

# Les spectromètres en physique nucléaire au GANIL

Le but de cet exposé est de donner un aperçu des *spectromètres* et de leur apport pour les expériences en physique nucléaire menées avec des faisceaux **d'ions lourds** au GANIL, et dont la finalité essentielle est la production et l'étude des noyaux exotiques.

Que doit-on mesurer lors d'une réaction nucléaire induite par des faisceaux d'ions lourds bombardant des cibles ?

Comment réalise t-on ces mesures? Avec quelle précision?

Quels sont les moyens mis en œuvre ?

Quelle est la contribution des spectromètres à la réponse à ces questions?

Sont introduits des éléments d'optique corpusculaire: matrice de transport, émittance d'un faisceau, acceptance et résolution d'un système, ainsi que les composants de base des spectromètres que sont les dipôles et quadripôles.....

Ensuite, est abordé comme application le spectromètre LISE l'un des outils dédié à la production des noyaux exotiques et des faisceaux secondaires. Les différentes techniques de sélection, de filtrage des noyaux, incluant un filtre de vitesse de type 'filtre de Wien' sont alors explicitées

Enfin, sont dits quelques mots sur SPEG un spectromètre haute résolution.

*Remarque: Cette revue généraliste qui aborde VAMOS, LISE et SPEG, les trois spectromètres des aires d'expériences du GANIL n'est en aucun cas un cours exhaustif sur l'optique des spectromètres.*

*(Certaines diapos ont été empruntées à des collègues et amis dont les exposés sont mentionnés dans les 'références', diapo. 124).*



**SPEG**

Ions Lourds,  
 $E = \sim 0.5A - 95A \text{ MeV}$

**VAMOS**

**SPIRAL**

**LISE**

**SISSI**

produits « en vol »

Faisceaux radioactifs  
 $E = \sim 20A - 80A \text{ MeV}$

**ALPHA**

cyclotrons  
accélérateurs  
d'ions lourds

**spectromètres**

sources

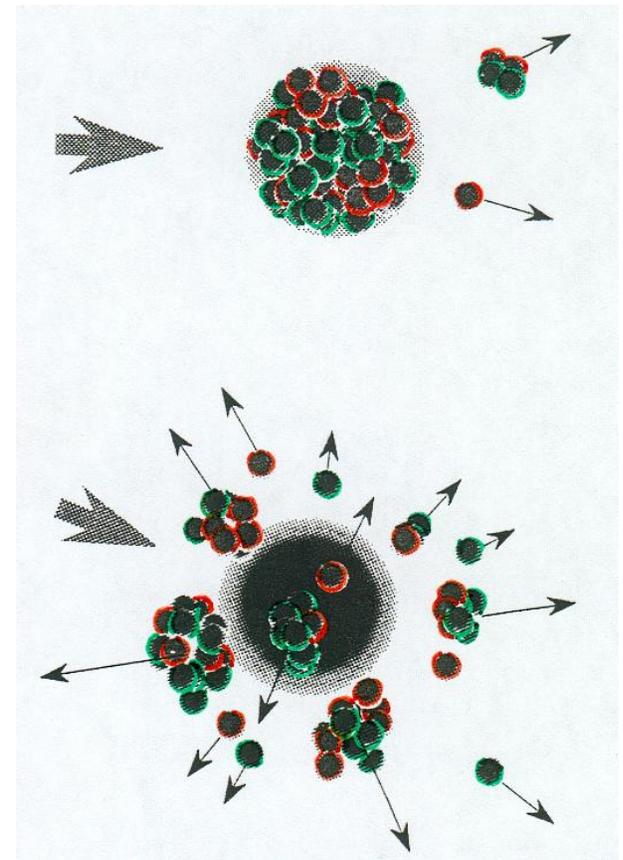
**ISOL**

$E = \sim 1.7A - 25A \text{ MeV}$

# GANIL, laboratoire de Physique nucléaire

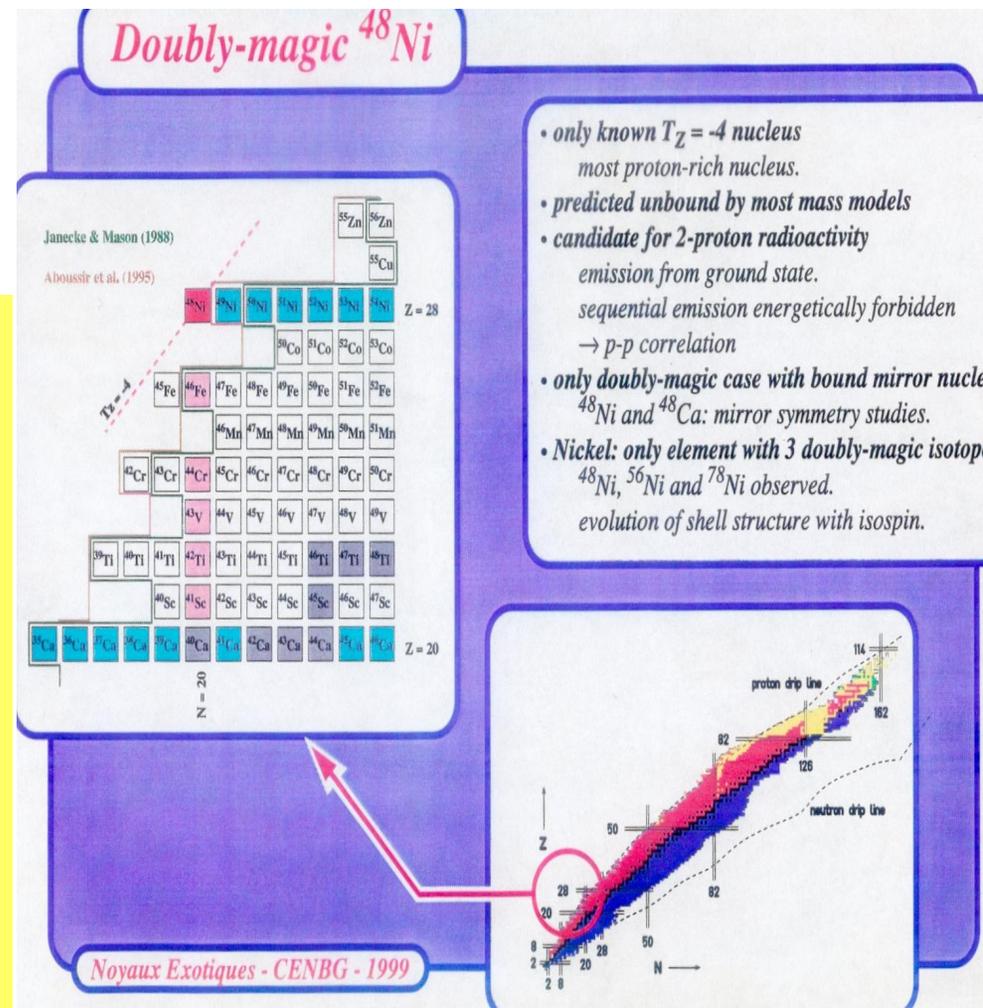
# Les objectifs des expériences en physique nucléaire

- Déterminer les propriétés d'un objet :  
ici le **noyau**
- Pour observer un noyau, on l'éclaire ou on l'écoute
  - **Eclairer** : exemple de la diffusion d'un projectile sur un noyau cible
  - **Ecouter** : détecter ce qu'émet l'objet
    - Il peut être naturellement radioactif (exemple de la radioactivité à 2 protons)
    - Il peut avoir été sollicité (excité) : exemple des noyaux chauds ou des noyaux exotiques
  - Dans tous les cas, on doit détecter **des particules** ou rayonnements émis



# Pour être plus précis, au Ganil, on veut...

- **Déterminer les propriétés d'un noyau exotique**
  - mesurer précisément sa masse
  - déterminer ses niveaux d'énergie
    - → sa forme
    - → sa structure (noyau magique, limite de stabilité, radioactivité nouvelle, ....)
- **Déterminer les propriétés d'un noyau chaud**
  - comment se désexcite-t-il ?
  - bout-il ?
  - quelles sont les propriétés de la matière qui le constitue (équation d'état)
- Connaître les mécanismes de réaction permettant de fabriquer ces objets afin de mieux maîtriser le « mécano » nucléaire



# des spécialisations ou/et des compromis sont nécessaires

- Noyaux :

- incompatibilité « résolution en énergie » – « angle solide »

- résolution → aimant ( $\Delta E/E = \text{quelques } 10^{-4} \text{ ou qq } 10^{-5}$ )

- Spectromètre **SPEG**

- Spectromètre **LISE**

- NECESSAIRE POUR LES ETUDES DE STRUCTURE

- taille → nombreux détecteurs discrets ( $\Delta E/E = 10^{-2} \text{ à qq } 10^{-3}$ )

- INDRA

- MUST

- NECESSAIRE POUR REACTIONS COMPLEXES

- NECESSAIRE POUR REACTIONS RARES

- Spectromètre **VAMOS**, le compromis

- Gammas :

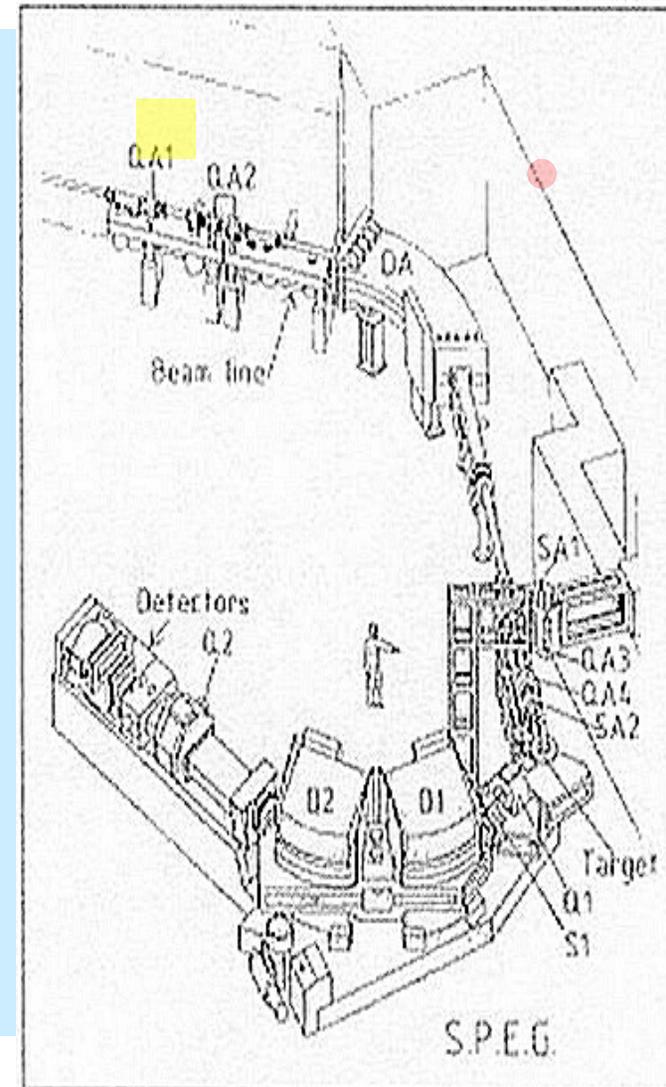
- EXOGAM (résolution en énergie privilégiée)

- TAPS (efficacité privilégiée)

- Neutrons :

- DEMON (résolution en énergie privilégiée)

- ORION (efficacité privilégiée)



# objet de l'étude: Le noyau de l'atome

Noyau = assemblage de protons et de neutrons

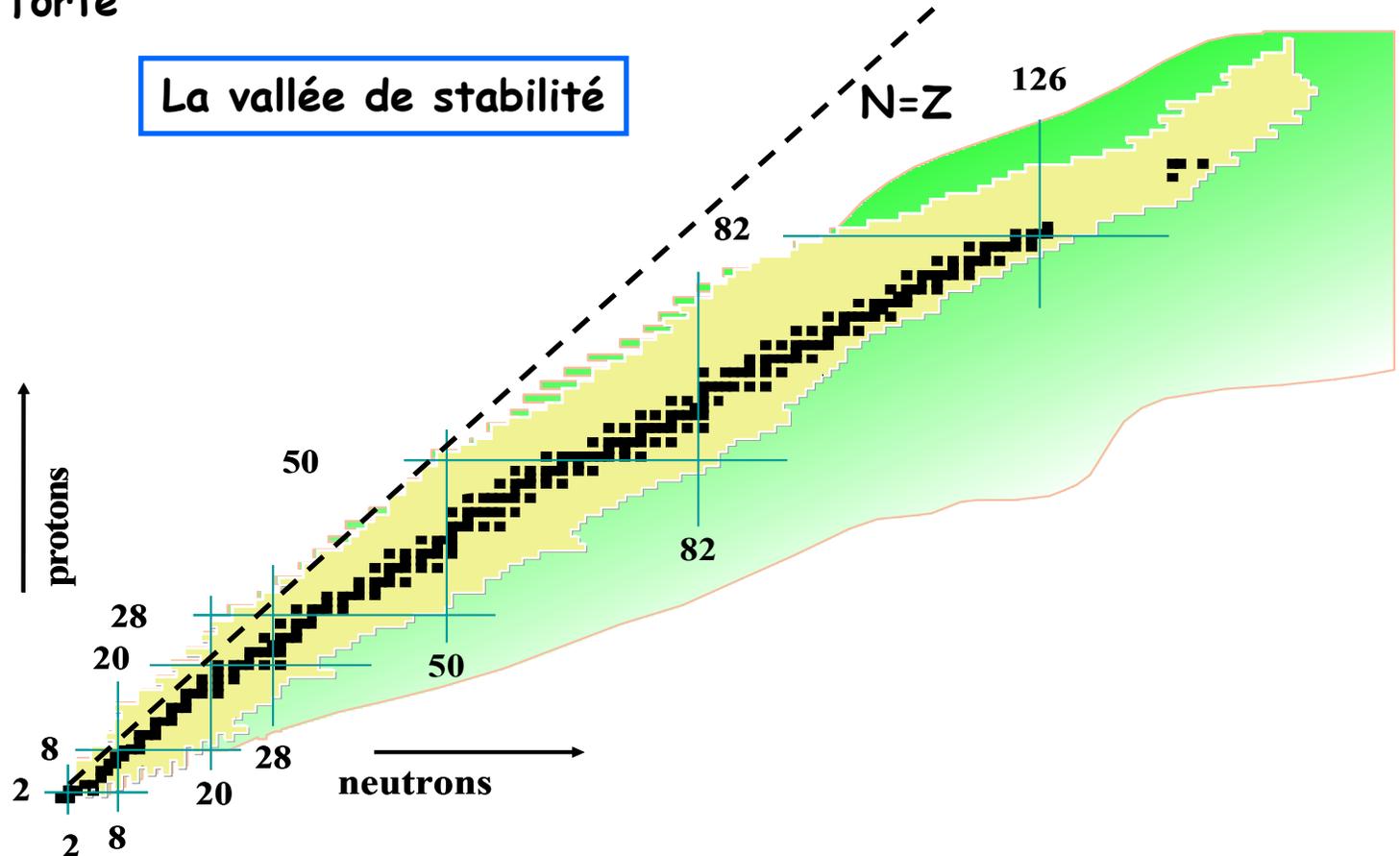


Interaction forte

Interaction Coulombienne

Interaction forte

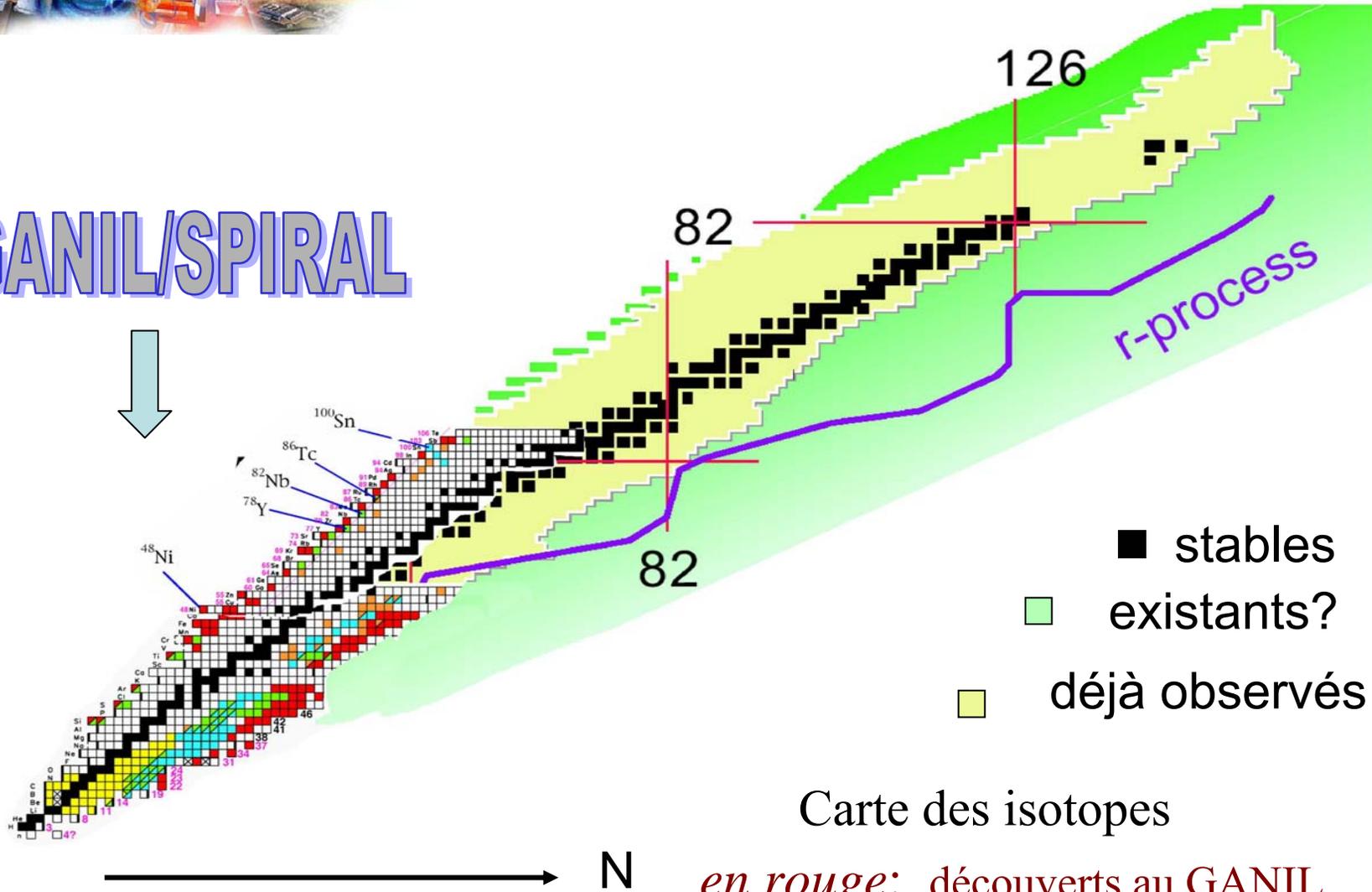
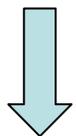
La vallée de stabilité





