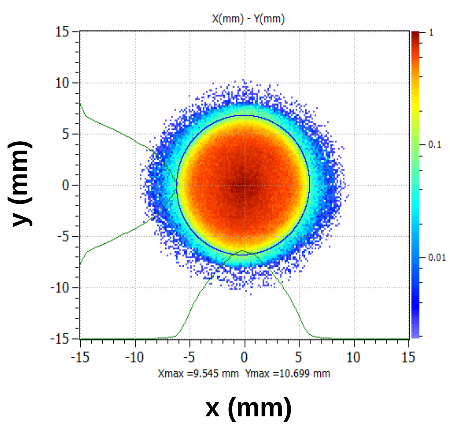
- Etude réalisée de 0 à 3m
- Faisceau :
  - 125 mA
  - 9 MeV
  - 1,1 MW



D-Plate (Diagnostics Plate)

- Mesure du profil du faisceau :
  - IPM (Ionization Profile Monitor)
  - FPM (Fluorescence Profile Monitor)





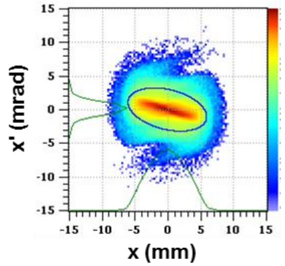
Profil faisceau mesuré

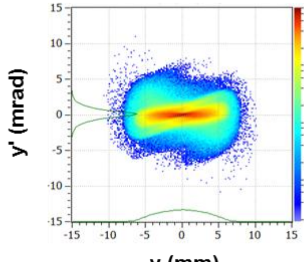
METHODE DE VARIATION DES GRADIENTS (ETAT DE L'ART)

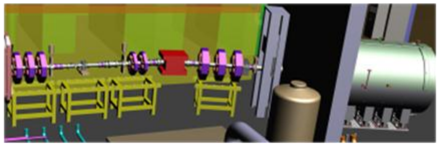
METHODE DE VARIATION DES GRADIENTS (ETAT DE L'ART)

- Possible avec la puissance nominale du faisceau
- Sans interception
- Permet de décrire le faisceau dans l'espace de phase à 4D

→ Méthode de variation des gradients

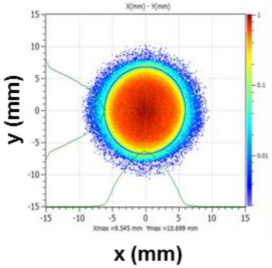






Variation de G sur l'accélérateur

Minimum 3 Gradients



2 Paramètres mesurés σx, σy par Gradient

6 Paramètres de Twiss à déterminer α, β, ε

METHODE DE VARIATION DES GRADIENTS (ETAT DE L'ART)

- Contrainte :

  Cas fortement non linéaire car la charge d’espace est prépondérante.
  Les équations du transport deviennent non linéaires.
  La méthode d'inversion matricielle n'est pas satisfaisante.

- Solution :

  - Utilisation d’un code de transport multiparticule, TraceWin.
  - Développement d’un code d’optimisation.

« inversion numérique » (au lieu d’une inversion matricielle)

<u>Charge d’espace :</u>

Ensemble des charges des ions de même signe se repoussant entre eux.

Opposée aux forces de focalisation.

METHODE DE VARIATION DES GRADIENTS (ETAT DE L'ART)

- Contrainte :

Les paramètres de Twiss ne suffisent pas à décrire le faisceau lors d'un transport non linéaire

- Solution :
  - Décrire le faisceau avec plus de paramètres
  - Limitation du nombre de paramètres pour l'algorithme d'inversion

DESCRIPTION PARAMÉTRIQUE DU FAISCEAU

DESCRIPTION PARAMÉTRIQUE DU FAISCEAU

- Espace de phase à 4D (x, x', y, y'):
  - Position des particules : (x, y)
  - Angle du vecteur vitesse : (x'=dx/dz, y'=dy/dz)

- Ellipse de concentration :

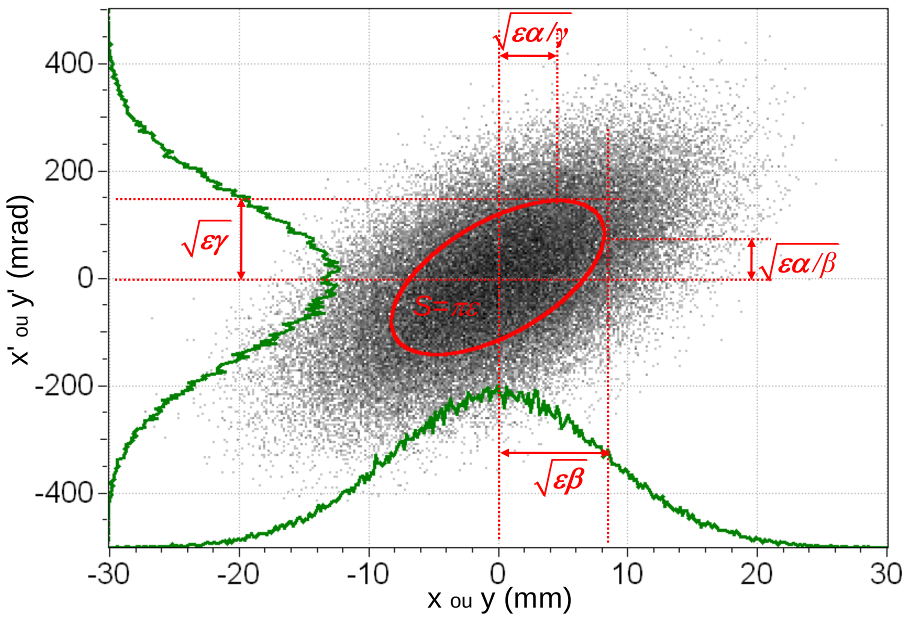
$$\langle x^2 \rangle = \varepsilon\beta$$