# GANIL/SPIRAL

Z  
↑



- stables
- existants?
- déjà observés

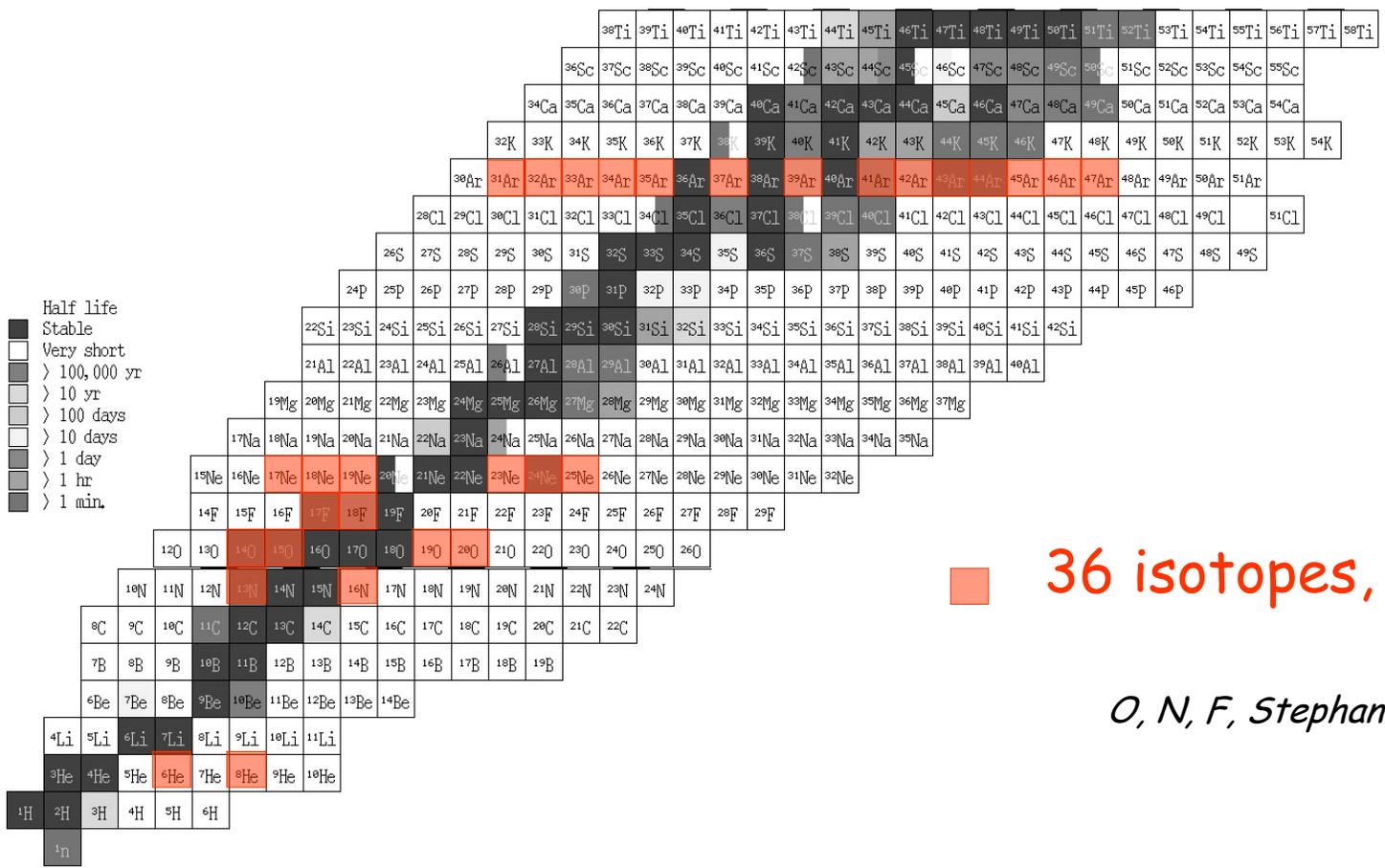
Carte des isotopes  
*en rouge: découverts au GANIL*



# SPIRAL

69Kr	70Kr	71Kr	72Kr	73Kr	74Kr	75Kr	76Kr	77Kr	78Kr	79Kr	80Kr	81Kr	82Kr	83Kr	84Kr	85Kr	86Kr	87Kr	88Kr	89Kr	90Kr	91Kr	92Kr	93Kr	94Kr	95Kr	96Kr	97Kr	98Kr	99Kr	100Kr
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

- Half life
- Stable
  - Very short
  - > 100,000 yr
  - > 10 yr
  - > 100 days
  - > 10 days
  - > 1 day
  - > 1 hr
  - > 1 min.



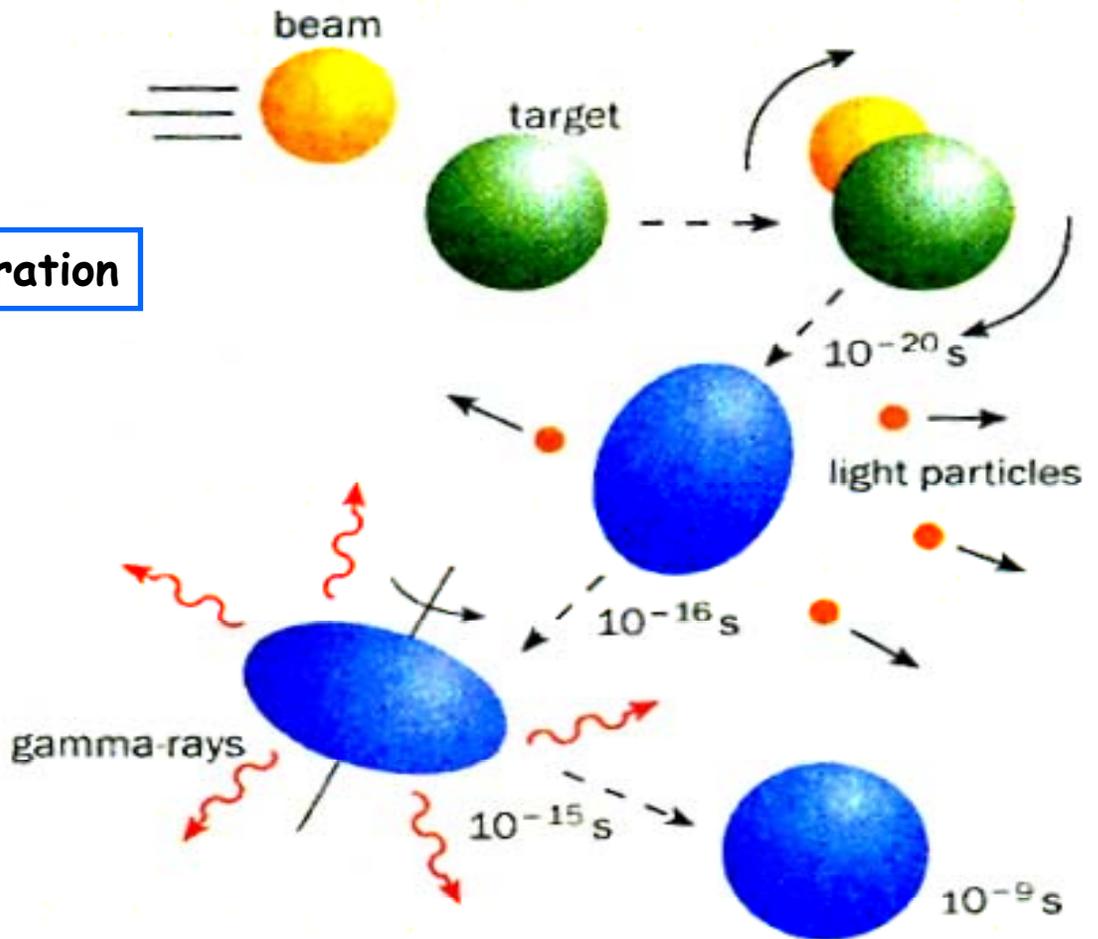
■ 36 isotopes, 7 elements

*O, N, F, Stephane Gibouin Thèse 2003*

# Un exemple de réaction...: Formation des noyaux (super...)déformés

## Les réactions de fusion-évaporation

$E_{\text{faisceau}} \sim 100 \text{ MeV}$



## Grandeurs conservées dans les réactions nucléaires:

un exemple:



se conservent:

- la charge **Z**, c.a.d le nombre de protons (7)
- le nombre de masse **A**, c.a.d le nombre de nucléons (14)
- la quantité de mouvement c.a.d la somme des produits masse x vitesse,  $(M_i v_i)$  des noyaux participants.
- la masse-énergie c.a.d:

$$m {}^{10}\text{B}_5 + m {}^4\text{He}_2 = m {}^1\text{H}_1 + m {}^{13}\text{C}_6 + Q$$

$$\text{avec } Q = E_{\text{sortie}} - E_{\text{entrée}}$$

*-se conservent également d'autres grandeurs tels que spin, moment cinétique, parité....etc mais que nous pouvons oublier dans l'exposé du problème que nous examinons aujourd'hui.*

**Conséquence:** dans une réaction nucléaire, il faut mesurer pour chaque particule ses **A**, **Z**, **Q** et vitesse **v**.

Comment mesurer ces différentes variables?

La **détection** des particules, (des ions) se fait par interaction de ces dernières avec de la matière, interaction qui génère des traces, des signaux qui sont significatifs des grandeurs à mesurer. On sait mesurer:

(approximation non relativiste)

-L'énergie  $E = 1/2 A v^2$  à l'aide de semi-conducteurs,

-La perte d'énergie  $\Delta E \approx AZ^2/E$  qui donne accès au Z, à l'aide de semi-conducteurs, scintillateurs, gaz, (loi de Bethe-Bloch)

-la rigidité magnétique( le Brho)  $B\rho = Av/Q$  à l'aide d'un **spectromètre**.

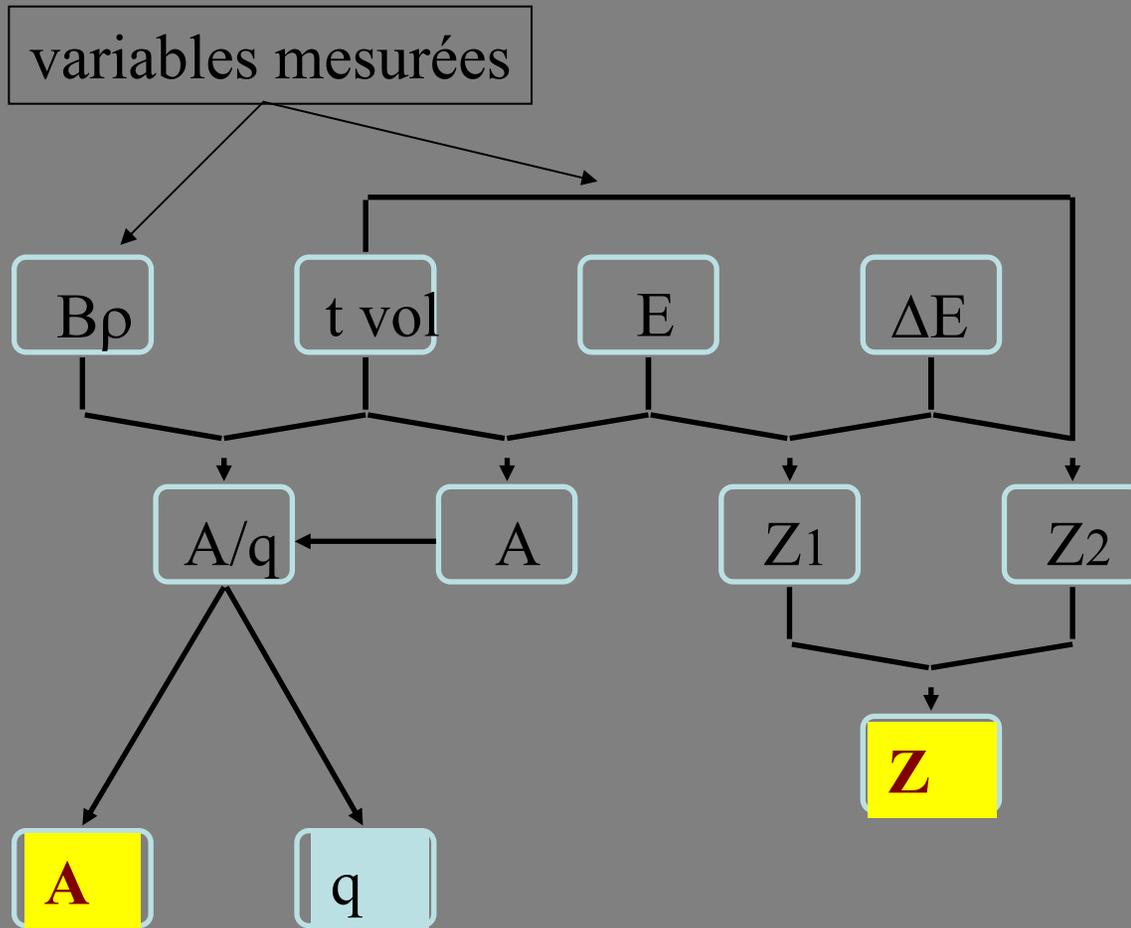
-la vitesse  $v = \text{distance}/\text{temps}$ , par la technique de 'temps de vol', à l'aide de galettes de micro-canaux, scintillateurs, gaz, semi-conducteurs

*Remarque importante: **v** est une **variable continue**, tandis que **A**, **Z**, **Q** sont **quantifiées**.*

**Précisions** atteintes sur les mesures des différentes variables.

variable	détecteur	résolution typique	domaine d'énergie des ions
E énergie	semi-conducteur scintillateurs gaz	qq $10^{-3}$ qq $10^{-2}$ qq $10^{-2}$	parcours < 1 cm E > qq MeV/nucleon parcours < 1 m.atm
$\Delta E$ perte d'énergie	semi-conducteur scintillateurs gaz	qq $10^{-2}$	E > qq MeV/nucleon
<b>B<math>\rho</math></b>	<b>spectromètres</b>	<b><math>10^{-3}</math> à qq <math>10^{-5}</math></b>	E > qq keV/nucleon
$t_{vol} = d/v$ temps de vol	semi-conducteur scintillateurs gaz galettes microcanaux	0.1 à 0.5 ns $\Delta t/t$ dépend de d entre $10^{-2}$ et qq $10^{-4}$	E > qq MeV/nucleon  E > qq keV/nucleon

# Measurements and resolutions :



grandeurs calculées

Mass number :

➤  $M/q \propto B\rho.T$

➤  $M \propto E.T^2$

Atomic number :

➤  $Z_1 \propto (E.\Delta E)^{1/2}$

➤  $Z_2 \propto \Delta E^{1/2} / T$

# Simple and useful formulae to calculate A, Z, Q

Let's measure mass A, atomic number Z and atomic charge Q  
with a magnetic spectrometer

A and Q:

$$B\rho = \frac{P}{Qe}$$

$$P = \gamma Mv = M\beta\gamma c \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad v = \frac{L}{TOF}$$

$$B\rho = 3.105 \frac{A\beta\gamma}{Q}$$

$$E = Mc^2(\gamma - 1)$$

$$A = \frac{E}{931.5(\gamma - 1)} \quad Q = \frac{3.105\beta\gamma E}{931.5(\gamma - 1)B\rho}$$

Z:

$$\frac{dE}{dx} = a_1 \frac{Z^2}{\beta^2} * [\ln(a_2\beta^2\gamma^2) + a_3\beta^2 + a_4] + a_5 \quad \text{Bethe-Bloch}$$

$$Z = c_1 \sqrt{\frac{\Delta E}{Y}} + c_2 + c_3 \frac{\Delta E}{Y} + c_4\beta \quad Y = \frac{\ln(5930\beta^2\gamma^2)}{\beta^2} - 1$$

Wedge selection:

$$\frac{dE}{dx} = K \frac{Z^2 A^{\gamma-1}}{E^{\gamma-2}} \quad E_{ion} \simeq Z^2/A$$

$$\frac{dE}{E} \simeq \frac{A^{2\gamma-1}}{Z^{2\gamma-2}} dx \quad \gamma \simeq 2$$

thus wedge selection:

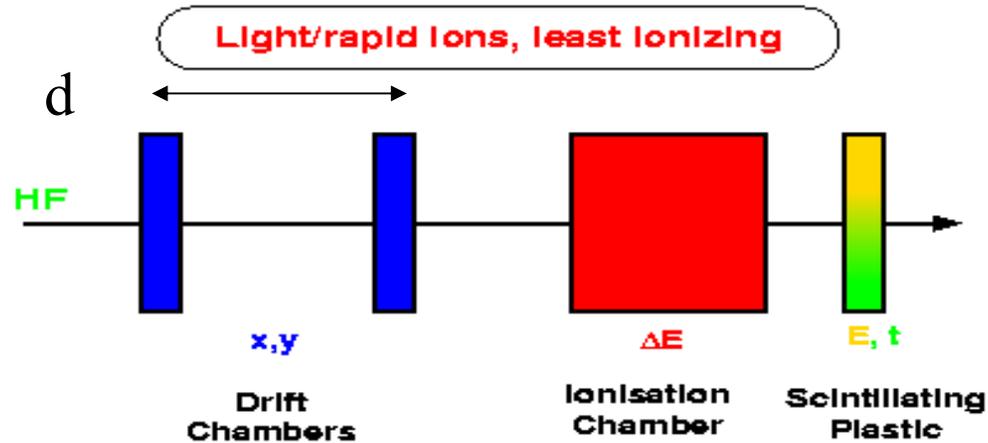
$$A^3/Z^2$$

Velocity (Wien) selection:

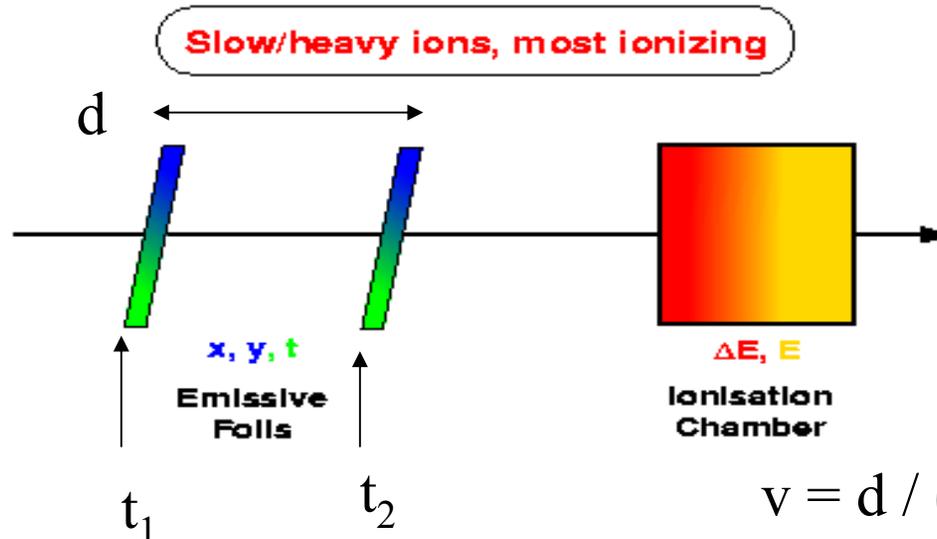
$$v = \frac{U_{filter}}{B_{filter}}$$

# Exemple de détection associée au spectromètre VAMOS / Ganil

ions issus  
de la réaction  
nucléaire



$d =$  base de temps de vol



$$v = d / (t_2 - t_1)$$

# Heavy/Slow Ion Detection

Ionisation Chamber

Secondary electron Detector

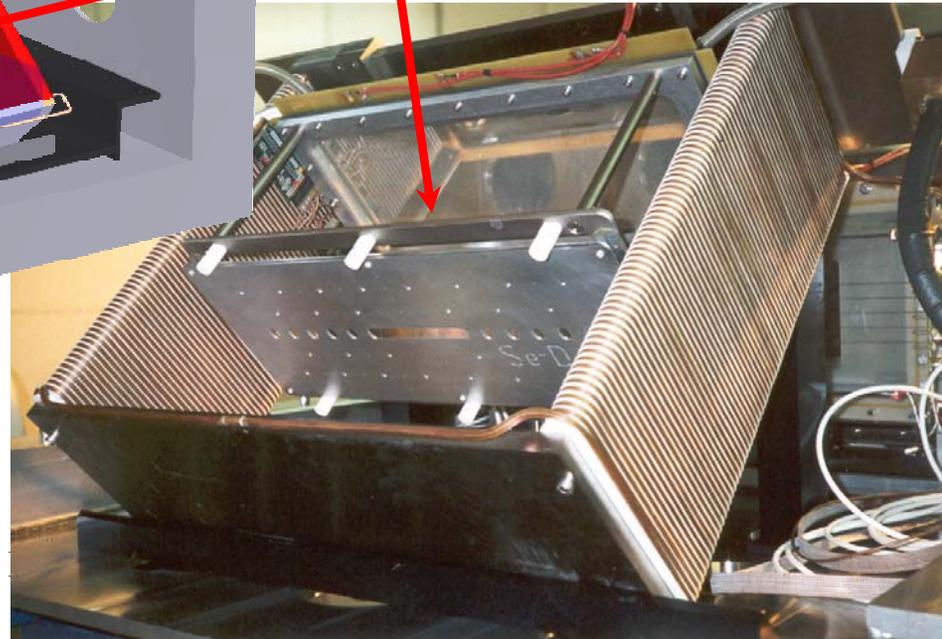
Mylar emissive foil

Se-D

$X_{FWHM} \sim 1 \text{ mm}$

$Y_{FWHM} \sim 2 \text{ mm}$

$T_{FWHM} \sim 300 \text{ ps}$



Chambres à dérives :  
mesure de position

Chambre d'ionisation :  
mesure de perte d'énergie /  
calcul du  $Z$

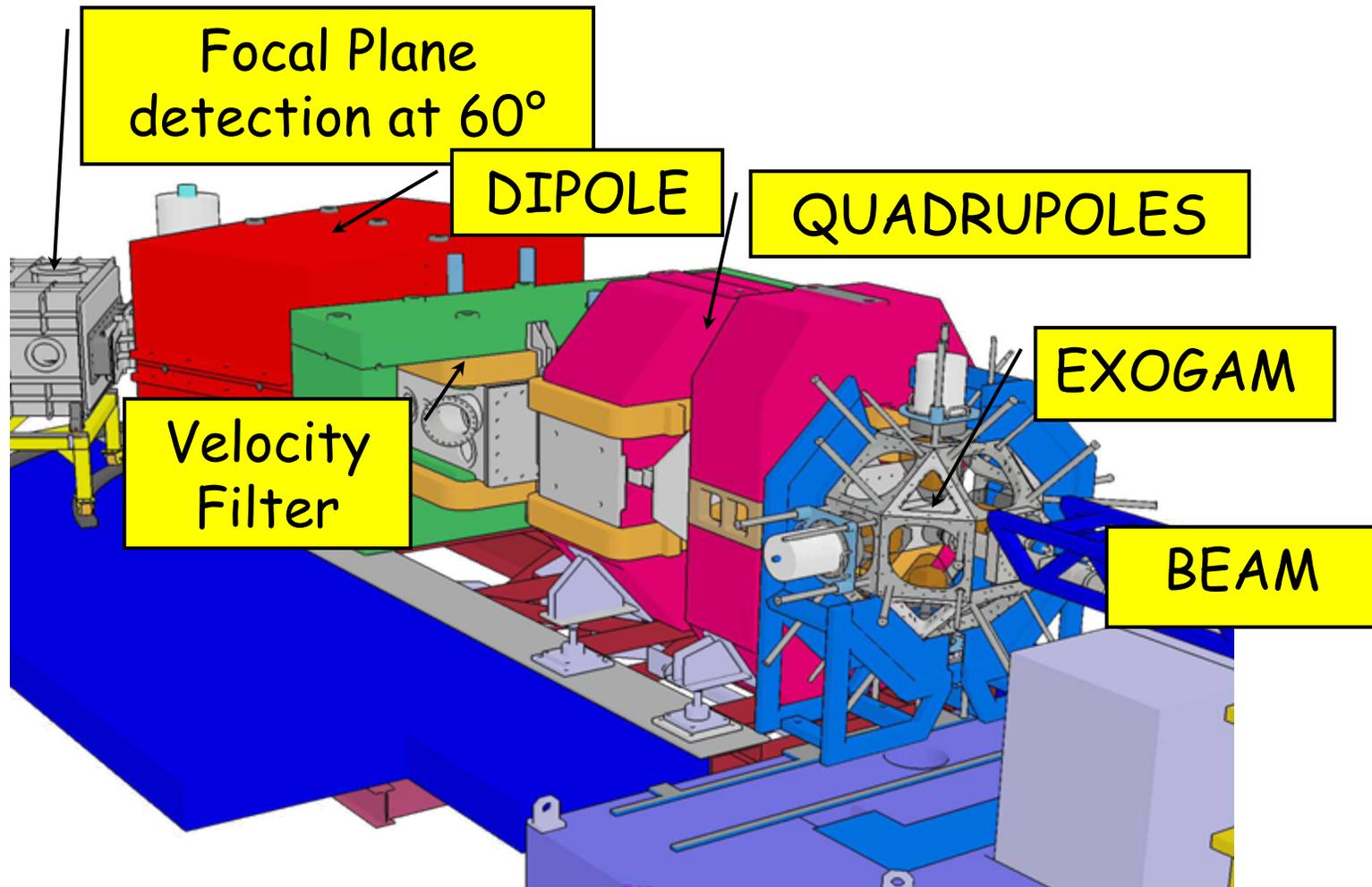
QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

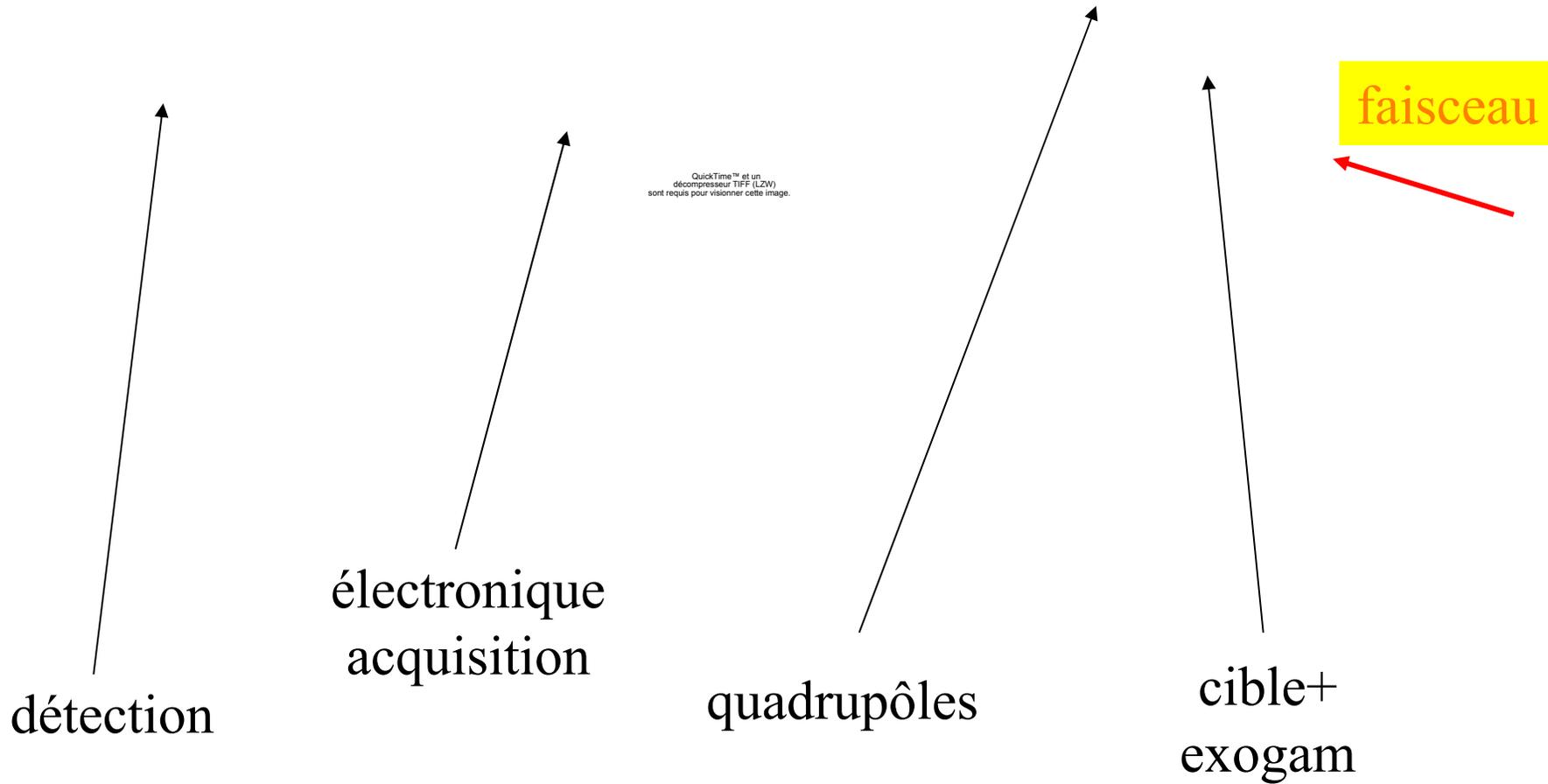


Scintillateur :  
prise de temps =  
mesure de la vitesse  $v$

Detection standard  
du spectromètre VAMOS

# VAMOS Spectrometer Schematic View





## Ensemble du spectromètre Vamos, couplé avec le détecteur $\gamma$ , Exogam

# Optique/ Spectromètres / transport de particules chargées

1-la trajectoire centrale des particules = axe du système optique

2-les coordonnées de toutes les particules sont données par rapport à la trajectoire centrale. (diapo 23)

3-les coordonnées finales (f) sont une **fonction F** des coordonnées initiales (i). ***F est la fonction de transfert ou de transport*** entre les endroits i et f.

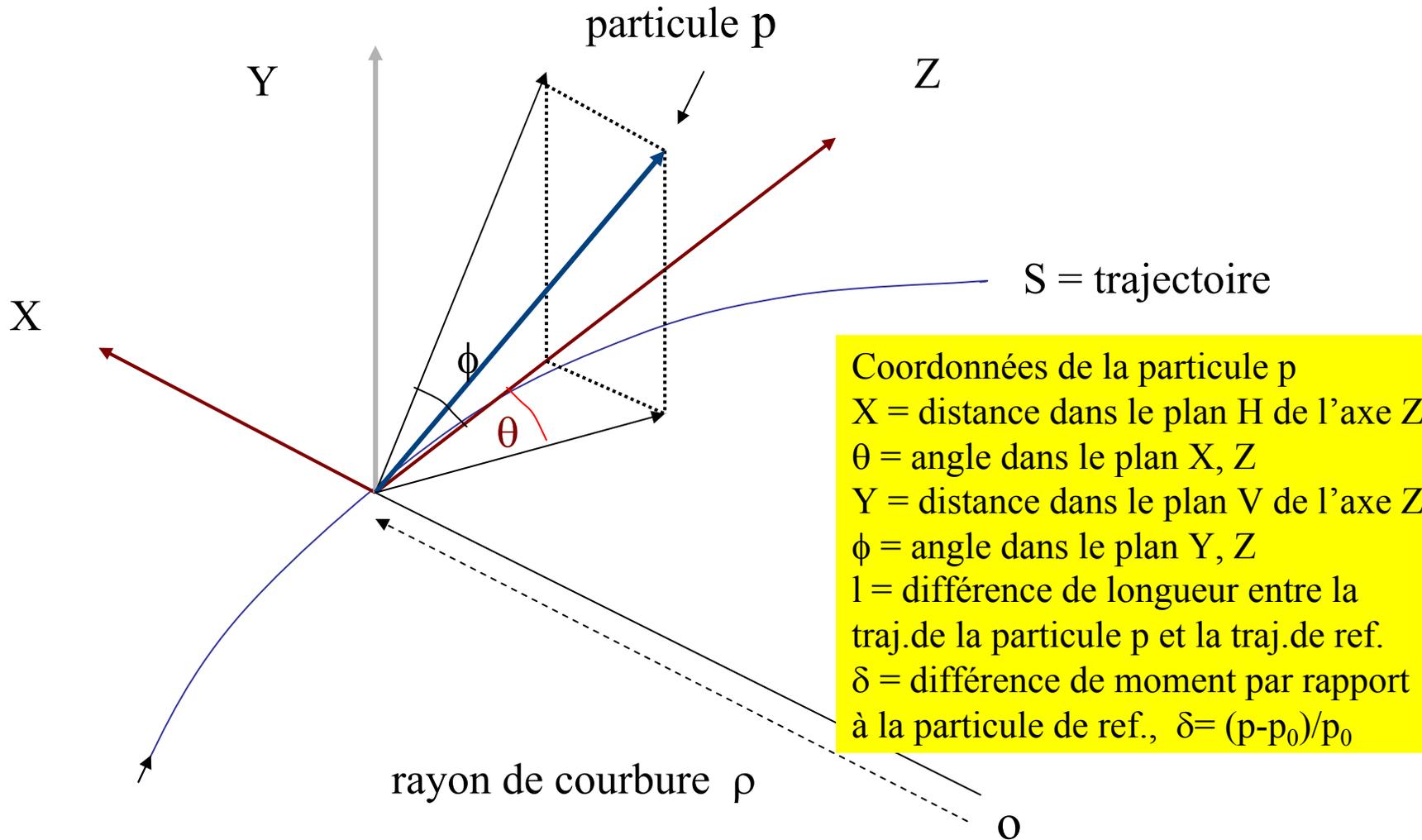
4-la **fonction F** est déterminée par les ***équations du mouvement*** entre l'origine i et la fin f de la trajectoire.

5-on postulera que les écarts en position et en angle des trajectoires de toutes les particules sont petits ( optique de Gauss) et on fera un développement limité \*, à l'ordre n, de la **fonction F**, (au premier ordre par exemple)

\*développement de Taylor, Mac-Laurin d'une fonction F(X) autour de a:

$$F(X) = F(a) + (X - a) \cdot F'(a) / 1! + \dots + (X-a)^n \cdot F^n(a) / n!$$

# I: trajectoire et coordonnées



6-Les coordonnées finales vont **dépendre** des coordonnées initiales.

$$\mathbf{x}_f = F_{\mathbf{x}}(x_i, \theta_i, y_i, \phi_i, l_i, \delta_i)$$

$$\mathbf{x}_f = (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial x) \cdot x_i + (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial \theta) \cdot \theta_i + (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial y) \cdot y_i + (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial \phi) \cdot \phi_i + (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial l) \cdot l_i + (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial \delta) \cdot \delta_i$$

de même, pour les autres coordonnées, ex:  $\theta_f = (\partial F_{\theta} / \partial x) \cdot x_i + \dots$  etc

Ce qui peut s'écrire sous la forme **matricielle** suivante:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_f \\ \theta_f \\ y_f \\ \phi_f \\ l_f \\ \delta_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{45} & T_{46} \\ T_{51} & T_{52} & T_{53} & T_{54} & T_{55} & T_{56} \\ T_{61} & T_{62} & T_{63} & T_{64} & T_{65} & T_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ \theta_i \\ y_i \\ \phi_i \\ l_i \\ \delta_i \end{pmatrix} \quad \text{avec}$$

$$T_{11} = (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial x) = (x/x_0)$$

$$T_{12} = (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial \theta) = (x/\theta_0)$$

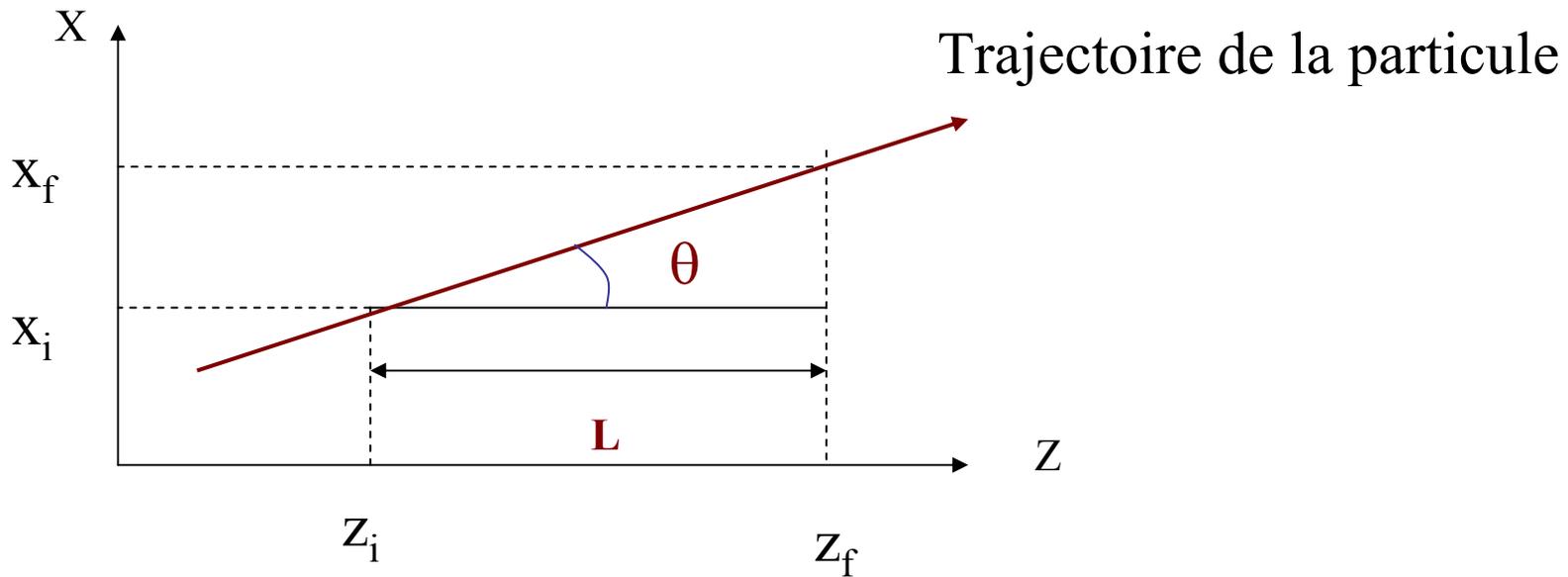
$$\text{etc....}$$

$$T_{16} = (\partial F_{\mathbf{x}} / \partial \delta) = (x/\delta_0)$$

*(Rappel: le mouvement des particules s'effectue au travers d'espaces ou règnent des champs magnétique et/ou électrique qui définissent leur trajectoire. L'équation de base d'un tel mouvement est:*

$$- d/dt(\vec{mv}) = q(\vec{E} + v\Lambda\vec{B}) \text{ ,.....nous y reviendrons)$$

**1er exemple** (*le plus simple*): une particule voyage dans un *espace libre (sans champ)*



$$X_f = x_i + L \tan \theta_i$$

$$L = z_f - z_i$$

$$\theta_f = \theta_i = \theta$$

$$Y_f = Y_i + L \tan \phi_i$$

La matrice T, est:

$$\phi_f = \phi_i = \phi$$

$$L_f = L_i + L(1/\cos^2 \theta + 1/\cos^2 \phi - 1)^{1/2} - L$$

$$\delta_f = \delta_i$$

$$\begin{pmatrix} 1 & L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

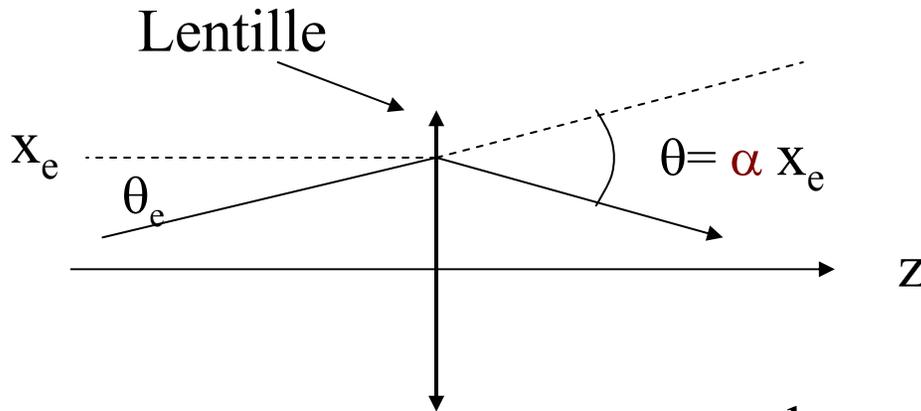
Intérêt d'une telle notation (*à priori compliquée*):

. un système optique peut être divisé en n sections, chacune décrite par une matrice  $T_i$ , et l'ensemble du système par un produit de matrices:

$$X_f = T_n \cdot T_{n-1} \dots T_2 \cdot T_1 \cdot X_0$$

(On verra dans la suite les matrices correspondant aux quadrupoles et dipôles, éléments de base des spectromètres)

**2eme exemple** : la *lentille mince*, utilisée pour focaliser les faisceaux:

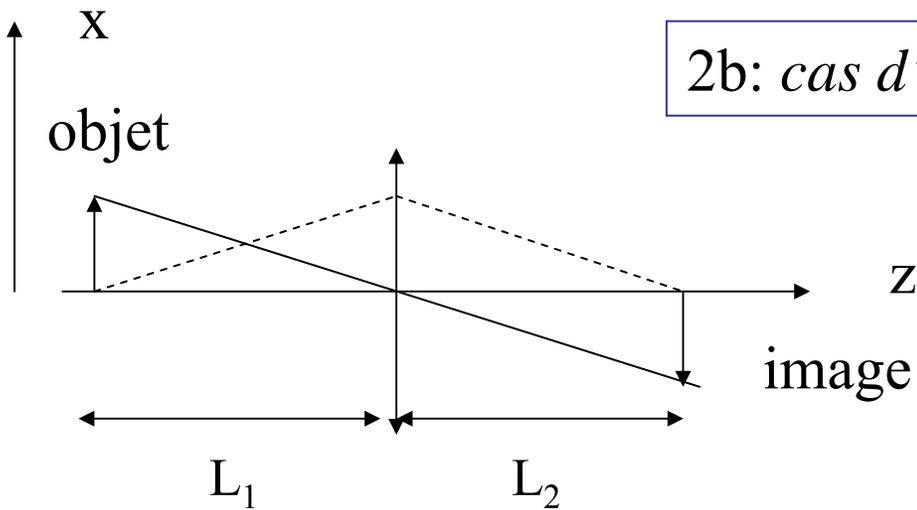


$$\begin{aligned} \theta_s &= \theta_e - \alpha x_e \\ x_s &= x_e \end{aligned} \Rightarrow T_{\text{lent}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\alpha & 1 \end{vmatrix}$$

2a/Un système classique (3 éléments): longueur  $L_1$  - lentille l - longueur  $L_2$ , s'écrira:

$$T = T_{L_2} \cdot T_{\text{lent}} \cdot T_{L_1} = \begin{vmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\alpha & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 - \alpha L_2 & (1 - \alpha L_2)L_1 + L_2 \\ \alpha & (1 - \alpha L_1) \end{vmatrix}$$

2b: cas d'une relation **point-point**:  $T_{12} = 0$



Dans ce cas  $x$  ne dépend pas de  $\theta$ , (voir *matrice 1*), nous avons alors une **focale** et  $x_f = (x/x_0)x_0$ .