$$\langle x'^2 \rangle = \varepsilon\gamma$$

$$\langle xx' \rangle = \varepsilon\alpha$$

$$\varepsilon = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

Distribution construite avec TraceWin : Gaussienne tronquée à 6σ, ε = 10, α = -0.7, β = 0.07



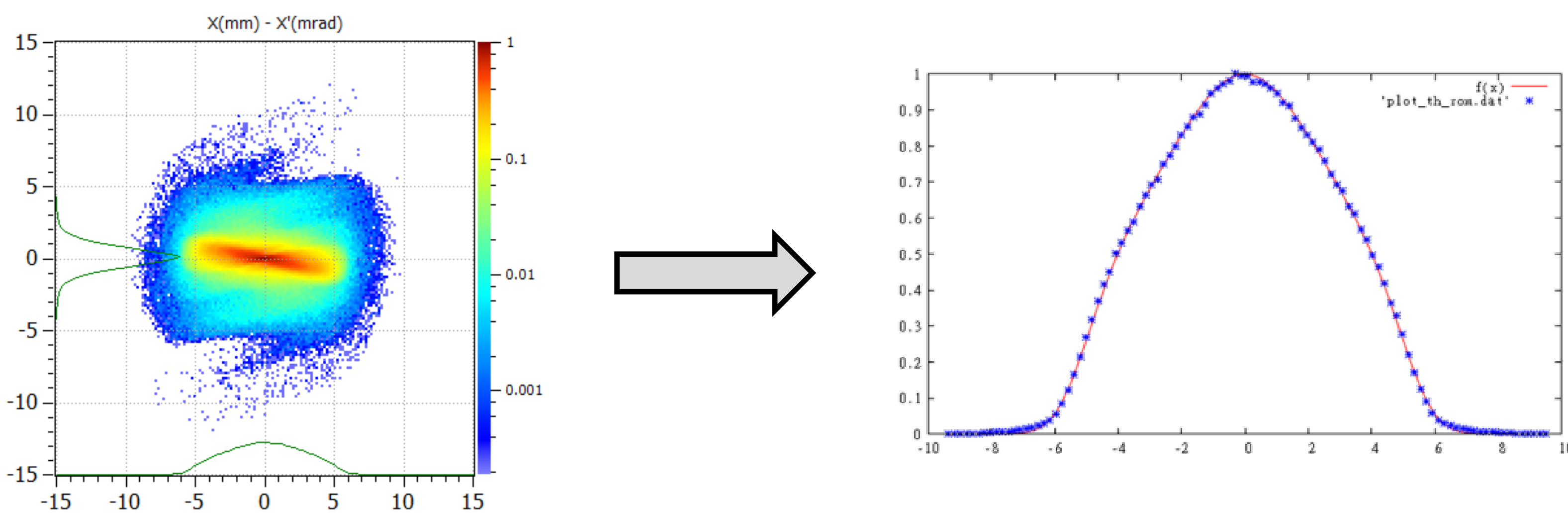
<u>Paramètres de Twiss :</u> α, β, γ

<u>Emittance :</u> ε

DESCRIPTION PARAMÉTRIQUE DU FAISCEAU

- Fit des projections de la densité de particules avec :
  - Une somme de gaussienne et de gaussienne généralisée

$$y = \frac{1}{2}\left[e^{-\left|\frac{x}{a}\right|^{b}} + e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^{2}}\right]$$



DESCRIPTION PARAMÉTRIQUE DU FAISCEAU

Les paramètres utilisés

- On cherche à représenter le faisceau (l'ensemble des particules) avec :
  - Les paramètres des ellipses de concentration α, β, ε projetés sur les plans (x, x'), (y, y')
  - Les paramètres des profils de densité a, b, c projeté sur les directions x, x', y, y'

- Au total : 18 paramètres.