$(x/x_0) = T_{11}$  est le **grandissement**

Si nous voulons afficher un grandissement égal à -1, alors:

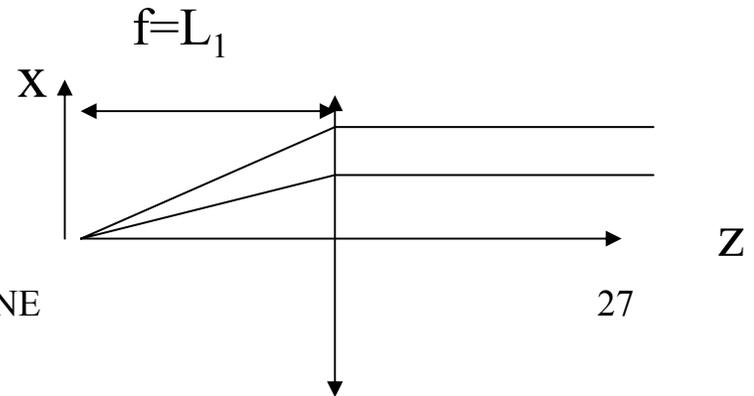
$(x/x_0) = T_{11} = -1 = 1 - \alpha L_2$   $L_2 = 2/\alpha$ ; et  $(x/\theta_0) = T_{12} = 0 = (1 - \alpha L_2)L_1 + L_2 = -L_1 + L_2$  entraîne  $L_1 = L_2$  avec  $f = 1/\alpha$  la **longueur focale** de la lentille

De même, si on affiche une relation

**point-parallèle** soit  $T_{22} = 0$ , alors

$(1 - \alpha L_1) = 0$  et  $f = (1/\alpha) = L_1$

*Remarque:* le déterminant de  $T = 1$



## Relation entre la matrice de transport T et les équations du mouvement.

Les équations du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique utilisées dans la suite de cet exposé et qui concerneront les **quadrupoles** et les **dipôles**, éléments de base d'un spectromètre, sont explicitées dans l'annexe 1.

*Elles y sont développées, uniquement et à titre d'exemple, dans le cas d'un quadrupole ( ou lentille magnétique), et non pour un dipôle.*

1: Pour un **quadrupole**, les équations à résoudre (voir annexe1) sont:

$$y'' - ky = 0$$

$$x'' + kx = 0$$

dont les solutions sont, dans le plan ( x, s):

$$\begin{vmatrix} X \\ X' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\varphi & (1/k)^{1/2} \sin\varphi \\ -k^{1/2} \sin\varphi & \cos\varphi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ x' \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{vmatrix} \quad \text{avec:}$$

dans ce cas le q-pole est **focalisant**  
dans le plan x

$$\varphi = l \cdot k^{1/2}$$

$$k = qg/p \quad \text{avec}$$

l=longueur du quadrupole

g= **gradient** de champ du q-pole

p= moment de la particule traversant le q-pole

Dans l'autre plan, les trajectoires, solution de l'équation  $y'' - ky = 0$  sont les suivantes:

$$\begin{vmatrix} Y \\ Y' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cosh\varphi & (1/k)^{1/2} \sinh\varphi \\ k^{1/2} \sinh\varphi & \cosh\varphi \end{vmatrix} \quad \times \quad \begin{vmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{vmatrix}$$

dans le plan  $y$  le quadrupole est *défocalisant*

Un quadrupole focalisant dans un plan est défocalisant dans l'autre plan

**Récapitulatif:** quelques formules utiles sur les q-poles.

$$k = qg/p = (q/mv)(B_p/r) = (B_p/r)(1/B\rho)$$

avec  $B_p$  = champ sur le pole et  $B\rho$  la rigidité magnétique de la particule de vitesse  $v$  et de masse  $m$

- matrice 6x6 d'un *quadrupole*:

$$\begin{pmatrix} X \\ X' \\ Y \\ Y' \\ L \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & (1/k)^{1/2} \sin\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k^{1/2} \sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cosh\varphi & (1/k)^{1/2} \sinh\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k^{1/2} \sinh\varphi & \cosh\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} \end{pmatrix} \mathbf{x} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \\ y_0 \\ y'_0 \\ L_0 \\ \delta_0 \end{pmatrix}$$

Nous venons de voir que les équations à résoudre sont

$$y'' - ky = 0.$$

$$x'' + kx = 0.$$

Comparons avec celle obtenue à partir de la matrice  $T$ . Prenons par exemple le plan  $(x, s)$  en supposant qu'on limite le développement de la trajectoire au 1er ordre:

$$x = T_{11}x_0 + T_{12}\theta_0$$

$$\theta = T_{21}x_0 + T_{22}\theta_0 \text{ etc... avec } \theta = x'$$

par dérivations successives, on obtient:

$$x'' = T''_{11}x_0 + T''_{12}\theta_0 = -kx = T_{11}x_0 + T_{12}\theta_0 \text{ puisque les valeurs initiales } x_0 \text{ et de } \theta_0 \text{ ne varient pas.}$$

$$\text{donc: } T''_{11} + kT_{11} = 0$$

$$T''_{12} + kT_{12} = 0 \text{ dont les solutions sont des fonctions trigonométriques } \cos, \sin, \sinh, \cosh \dots$$

*(des équations semblables peuvent être obtenues pour tous les autres termes de la matrice  $T$ )*

# Configuration du champ dans un **quadropole**

Un quadropole a 4 pôles magnétiques :

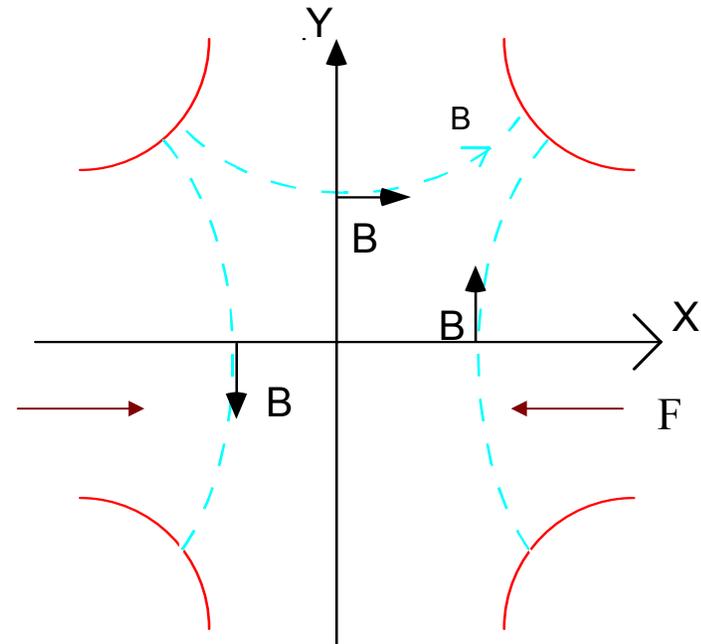
En  $X = 0$  et  $Y = 0$  :  $B = 0$

En  $Y = 0$  et  $X \neq 0$  :

$B = GX$  orienté selon  $Y$

En  $Y \neq 0$  et  $X = 0$  :

$B = GY$  orienté selon  $X$



**G est le gradient magnétique du quadropole.**

$$\mathbf{F} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$$

$$F_X = -q v_z B_y = -q v_z G X \quad (< 0 \text{ si } X > 0)$$

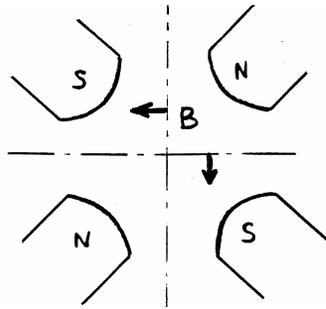
$$F_Y = q v_z B_x = q v_z G Y \quad (> 0 \text{ si } Y > 0)$$

**G > 0 : quadropole focalisant dans le plan horizontal**

## QUADRUPOLE: pôles nord / pôles sud

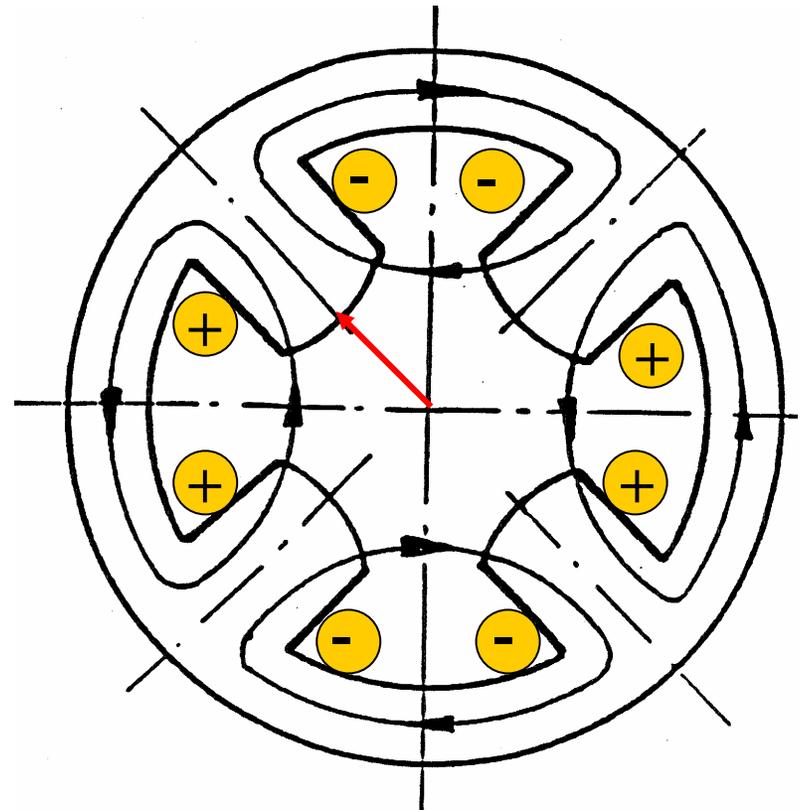
**Fonction : focalisation du faisceau de particules chargées**

Il possède quatre pôles dont les profils sont tangents en leur sommet à un même cercle dit **cercle de gorge** et équi-répartis angulairement.

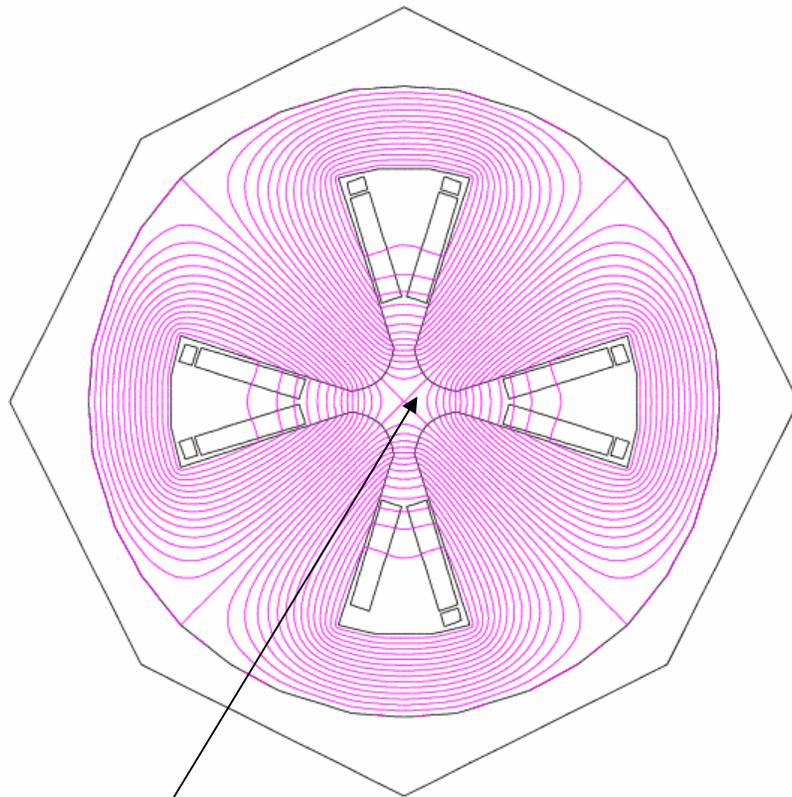


Force de Laplace  $\vec{F} = q(\vec{V} \wedge \vec{B})$

**Effet :**    **Focalisant** horizontalement  
              **Défocalisant** verticalement

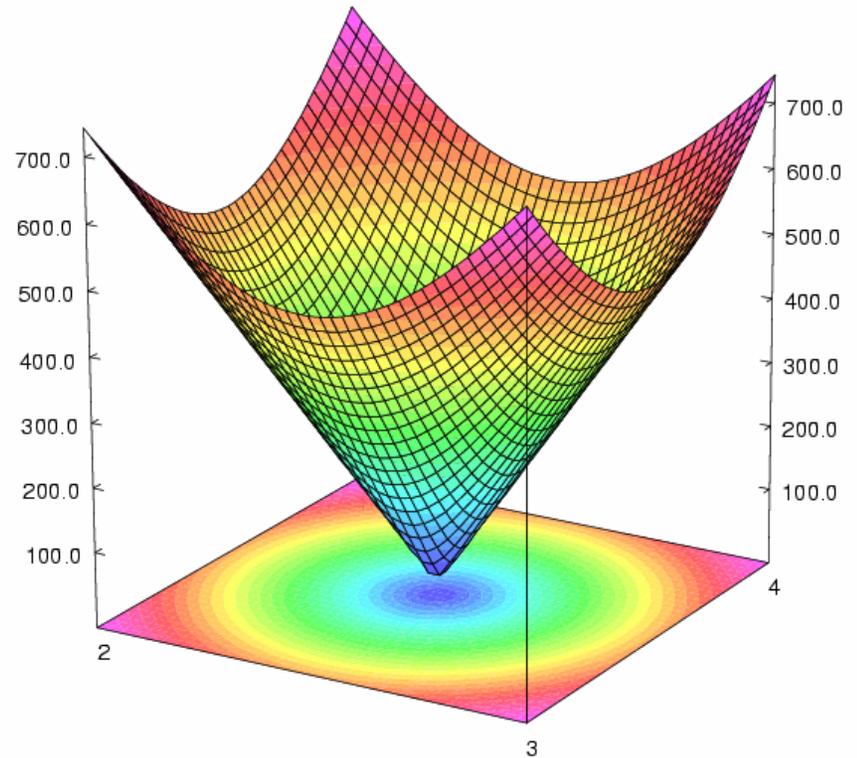


# Calcul de la CIRCULATION DU FLUX dans un quadrupole



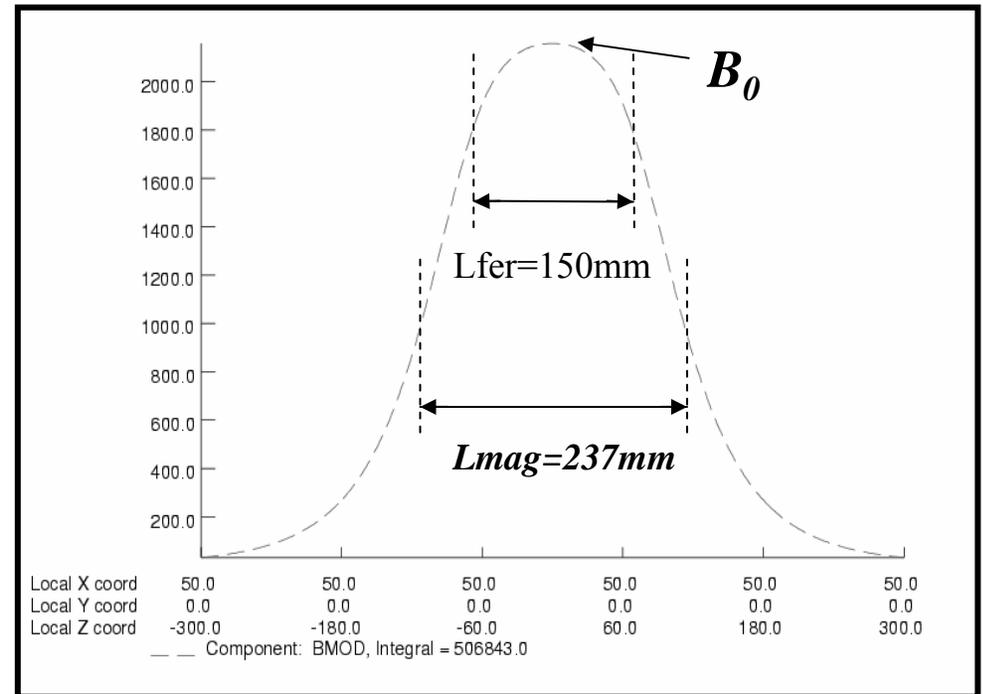
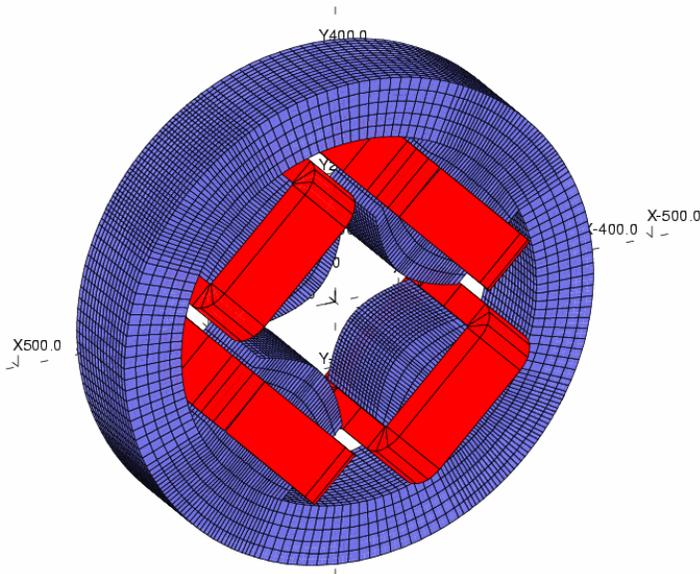
zone utile pour le faisceau de  
particules

## MODULE DE B



Component: BMOD  
Minimum = 19.0537, Maximum = 743.028  
Integral = 2572260.0

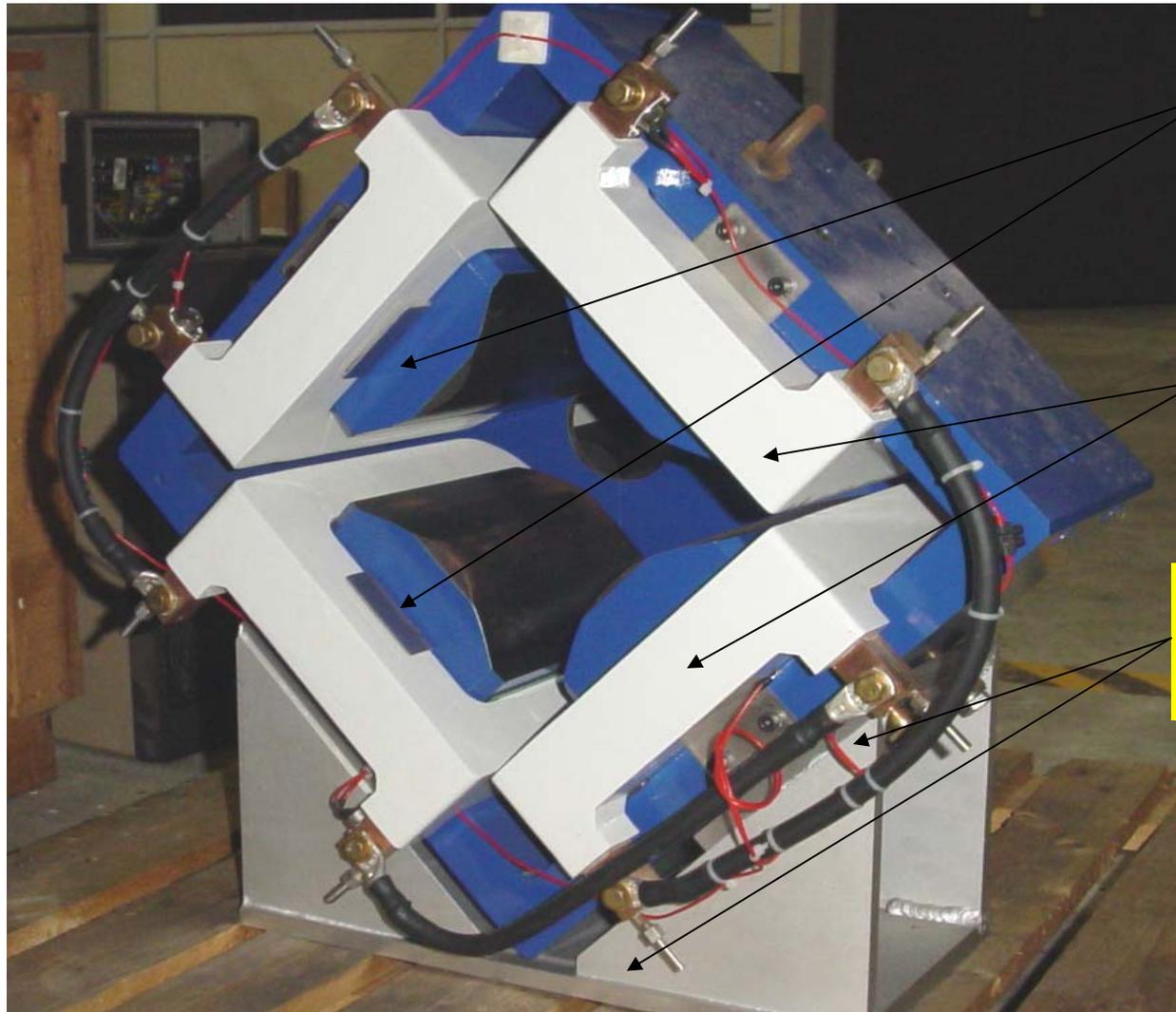
Exemple de calcul d'un **QUADRUPOLE circulaire** de diamètre  $\Phi = 180$  mm, en particulier de sa *longueur magnétique*  $l_{mag}$



$$L_{mag} = (\text{intégrale de } B) / B_0$$

On ne peut connaître la longueur exacte que par un calcul **3D**

**exemple de réalisation d'un QUADRUPOLE circulaire:  
de dimension 'standard' GANIL: < 70 cm**



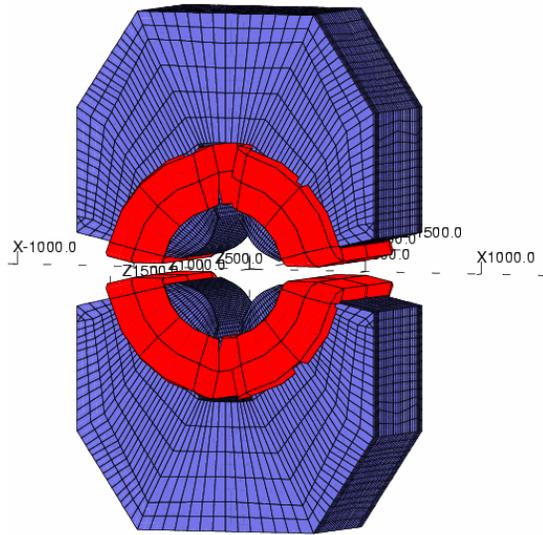
poles

culasses

connexions  
des bobines

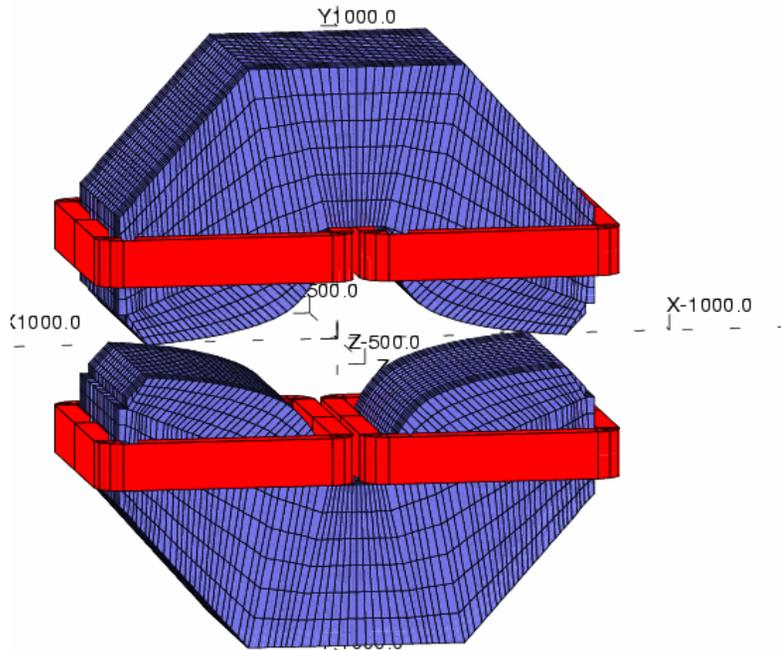
# exemple de réalisation d'un QUADRUPOLE circulaire, le q-pole Q1 du spectromètre VAMOS, *de grandes dimensions.*

Diamètre de gorge 300 mm  
Longueur magnétique 600 mm  
Gradient max 6.7 T/m  
 $B=1$  T à 150 mm  
 $I=850$  A  
 $P=115$  Kw  
Poids 12 tonnes



# exemple de réalisation d'un quadrupole ELLIPTIQUE, le q-pole Q2 du spectromètre VAMOS, de grandes dimensions.

Ouverture utile: 1 mètre en X  
Hauteur: 2 mètres  
Gradient max 2T/m  
B=1T à 500mm  
I=850 A  
P=120 Kw  
Poids: 12 tonnes



**Remarque:** dans les *deux exemples précédents*, le développement des trajectoires en fonction de  $x, \theta, y, \phi, l, \delta$  ne peut plus être limité au 1<sup>er</sup> ordre car les angles sollicités par les particules sont grands, plusieurs degrés. Le calcul doit être mené aux ordres supérieurs, 2, 3, ....

Les termes du développement au delà du premier ordre sont qualifiées d'*aberrations*. Celles-ci peuvent être parfois d'un ou deux ordres de grandeur plus importantes que le premier ordre, elles doivent donc être corrigées, à l'aide d'éléments magnétiques multi-polaires tels que sextupoles, octupoles, décapoles....etc. Toutefois la manipulation de matrices  $T_{ijk}$ .. d'ordre aussi élevé devient complexe, et dans certains cas la correction des aberrations peut aussi être abordée à l'aide d'outils différents (*mais complémentaires*) tels que programmes de ray-tracing qui intègrent pas à pas le champ magnétique le long des trajectoires des particules et n'introduisent pas la notion 'd'ordres'; exemple le code Zgouby qui a servi au calcul du spectromètre VAMOS, dispositif comprenant peu d'éléments mais possédant une très grande acceptance angulaire. Nous présentons dans l'exemple suivant les trajectoires des particules, angle et position, sur la focale de ce spectromètre.

# Specifications du spectromètre

vamos

détection  
sur la focale:  
mesure des  
trajectoires

Path length 7.3 m

Solid angle 100 msr

Momentum  $\pm 7\%$

Dispersion 2.5 cm/%

Rotation  $0^\circ-90^\circ$

Translation 0.4-1.2 m

Focal Plane

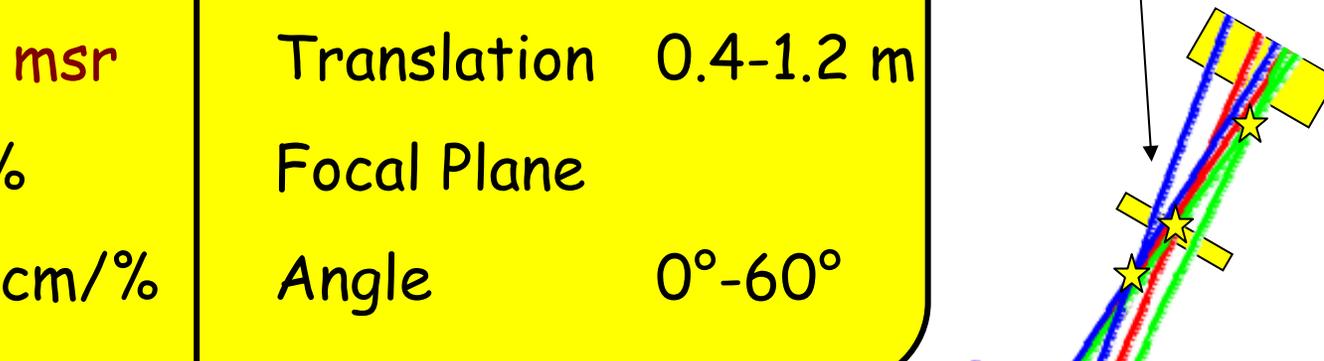
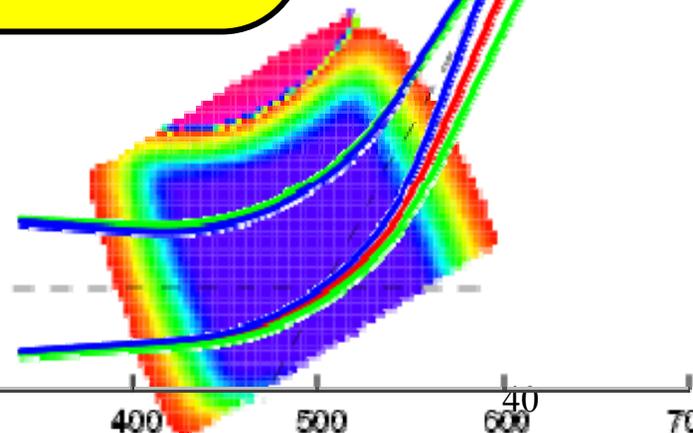
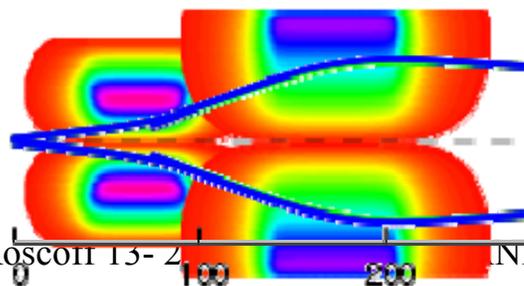
Angle  $0^\circ-60^\circ$

Exemple:

$\Theta : -130, +130$  [mrad]

$B\rho : (0.97, 1, 1.03) B_{Nc}$

Spectromètres- Roscoff 13-2



Correction des **aberrations** (*observées sur la focale*)

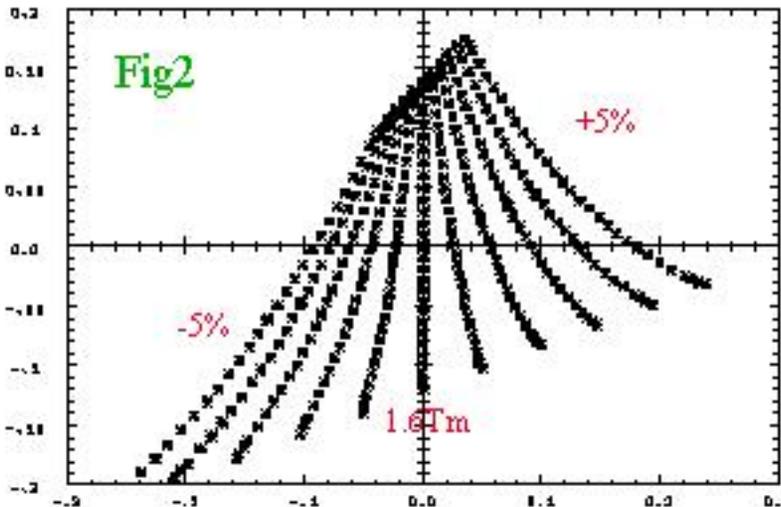
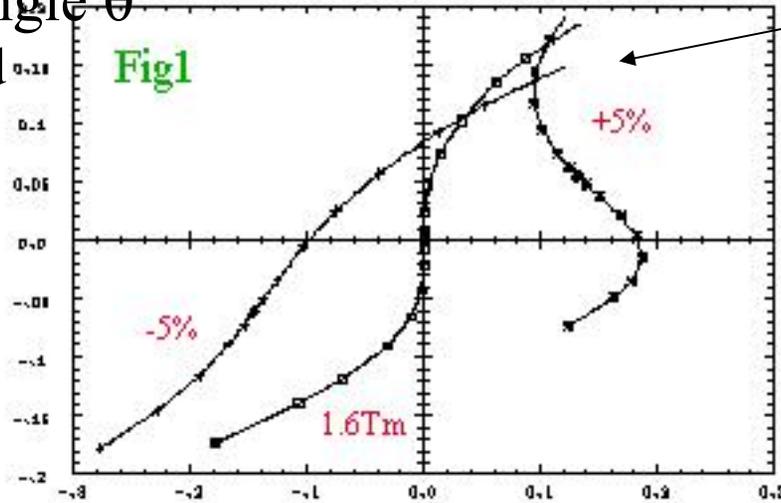
Les moments  $p_0, p_0 \pm 5\%$  ne sont pas séparés

Angle  $\theta$   
rad

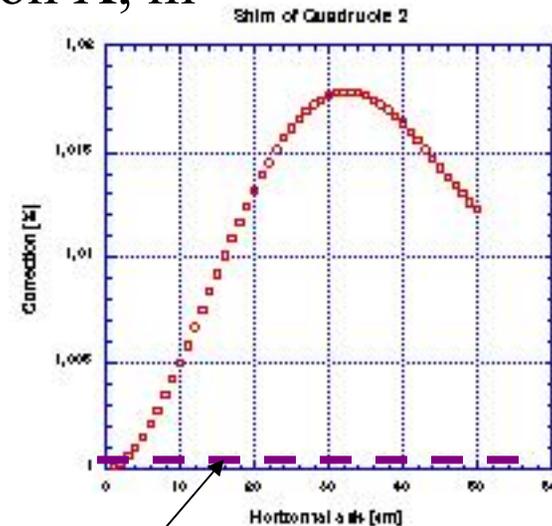
Image aberrations X- $\theta$  plane

Fig1 : Pure Q1 and Q2 quadrupoles

Fig2 : Q1 pure quadrupole  
Q2 modified (*forme des poles*)



position X, m



Champ purement quadrupolaire:  $(B=gR)$

*angle (rad)*

1

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

en résumé:

1 - aberrations non corrigées

(calculs)

2 - aberrations corrigées (calculs)

3 - aberrations corrigées (mesure)

*position (m)*

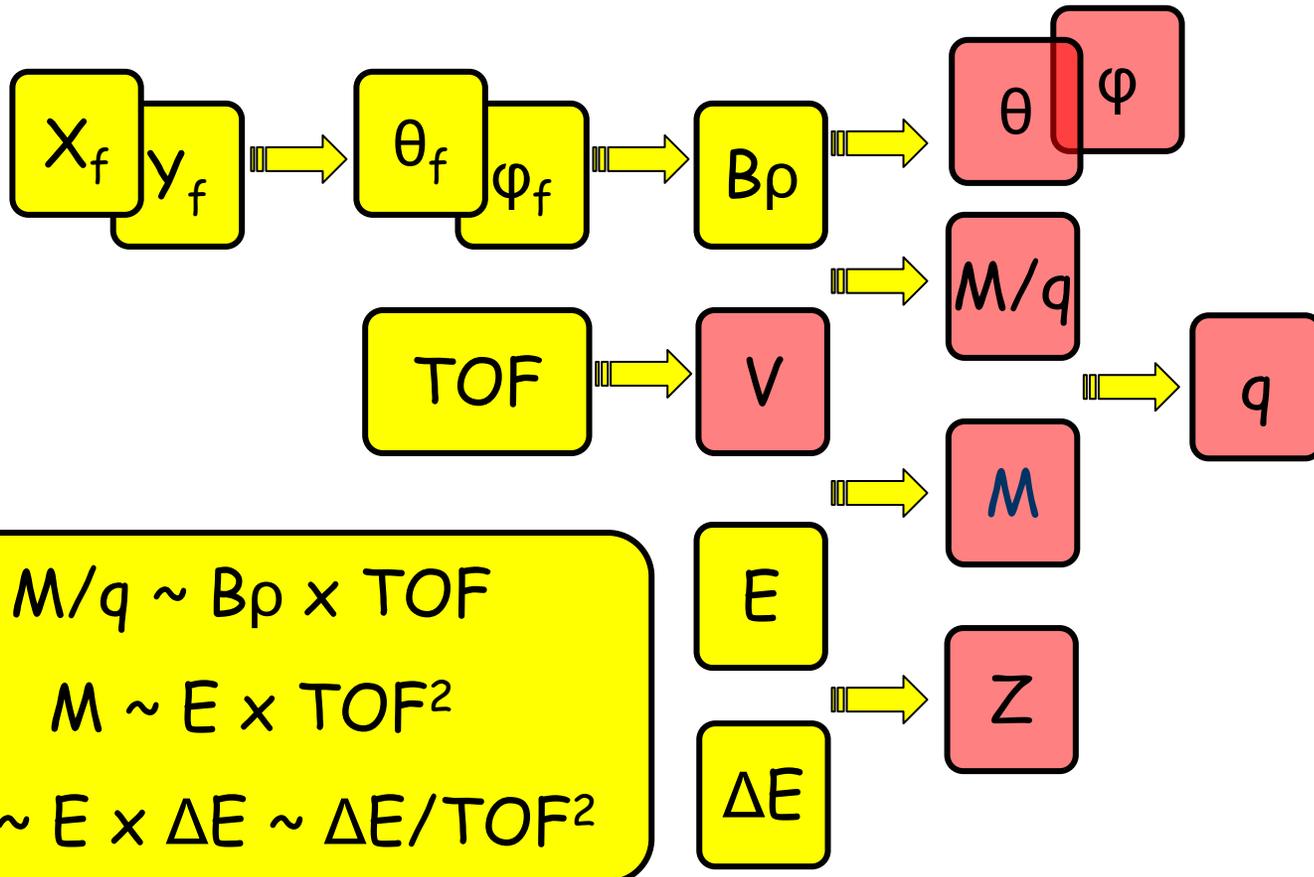
2

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

3

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

# VAMOS Measurement



Resolution	
$\Theta$	0.1°
$\Phi$	0.3°
$B\rho$	0.5%
$M/q$	0.5%
$q$	1/30
$M$	1/200
$Z$	1/30