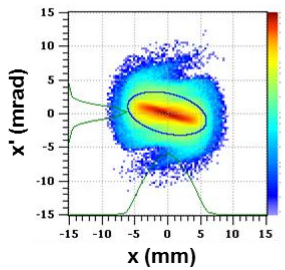
Axe x	a_x	b_x	c_x
Axe x'	a_x'	b_x'	c_x'
Plan xx'	α_x	β_x	ε_x
Axe y	a_y	b_y	c_y
Axe y'	a_y'	b_y'	c_y'
Plan yy'	α_y	β_y	ε_y

MÉTHODE DE VARIATION DES GRADIENTS (AMÉLIORÉE)

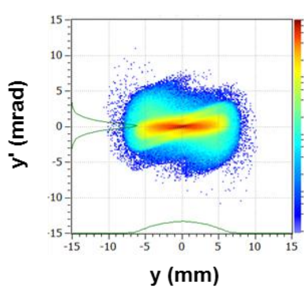
MÉTHODE DE VARIATION DES GRADIENTS (AMÉLIORÉE)

- Possible avec la puissance nominale du faisceau
- Sans interception
- Permet de décrire le faisceau dans l'espace de phase à 4D

→ Méthode de variation des gradients

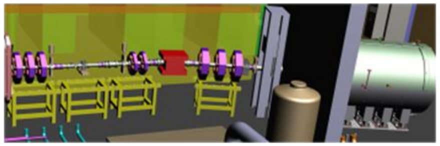


Distribution inconnue
>Paramètres d'entrée



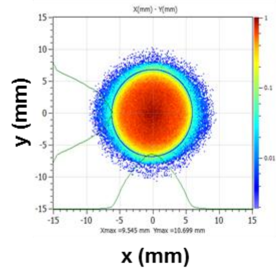
Distribution inconnue
>Paramètres d'entrée

18 Paramètres à déterminer



Variation de G sur l'accélérateur

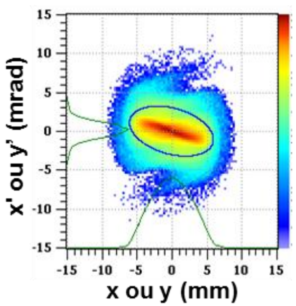
Minimum 3 Gradients



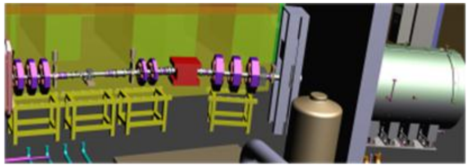
Profil faisceau mesuré

6 Paramètres mesurés par Gradient

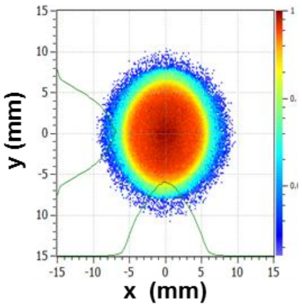
MÉTHODE DE VARIATION DES GRADIENTS (AMÉLIORÉE)



Distribution inconnue
>Paramètres d'entrée



Variation de G sur l'accélérateur



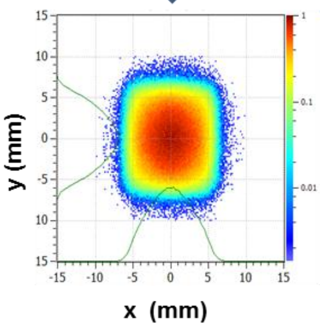
Profil faisceau mesuré

Comparaison des courbes

Valeurs initiales
>Paramètres initiaux

Modélisation du faisceau avec le code développé
Variation de G par le code TraceWin

Nouvelles valeurs
>Paramètres modifiés



Profil faisceau simulé

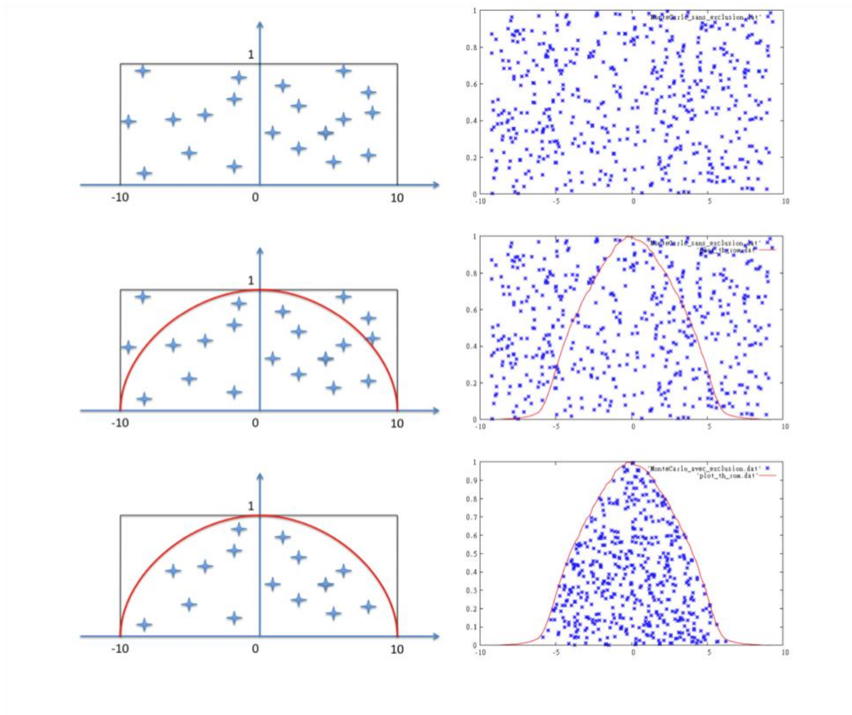
MODÉLISATION DU FAISCEAU

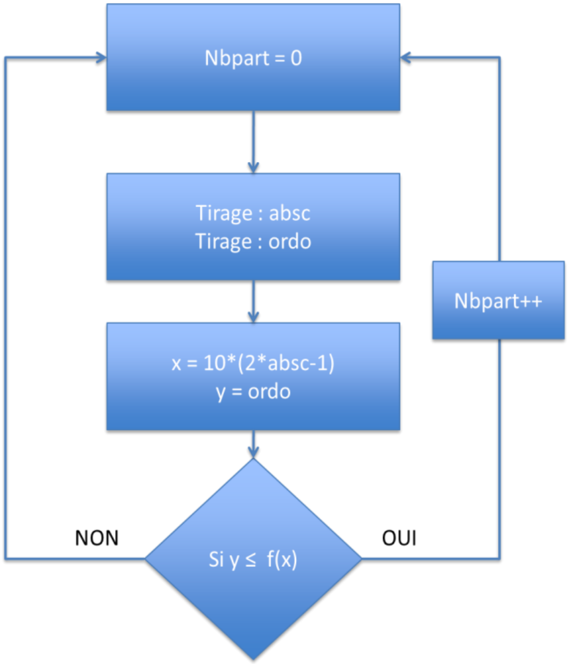
MODÉLISATION DU FAISCEAU

Tirage selon une fonction de densité de probabilité

- Méthode de Monte Carlo
- Tirage aléatoire des particules
  - Tirage uniforme dans un rectangle
  - Condition de densité de probabilité fixée par la somme de gaussienne et de gaussienne généralisée

$$f(x)=\frac{1}{2}\left[e^{-\left|\frac{x}{a}\right|^{b}}+e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^{2}}\right]$$





MODÉLISATION DU FAISCEAU

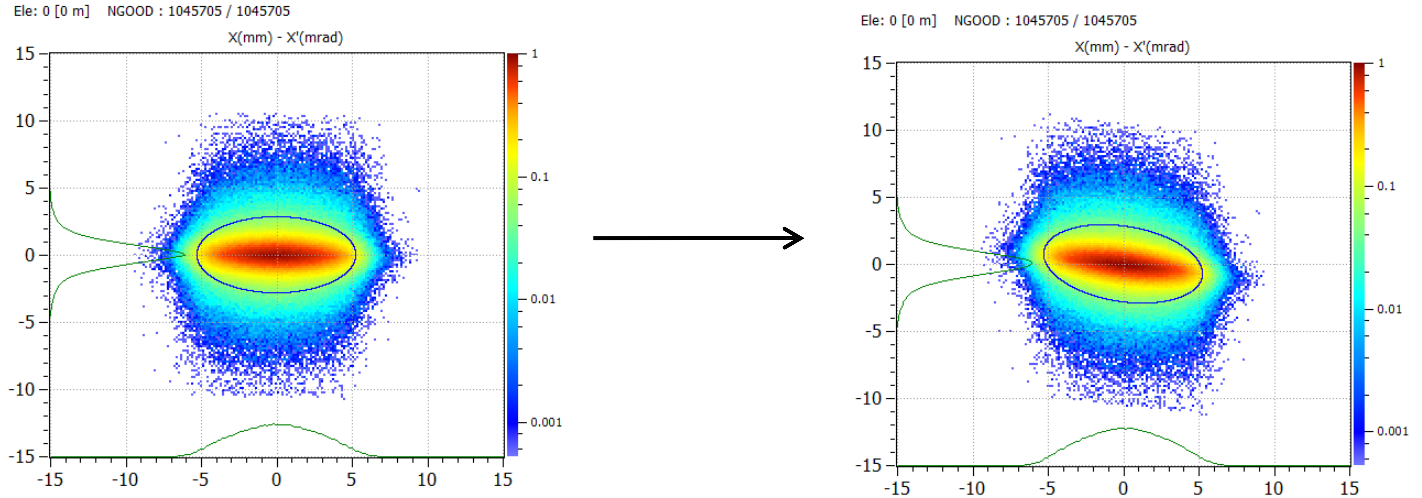
Méthode de Cholesky

- Donner les bons paramètres à l'ellipse de concentration sans changer les projections
  - Paramètres de Twiss (Inclinaison, taille)

- Pour une matrice A (symétrique définie positive), on cherche la matrice triangulaire inférieure L tel que $A=LL^T$

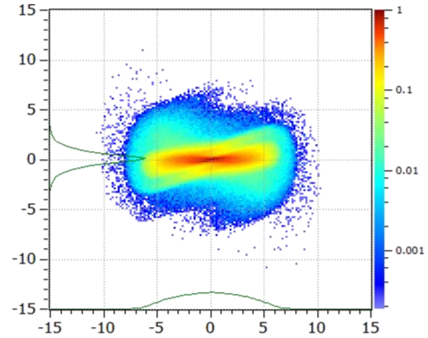
Matrice faisceau :

$$A = \begin{pmatrix} \beta_x\varepsilon_x & -\alpha_x\varepsilon_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_x\varepsilon_x & \gamma_x\varepsilon_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_y\varepsilon_y & -\alpha_y\varepsilon_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_y\varepsilon_y & \gamma_y\varepsilon_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_z\varepsilon_z & -\alpha_z\varepsilon_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_z\varepsilon_z & \gamma_z\varepsilon_z \end{pmatrix}$$