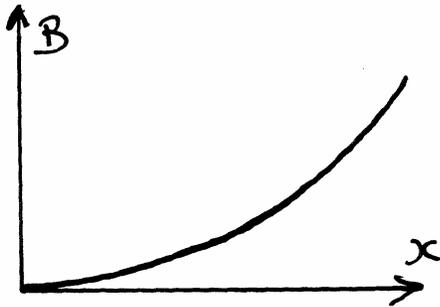
$$M/q \sim B\rho \times TOF$$

$$M \sim E \times TOF^2$$

$$Z^2 \sim E \times \Delta E \sim \Delta E / TOF^2$$

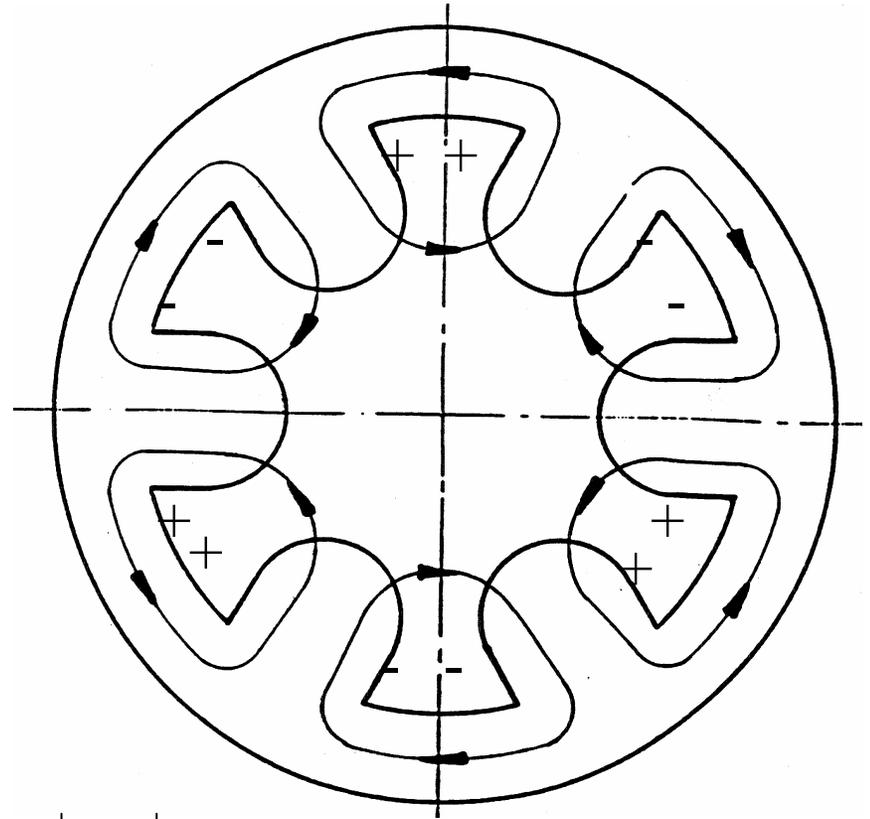
# SEXTUPOLE

Correction des défauts du **deuxième ordre**



$$B = k R^2$$

↓  
[T/m<sup>2</sup>]

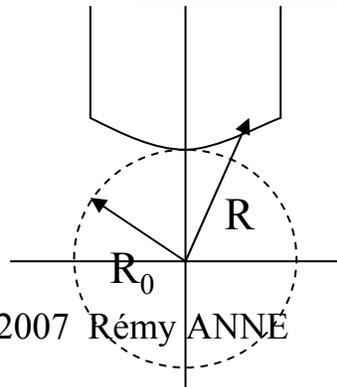


Dans l'air :

$$NI = \int_0^R \frac{kR^2}{\mu_0} dr = \left[ \frac{k}{\mu_0} \frac{R^3}{3} \right]_0^R$$

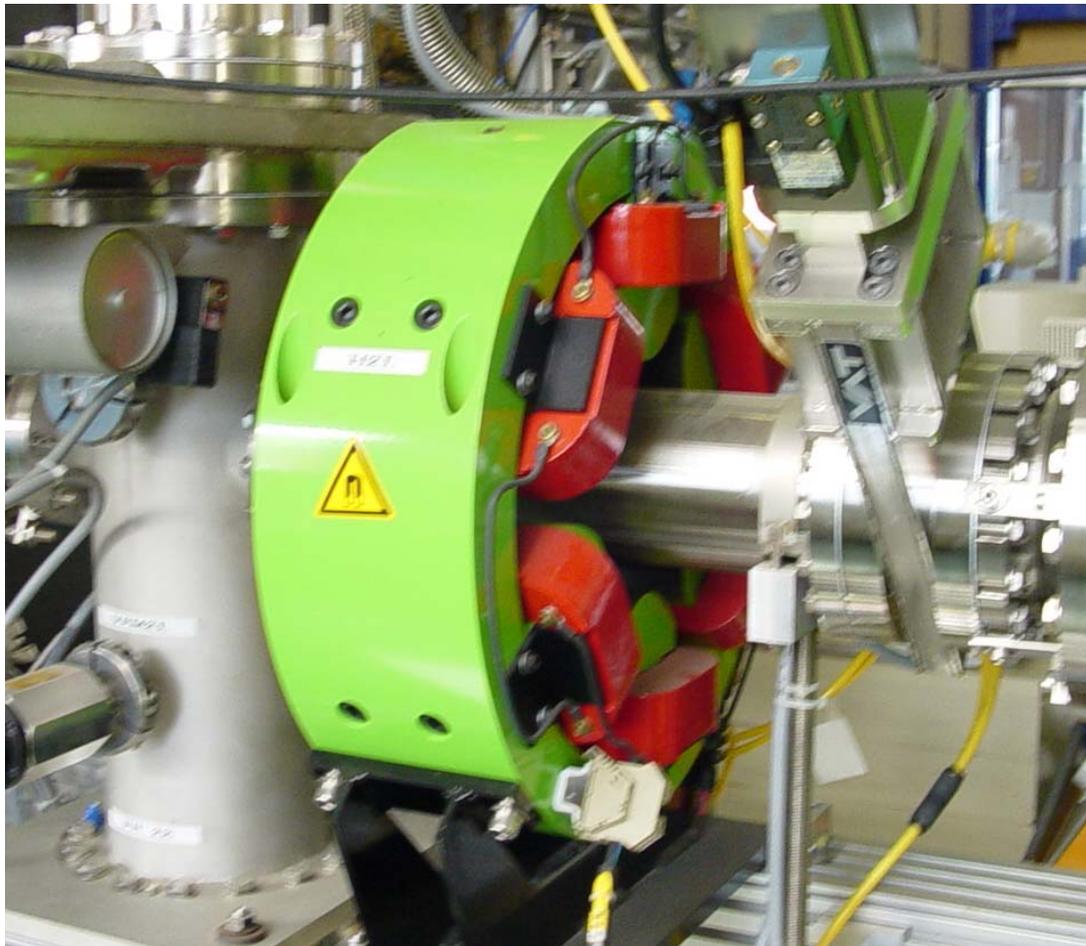
$$NI = \frac{kR^3}{3\mu_0}$$

pour une bobine



Profil polaire:  $R^3 \cos 3\theta = R_0^3$

## Exemple de SEXTUPOLE



Le champ magnétique varie avec le carré de  $x$ :  $B=k x^2$

Matrice de transport d'un *dipole magnétique*:

Un dipole agit sur un faisceau de particules comme un prisme agit sur la lumière, il dévie leur trajectoire d'un angle qui varie suivant leur vitesse. Dans ce dispositif, le champ magnétique appliqué aux particules est orienté suivant un seul axe, nous choisirons  $B=B_y$ .

En utilisant le formalisme introduit précédemment, les à résoudre sont les suivantes:

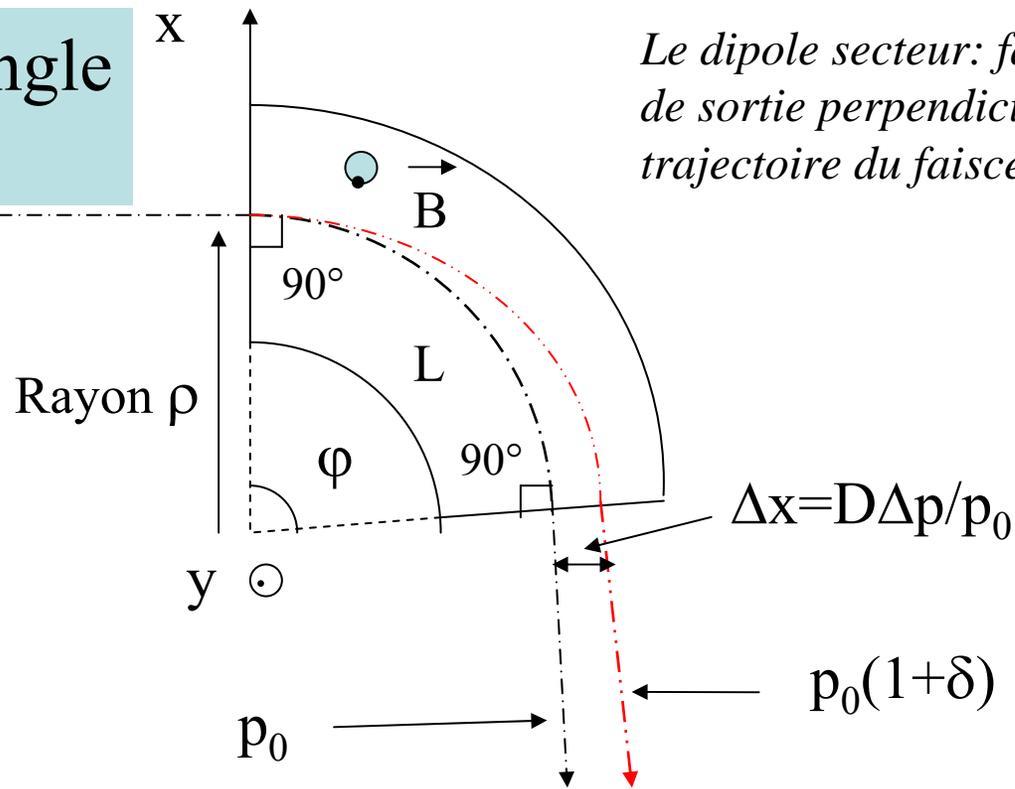
dans le plan vertical :  $y'' + ky = 0$

dans le plan horizontal:  $x'' - (k - 1/\rho^2)x = -(1/\rho)\delta$  ( cf: Steffen)

Voyons le *dipole secteur*:(faces d'entrée et de sortie perpendiculaires à la trajectoire du faisceau)

# dipole secteur d'angle de déviation $\varphi$

Faisceau de particules



La matrice d'un tel aimant, dans le plan horizontal  $(x, s)$  dispersif s'écrit:

$$\begin{vmatrix} X_L \\ X'_L \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\varphi & \rho \sin\varphi \\ (-1/\rho) \sin\varphi & \cos\varphi \end{vmatrix}_x \begin{vmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\rho(1 - \cos\varphi) \\ -\sin\varphi \end{vmatrix} \delta_0 \quad \delta_0 = \Delta p / p_0$$

$D = -\rho(1 - \cos\varphi)$  est le coefficient de **dispersion en position** du dipole  
 $D' = -\sin\varphi$ , la **dispersion en angle**. ce sont les termes **chromatiques**

*Dans le plan vertical (y, s) l'aimant se comporte comme une section droite sans champ*

L= longueur de la trajectoire centrale,

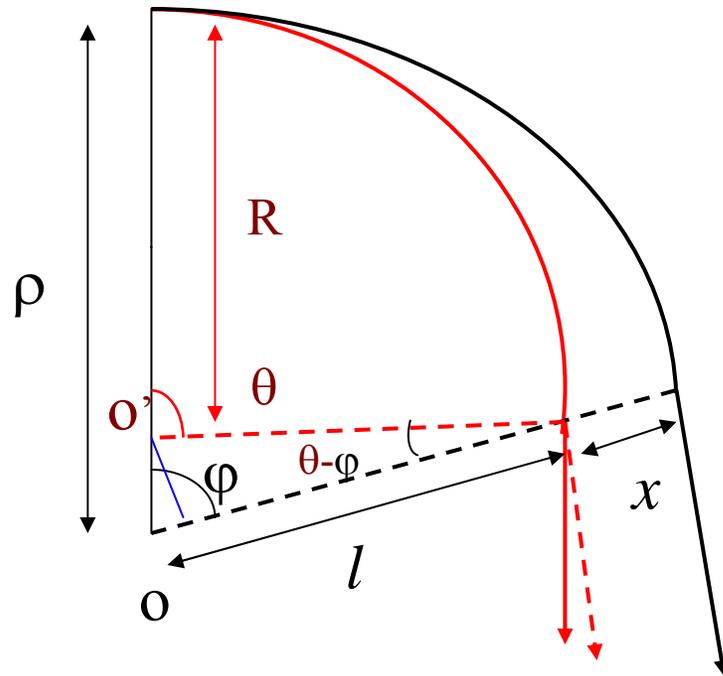
$\varphi$  = angle de déviation du dipole.

*Quelques cas particuliers: si  $\varphi=90^\circ$ , alors  $D=2 \rho$*

*si  $\varphi=360^\circ$ , alors  $D=0$*

D'une manière générale si un système optique possède une dispersion nulle, on dit qu'il est ***achromatique***.

# Approche simple des 'termes chromatiques' d'un dipôle secteur



$$R = \rho(1 - \Delta p/p), \quad \rho - R = -\rho(\Delta p/p)$$

$$l = (\rho - R)\cos\varphi + R\cos(\theta - \varphi) \approx (\rho - R)\cos\varphi + R$$

$$x = \rho - l = (\rho - R)(1 - \cos\varphi)$$

$$\mathbf{x} = -\rho(\Delta p/p)(1 - \cos\varphi)$$

$$x' \approx \theta - \varphi = ((\rho - R)\sin\varphi)/R = \rho(\Delta p/p)\sin\varphi/\rho(1 + \Delta p/p), \text{ soit}$$

$$\mathbf{x}' \approx -(\Delta p/p)\sin\varphi$$

Un aimant secteur peut donc être décrit par:

$$D = \begin{pmatrix} -\rho(1 - \cos\varphi) \\ -\sin\varphi \end{pmatrix} (\Delta p/p)$$

# PRINCIPE GENERAL D'UN ELECTROAIMANT

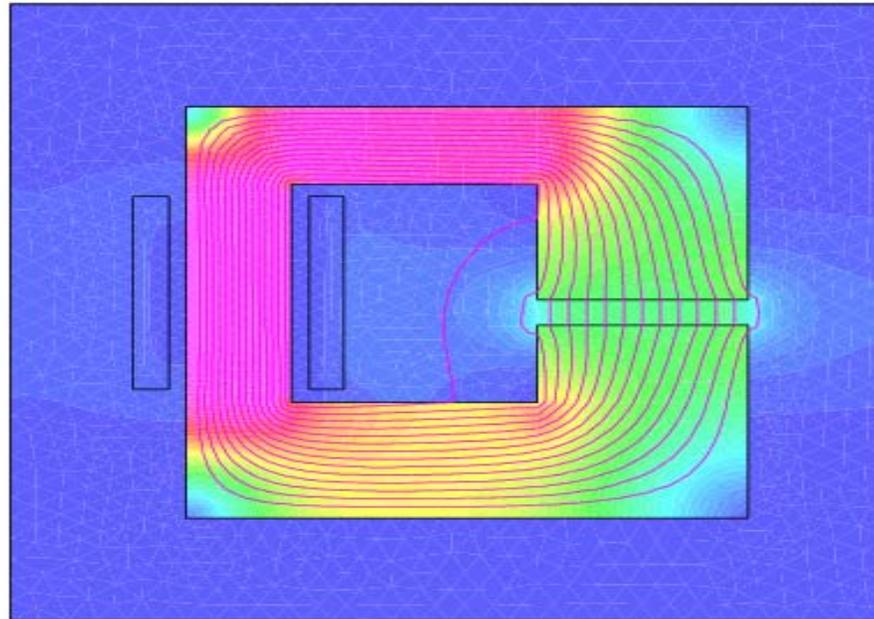
En vertu de  $\text{div } B = 0$ , les lignes du vecteur  $B$  sont refermées sur elles-mêmes.

Le rôle du circuit magnétique est de canaliser ces lignes (ou, ce qui revient au même, le flux magnétique).

$$\Phi = B S$$

$B$  croît  
quand la section diminue

$B$  décroît  
quand la section augmente



Component: BMOD  
2.93025E-05

0.762296

1.524563

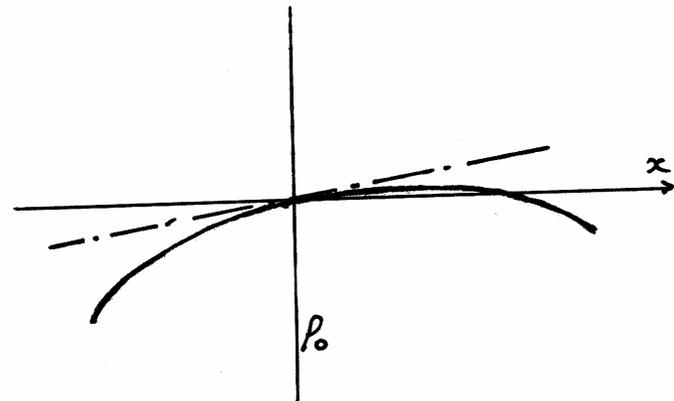
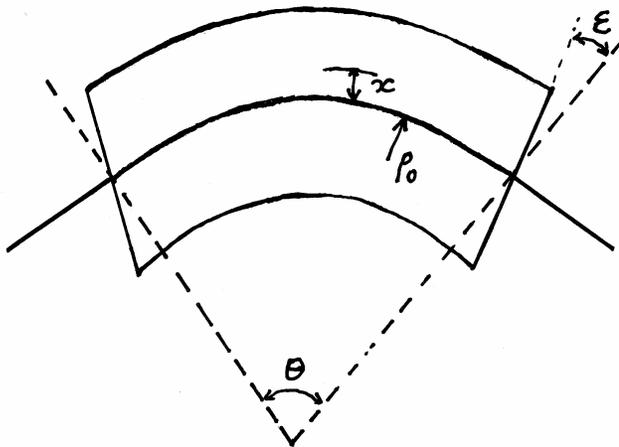
# DIPOLE

Il est généralement courbe

Il possède le plus souvent des faces d'entrée et de sorties pour la focalisation

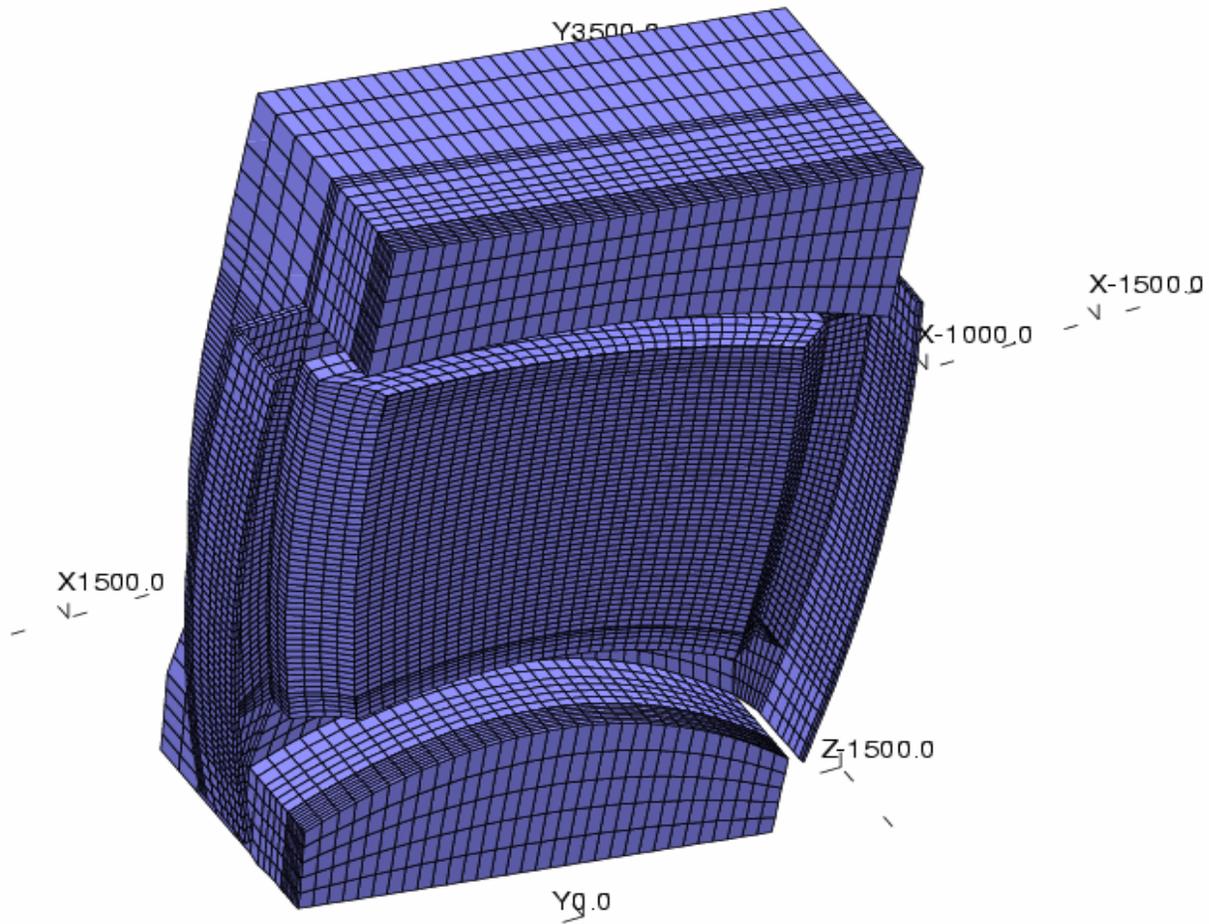
**Expression du champ :** 
$$B_x = B_0 \left( 1 - n \frac{x}{\rho} + \beta \frac{x^2}{\rho^2} + \dots \right)$$