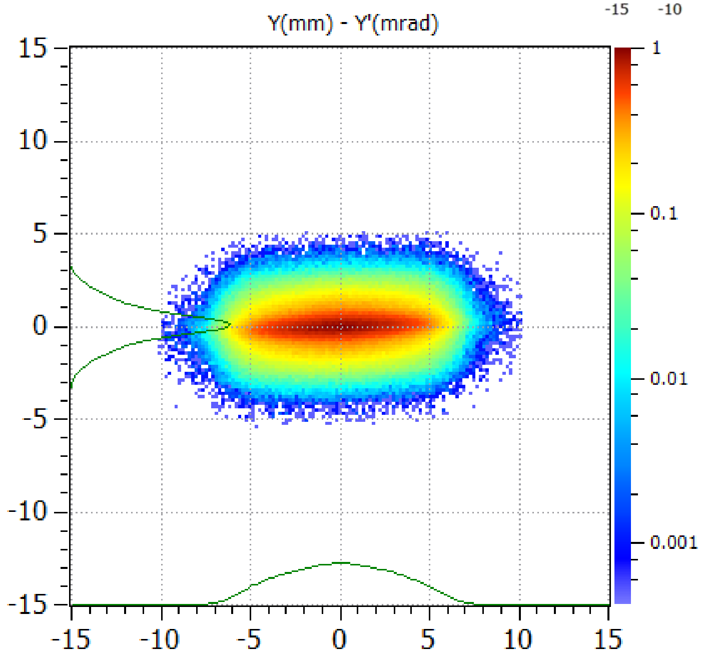


MODÉLISATION DU FAISCEAU

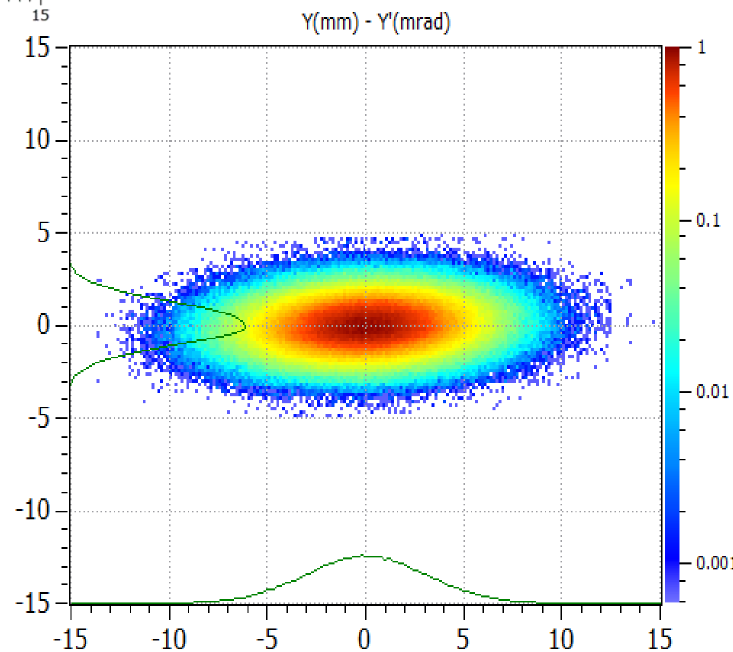
Résultats



Nominal



Somme : $f(x) = \frac{1}{2}\left[e^{-\left|\frac{x}{a}\right|^b} + e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^2}\right]$



Gaussienne : $f(x) = e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^2}$

Résultats

- Forme angulaire due à la fonction de densité de probabilité

Somme gaussienne et gaussienne généralisée

$$f(x) = \frac{1}{2}\left[e^{-\left|\frac{x}{a}\right|^{b}} + e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^{2}}\right] \qquad g(y) = \frac{1}{2}\left[e^{-\left|\frac{y}{a'}\right|^{b'}} + e^{-\left(\frac{y}{c'}\right)^{2}}\right]$$

$$\mathcal{N}(x) = \frac{1}{2}\left[e^{-\left|\frac{x}{a}\right|^{b}} + e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^{2}}\right] * \frac{1}{2}\left[e^{-\left|\frac{y}{a'}\right|^{b'}} + e^{-\left(\frac{y}{c'}\right)^{2}}\right]$$

$$= \boxed{\frac{1}{4}\left[e^{-\left|\frac{x}{a}\right|^{b}-\left|\frac{y}{a'}\right|^{b'}} + e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^{2}-\left(\frac{y}{c'}\right)^{2}} + e^{-\left|\frac{x}{a}\right|^{b}-\left(\frac{x}{c}\right)^{2}} + e^{-\left|\frac{y}{a'}\right|^{b'}-\left(\frac{y}{c'}\right)^{2}}\right]}$$

Gaussienne

$$f(x) = e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^{2}} \qquad g(y) = e^{-\left(\frac{y}{a'}\right)^{2}}$$