Avec  $n$  indice (caractérise l'importance du gradient) → **Parallélisme des pôles**  
et  $\beta$  coefficient de champ du deuxième ordre → **Largeur des pôles**



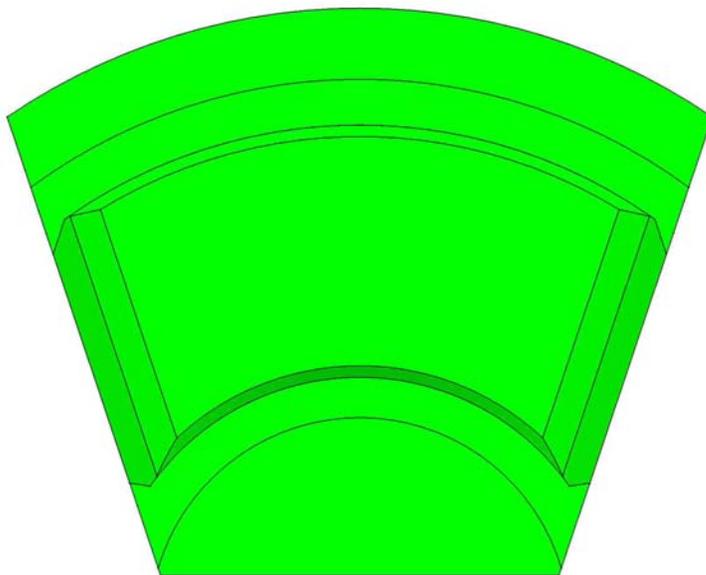
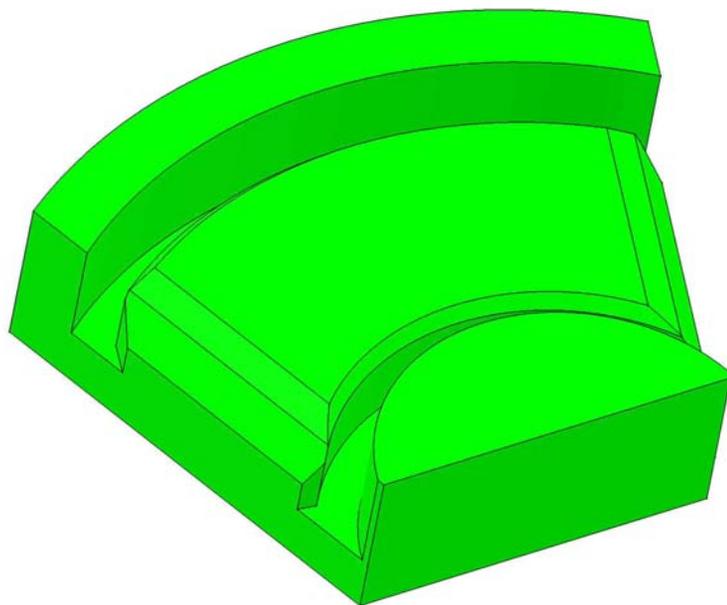
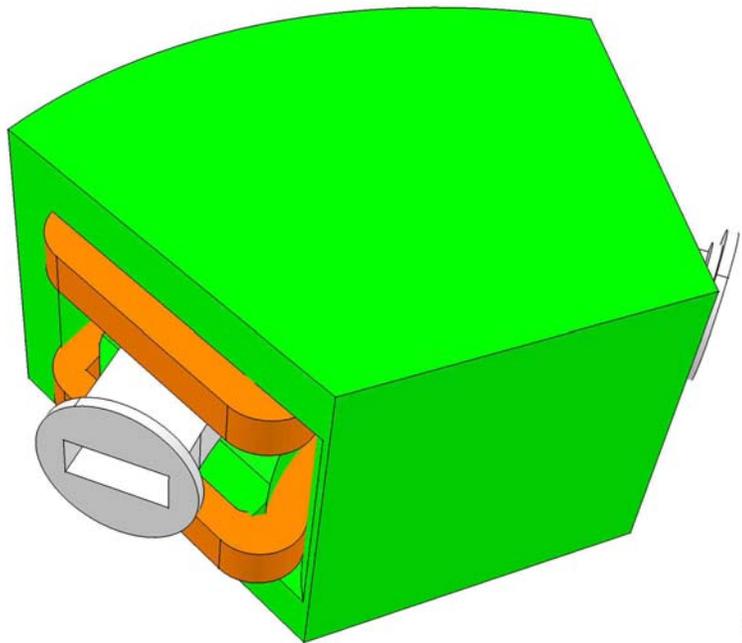
**On cherche à obtenir un champ homogène dans la zone utile du faisceau.**

# MODELISATION DIPOLE VAMOS



31/Jan/04 11:39:54 Pa

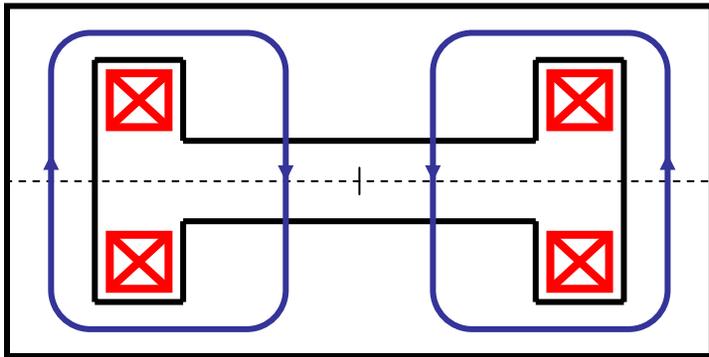
**V OPERA**



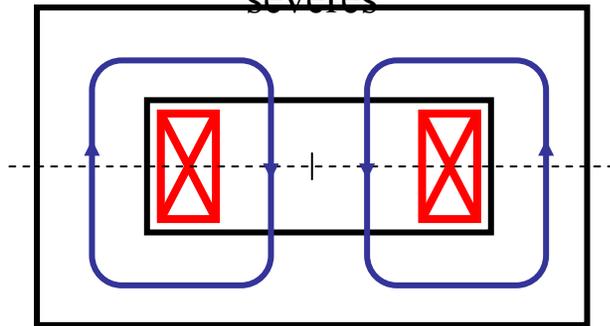
Les deux pôles - culasses  
du dipôle du spectromètre  
VAMOS

# TYPES DE DIPOLE

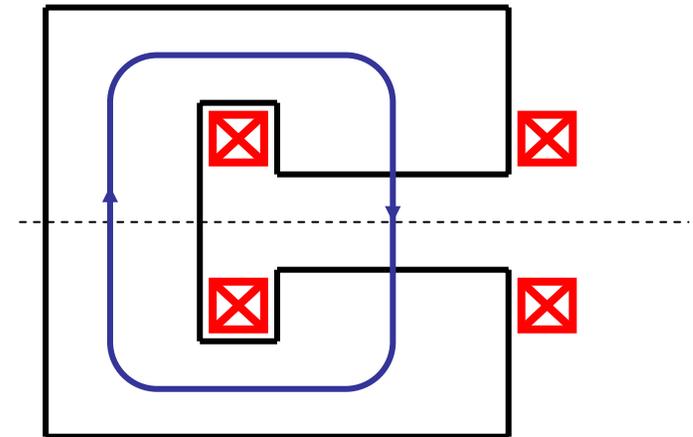
en **H** : le plus simple  
symétrique et bobines simples



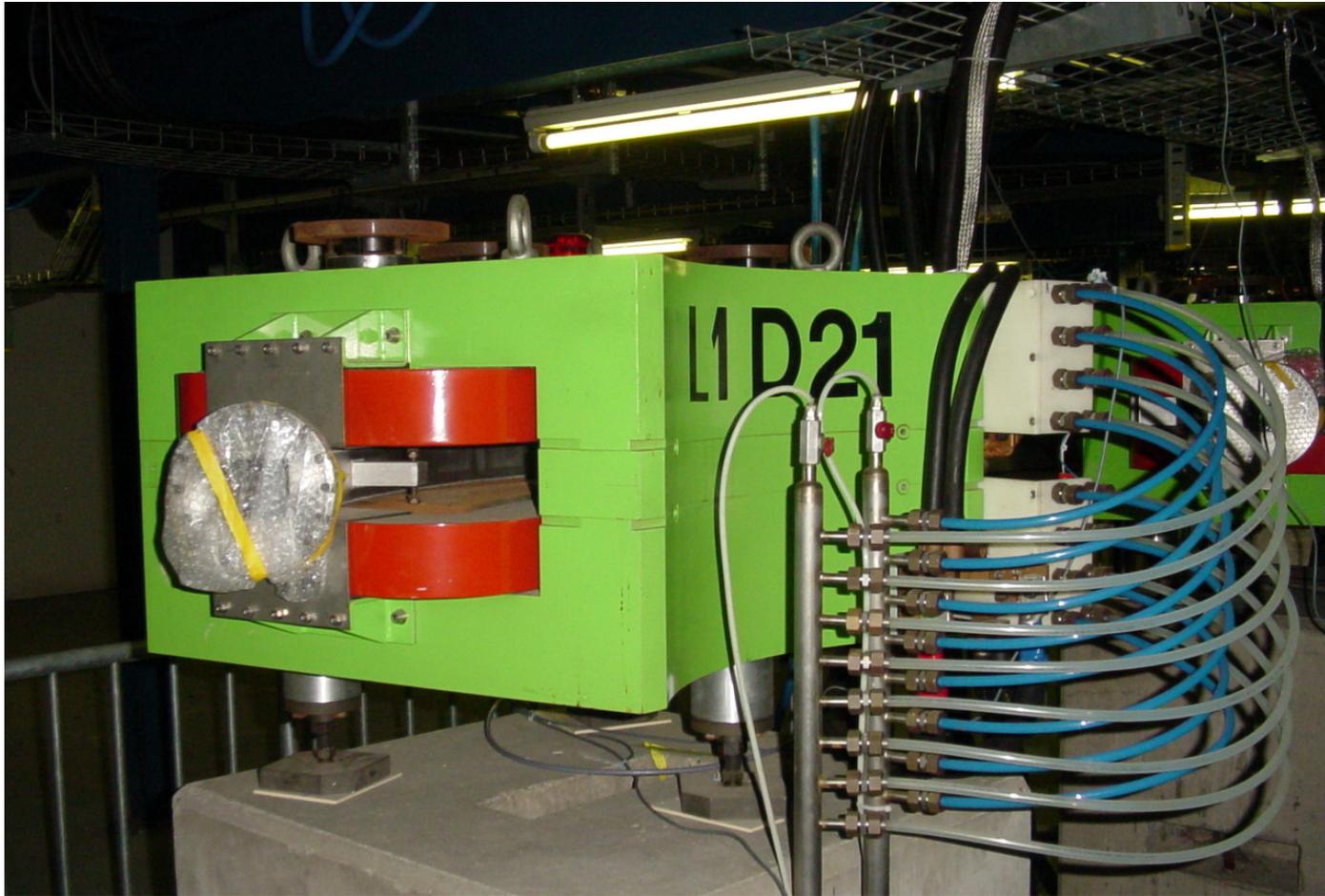
**Window Frame**  
largeur polaire minimisée  
bobines complexes à tolérances  
sévères



en **C** : retour de flux unique  
donne un indice



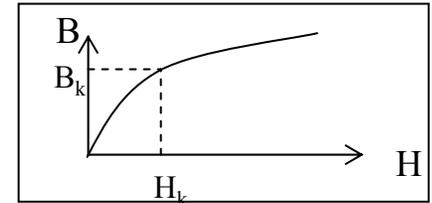
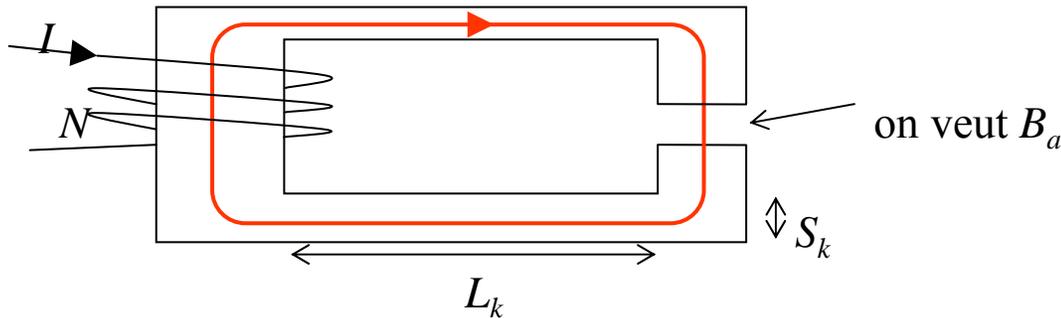
# DIPOLE



Le lien quantitatif entre les vecteurs du champ et les sources qui engendrent et font circuler le champ est donné par la loi d'**Ampère**.

$$\oint \vec{H} dl = N I$$

$$\begin{cases} B = \mu H \\ \sum H dl = N I \end{cases}$$



On peut découper le circuit magnétique en tronçons élémentaires  $l_k$ ,  $S_k$ .

Partant de l'induction  $B_k$  dans chaque tronçon, on trouve, d'après la courbe d'aimantation, les champs  $H_k$

Dans l'air, on a :  $H_{air} = B_a / \mu_0$

$$\longrightarrow N I = H_{air} l_{air} + \sum H_k l_k$$

## *Construire un 'système optique',*

par exemple *un spectromètre*, c'est imposer, maîtriser, une *matrice de transport* entre un point A et un point B, qui seront dans notre cas les points:

'**objet**'(cible), et '**image**' (détection), du spectromètre.

Exemples: un faisceau focalisé dans les deux plans se traduira au point de focalisation par:

$$T_{12} = T_{34} = 0.$$

un faisceau dispersé par  $T_{16} \neq 0$ .

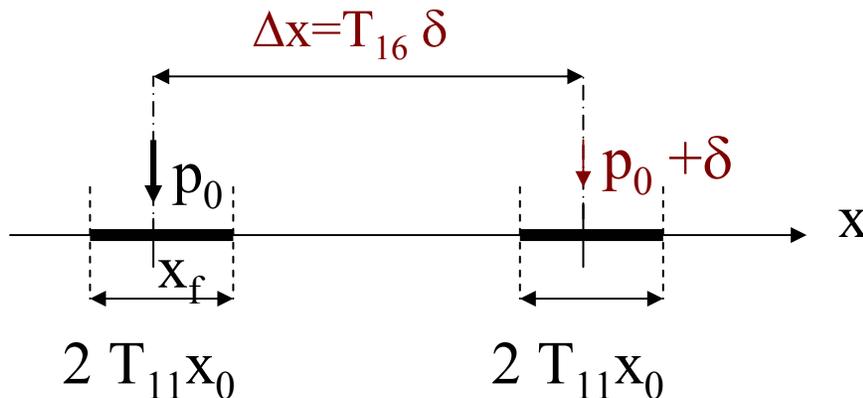
un faisceau achromatique par  $T_{16}=0$ ;

un faisceau doublement achromatique par  $T_{16} = T_{26}=0$ .

un faisceau parallèle par  $T_{22} = T_{44} = 0$ . etc...

Il est donc nécessaire pour jouer sur les variables de **position**, d'**angle**, de **dispersion** du faisceau, de disposer d'un certain nombre de paramètres: ce seront la position des différents éléments (sections droites entre éléments magnétiques), les quadrupôles et dipôles ainsi que les champs affichés dans ces derniers.

**Résolution d'un spectromètre:** plaçons nous en un point d'un système optique ou nous affichons une relation point-point ( $T_{12} = 0$ .) et une dispersion  $T_{16}$  non nulle. La position des particules en ce point s'exprime alors simplement par  $x = T_{11}x_0 + T_{16}\delta$ . (plan focal d'un aimant par ex.) Toutes les particules issues de l'objet  $x_0$ , ayant le même moment  $p_0$  soit un  $\delta = 0$ , viendront focaliser à l'intérieur d'une image de dimension  $x_f = T_{11}x_0$  ou  $x_0$  est la demi-largeur de l'objet. Par contre, celles qui auront un moment qui diffère de  $\delta$ , soit  $p = p_0 + \delta$ , viendront focaliser en une image décalée en  $x$  de  $T_{16}\delta$ .



-pour séparer les deux moments, différents de  $\delta$  il faut que la distance entre les deux images soit supérieure à  $2 T_{11}x_0$  soit:

$$T_{16} \delta \geq 2 T_{11}x_0$$

$$\text{ou } \delta_{\min} = 2 T_{11}x_0 / T_{16}$$

$\delta_{\min}$  donne la **résolution** du système. ( ou  $1 / \delta_{\min} = R$  )

Exemple, le spectromètre LISE à Ganil

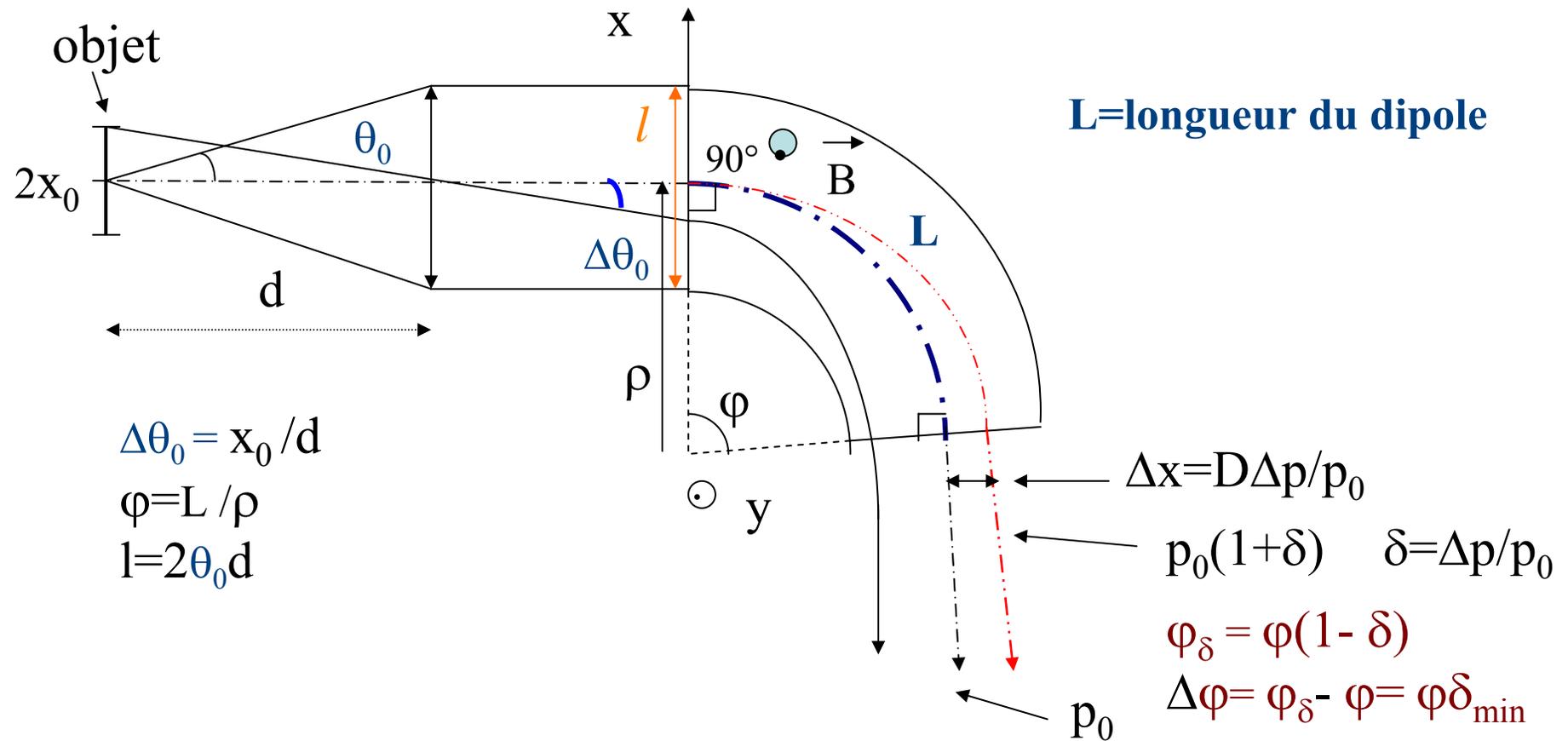
avec  $T_{11} = 0.8$ ,  $x_0 = 0.1$  cm, et  $T_{16} = 1.8$  cm/%

a une résolution  $R = 2 T_{11} x_0 / T_{16} = (2 \times 0.8 \times 0.1) / 1.8 \approx 10^{-3}$

## Résolution, émittance, acceptance.

Considérons le spectromètre ‘basique ’ suivant, (nous ne considérerons que le plan dispersif ( $x, s$ )) et ne nous occuperons pas par conséquent du mouvement dans le plan vertical.