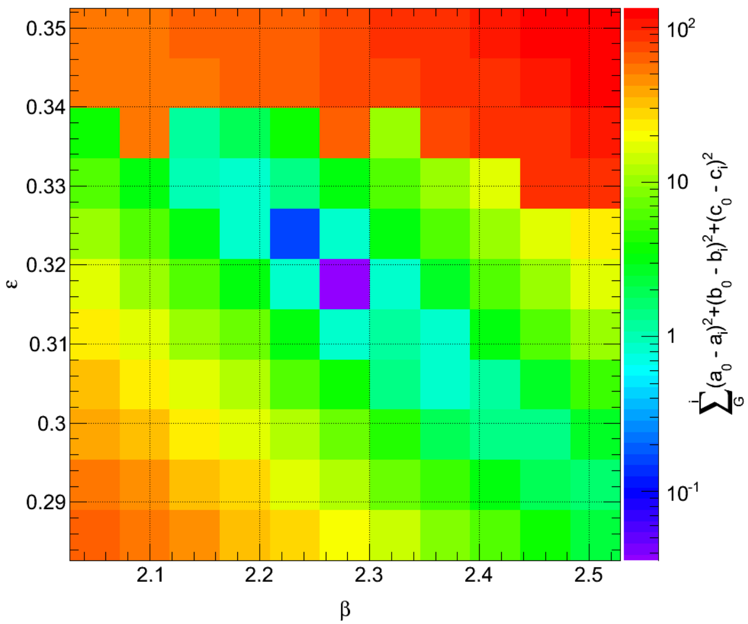
$$\mathcal{N}(x) = e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^{2}} * e^{-\left(\frac{y}{a'}\right)^{2}} = \boxed{e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^{2}-\left(\frac{y}{a'}\right)^{2}}}$$

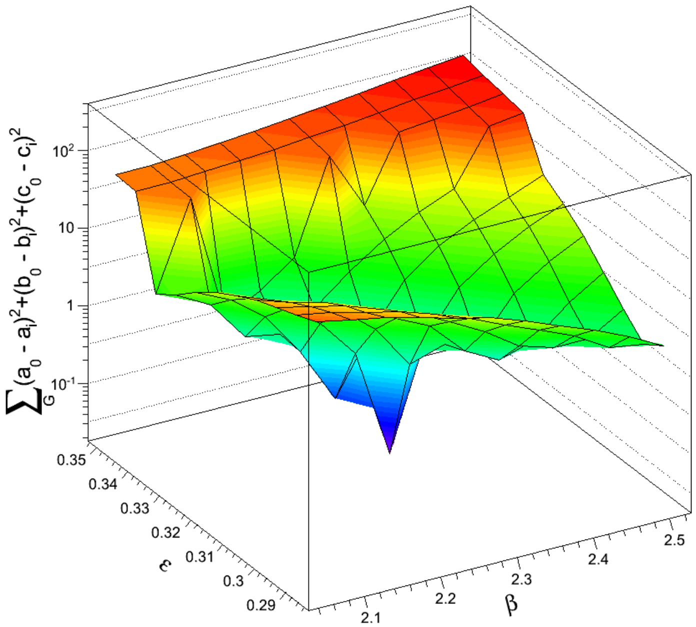
Ellipse : $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$

ETUDE DES PARAMÈTRES ET OPTIMISATION

Résultats

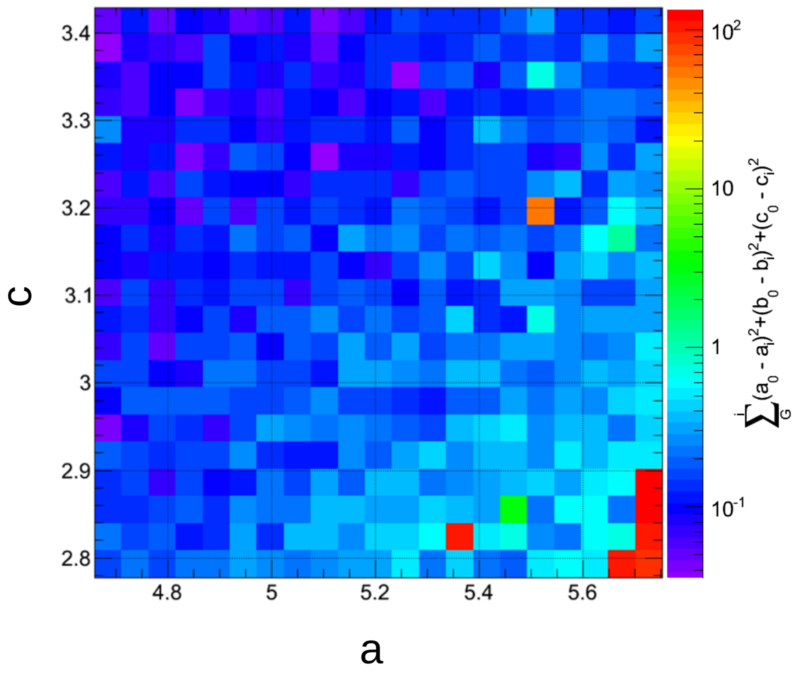
- Variation de beta et epsilon (avec alpha fixe et a, b, c fixes) dans le plan (xx') :

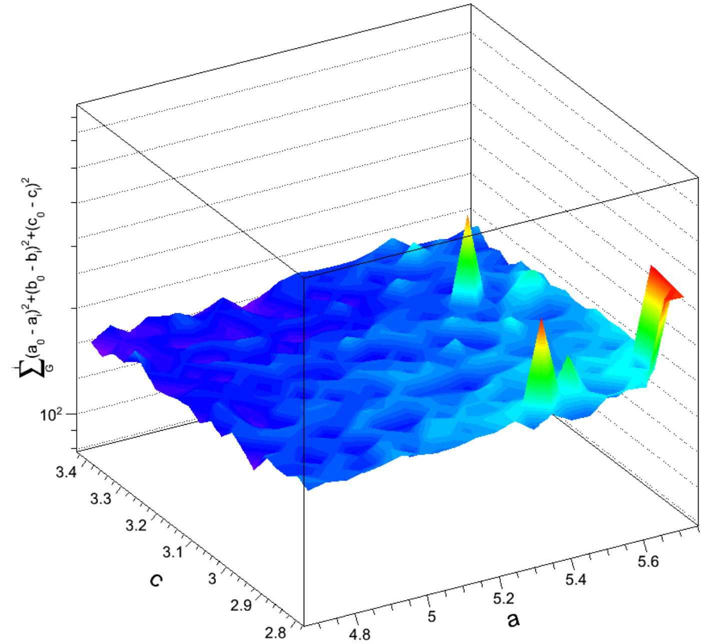




Résultats

- Variation de a et c (avec b fixe et ε, α ,β fixes) du profil en x:

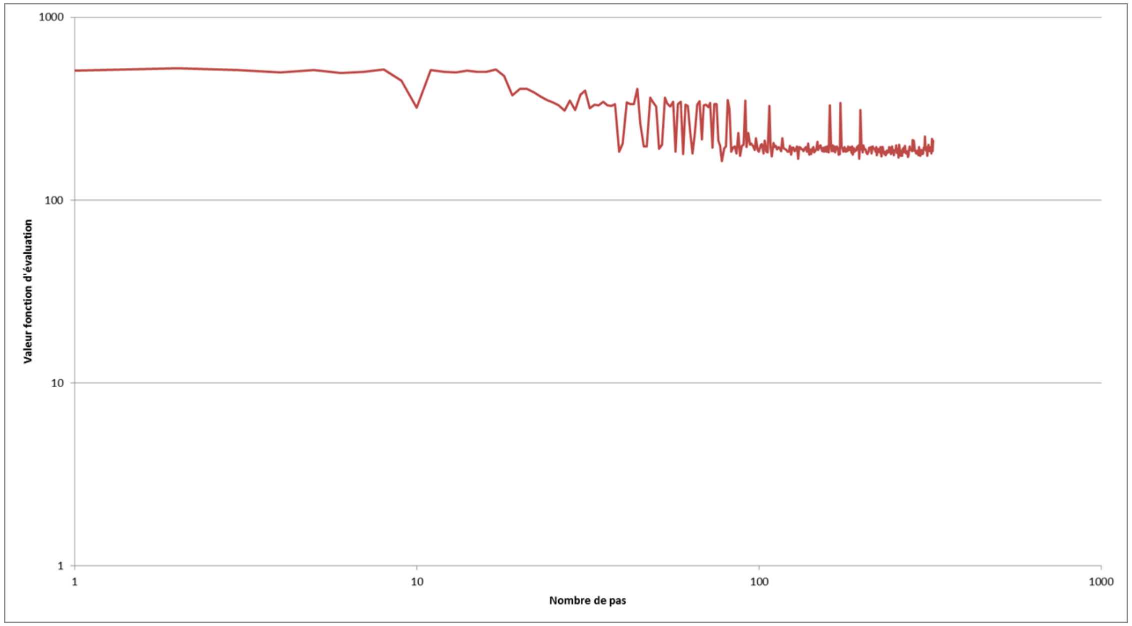




Résultats

- Algorithme d'optimisation : Simplex
- Fonction à minimiser : $F = \sum_{G}^{i} (a_0 - a_i)^2 + (b_0 - b_i)^2 + (c_0 - c_i)^2$

- Après 300 itérations :

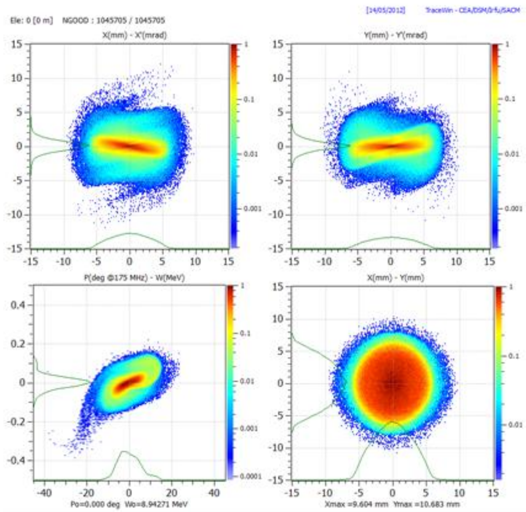


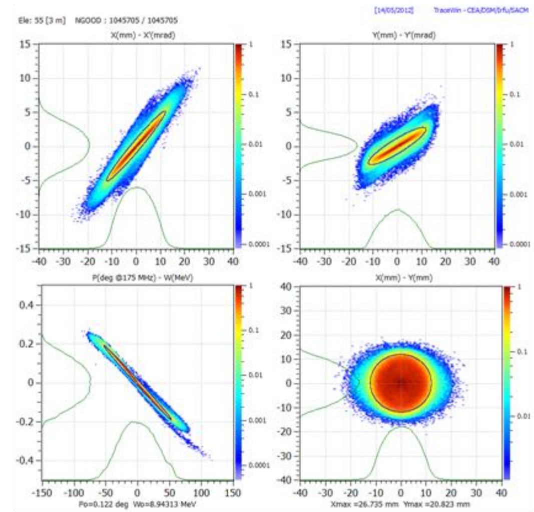
ETUDE DES PARAMÈTRES ET OPTIMISATION

En entrée

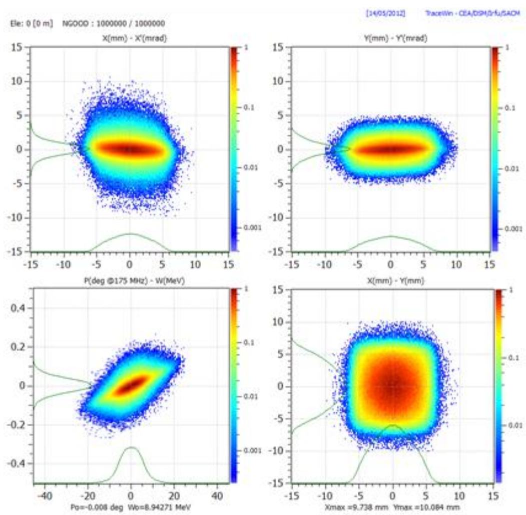
En sortie

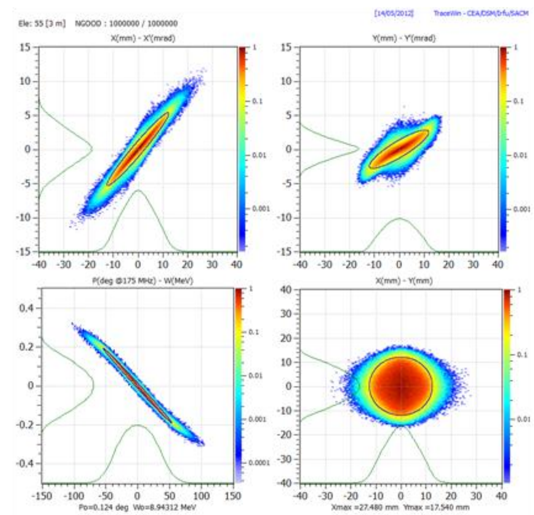
Nominal





Modélisation





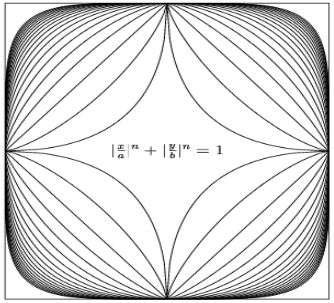
MODÉLISATION DU FAISCEAU (2ÈME MÉTHODE)

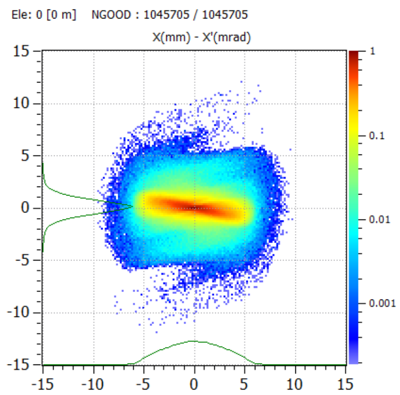
MODÉLISATION DU FAISCEAU (2ÈME MÉTHODE)

« super ellipse »

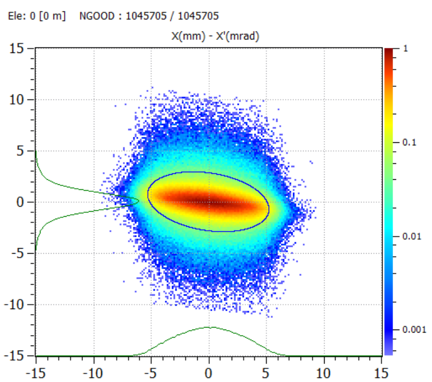
- Courbes de Lamé : $$\left(\frac{x}{a}\right)^n \pm \left(\frac{y}{b}\right)^n = 1 \qquad n > 0, a\,et\,b\,non\,nuls$$
- Cas particuliers, les super ellipses :

$$\left|\frac{x}{a}\right|^n \pm \left|\frac{y}{b}\right|^n = 1 \qquad n > 2, a\,et\,b\,non\,nuls$$

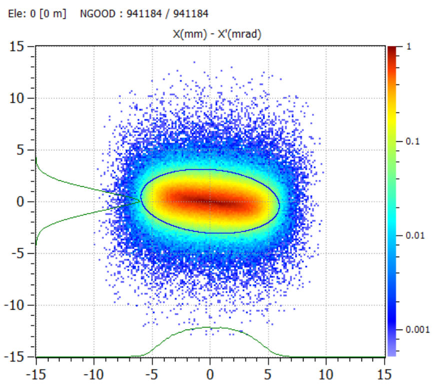




Nominal



1ère Méthode



2nd Méthode

Merci pour votre attention

Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Direction : DSM
Institut : IRFU
Service : SACM
Laboratoire : LEDA