Il est constitué d'un **quadrupole** et d'un **dipole**.



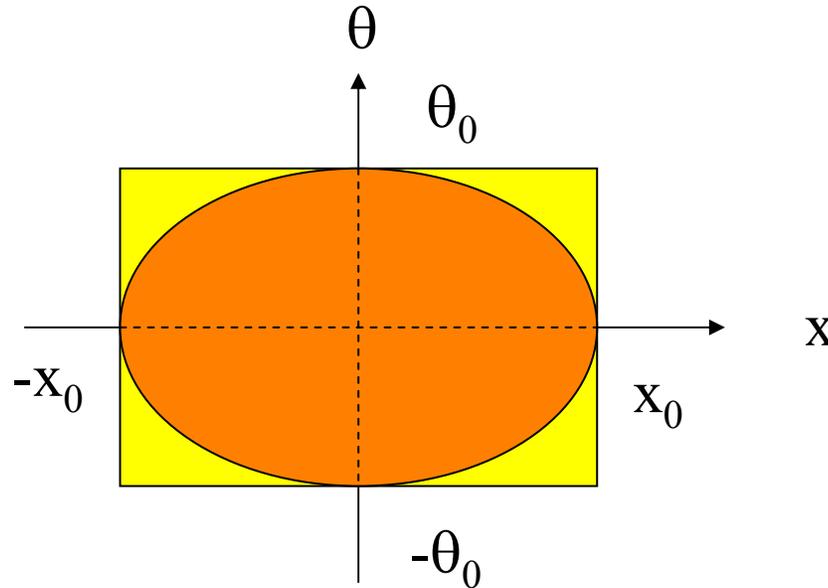
Pour séparer les deux moments la condition à remplir est la suivante:

$$\Delta\varphi > 2 \Delta\theta_0 = 2x_0 / d = (2x_0) 2\theta_0 / l \text{ soit } \delta_{\min} = 1/R = 4 x_0 \theta_0 / l \varphi = 4 x_0 \theta_0 \rho / l.L$$

-Le produit  $4 x_0 \theta_0$  est appelé **l'émittance** horizontale du faisceau.

-Ce résultat met en évidence que pour un dipole de rayon  $\rho$  donné, et un faisceau à analyser d'émittance donnée, la résolution du spectromètre croît comme la surface ( $l \times L$ ) du dipole, ou que pour un dipôle donné, le produit **résolution** x **émittance** est une constante.

Remarque: pour caractériser l'émittance d'un faisceau, on utilise le plus souvent l'ellipse de surface  $\Pi x_0 \theta_0$  et non le rectangle de surface  $4 x_0 \theta_0$ .

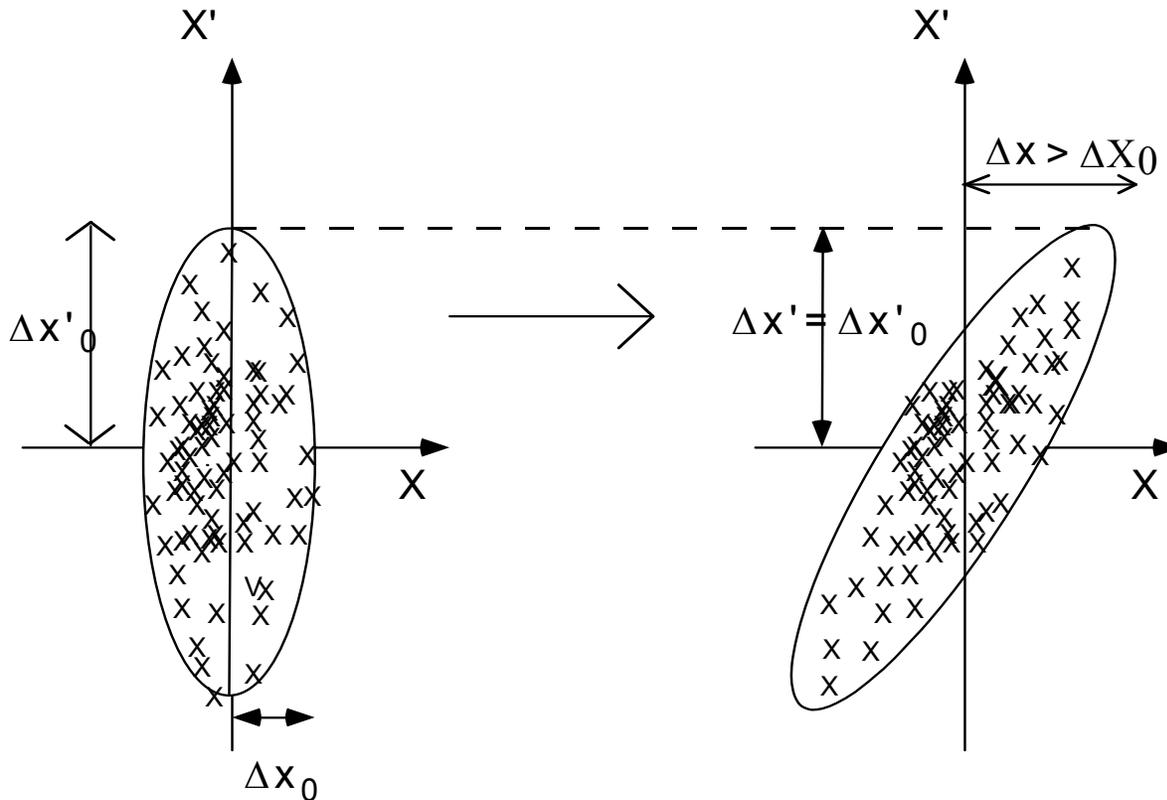


**important:** un système optique de transport de faisceau, *sans accélération*, conserve l'émittance du faisceau, c'est une conséquence du théorème de Liouville.

Tout comme un faisceau est caractérisé par son **émittance**, un système de transport de faisceau est caractérisé par son **acceptance**. L'acceptance, c'est l'émittance maximale qu'il peut transmettre. *Un système optimisé présentera une acceptance strictement égale à l'émittance du faisceau qu'il doit transmettre. Cela se traduira par un strict dimensionnement des dipôles, quadrupôles et éléments mécaniques du système.*

Transformation de l'émittance par un Espace sans champ (magnétique ou électrique)

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X'_0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{distance } L} \begin{pmatrix} X = X_0 + LX'_0 \\ X' = X'_0 \end{pmatrix}$$



**L'angle et la position ne sont plus indépendants.**

**1 nouveau paramètre est nécessaire pour décrire l'ellipse.**

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

faisceau: émittance  $\varepsilon$ ,  $\delta = \Delta p / p_0 = 0. \pm 2.5\%$

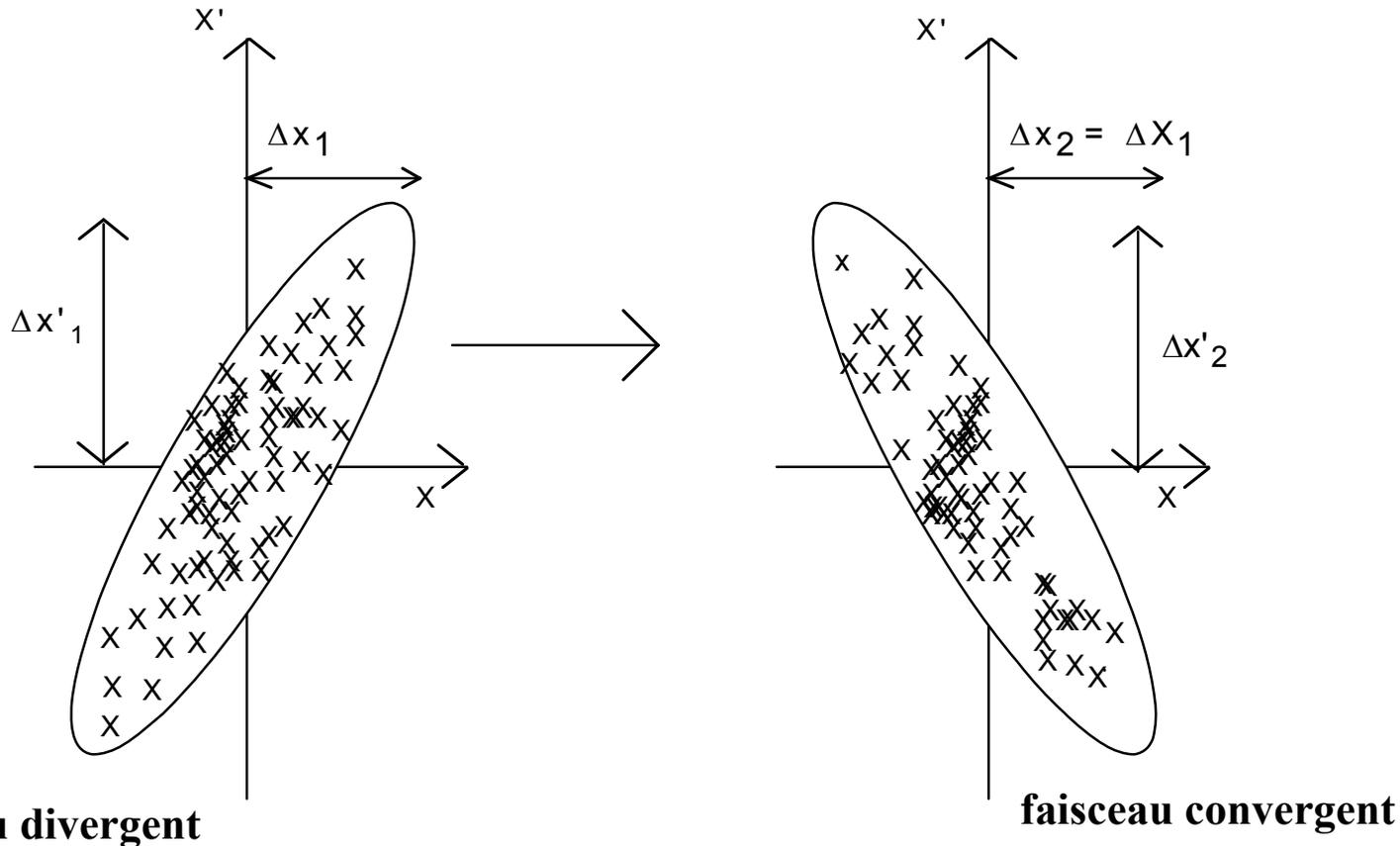
Simulation  
code Transport

évolution de l'émittance d'un faisceau dans un espace sans champ

## Transformation de l'émittance par un quadrupôle:

En première approximation :  $X' = -X/f$  (et  $Y' = Y/f$ )

Avec  $f = \frac{GL}{B\rho}$  où L est la longueur magnétique du quadrupôle



*$\varepsilon = \text{aire de l'émittance est toujours constante}$*

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

faisceau: émittance  $\varepsilon$ ,  $\delta = \Delta p / p_0 = 0. \pm 2.5\%$

Simulation  
code Transport

évolution de l'émittance d'un faisceau à travers un quadrupôle focalisant

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

faisceau: émittance  $\varepsilon$ ,  $\delta = \Delta p/p_0 = 0. \pm 2.5\%$

Simulation  
code Transport

évolution de l'émittance d'un faisceau à travers un quadrupôle défocalisant

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

faisceau: émittance  $\varepsilon$ ,  $\delta = \Delta p/p_0 = 0. \pm 2.5\%$

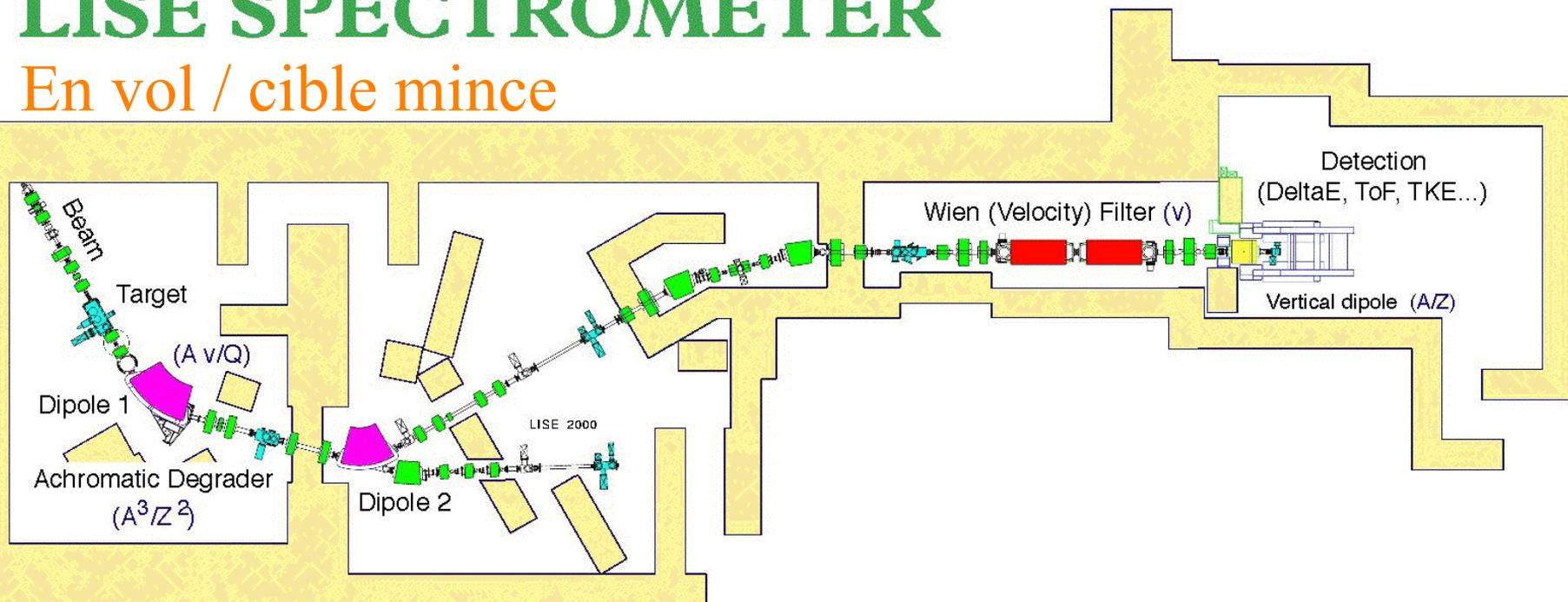
Simulation  
code transport

évolution de l'émittance d'un faisceau à travers un dipôle

# Le spectromètre LISE

# LISE SPECTROMETER

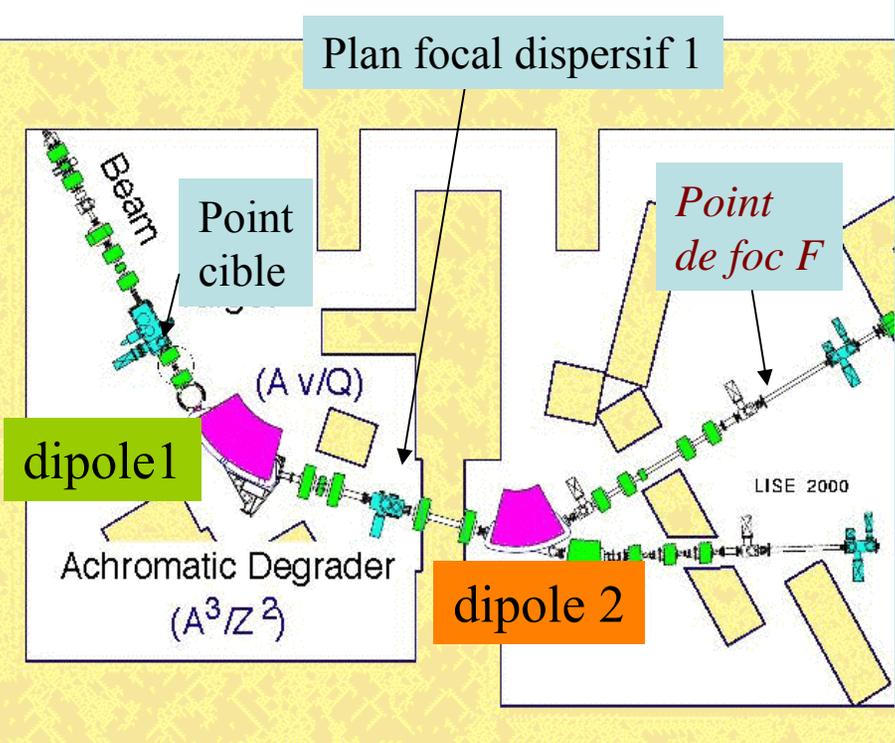
En vol / cible mince



Le spectromètre LISE a pour vocation principale de séparer et d'identifier **en vol** les noyaux exotiques produits à  $0^\circ$  dans les réactions nucléaires induites par le bombardement de **cibles 'minces'** à l'aide des faisceaux projectiles d'ions lourds issus des accélérateurs du Ganil. Le mécanisme de réaction nucléaire utilisé essentiellement pour ces expériences (production de noyaux exotiques rares et de faisceaux secondaires) est celui de la **fragmentation du projectile**.

Ce spectromètre est constitué de plusieurs **étages de sélection**, que nous allons examiner successivement.

Le premier étage est constitué du couplage de deux sous-ensembles dispersifs, (**Analyse** et **Compensation**), en un ensemble *non dispersif*.



Les termes de *dispersion* sont apportés par:

- le **dipole 1** pour l'analyse
- le **dipôle 2** pour la compensation.

- en ce qui concerne la *focalisation*, la matrice (**cible-plan focal dispersif-point de focalisation**) est du type *point-point*.

$T_F$  s'écrit donc comme suit: (*nous nous limiterons au plan dispersif horizontal: mat3x3*)

$$\begin{vmatrix} T_{11C} & \mathbf{0} & T_{13C} \\ T_{21C} & T_{22C} & T_{23C} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} T_{11A} & \mathbf{0} & T_{13A} \\ T_{21A} & T_{22A} & T_{23A} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_{11F} & \mathbf{0} & T_{13F} \\ T_{21F} & T_{22F} & T_{23F} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$T_C \quad \times \quad T_A \quad = \quad T_F$

**avec  $T_{13F} = T_{23F} = 0$**

C'est la *première sélection*, en  $B\rho$ :  $B\rho 0 = B\rho 1 = B\rho 2$

Les particules issues de l'interaction faisceau-cible sélectionnées et transmises au point de focalisation c.à.d au point de détection, ont le même  $B\rho\theta$  à  $\pm 2.5\%$ , leur position et leur angle au point de focalisation sont indépendantes de leur moment, ( $\delta$ ) donc:

$T_{13F} = T_{11C} \times T_{13A} + T_{13C} = 0$ ; ce qui entraine une relation entre les coefficients de dispersion et de grandissement:

$$T_{13C} = (x/x_0) = -T_{11C} \times T_{13A} \text{ et}$$

$$T_{23F} = T_{21C} \times T_{13A} + T_{22C} \times T_{23A} + T_{23C} = 0$$

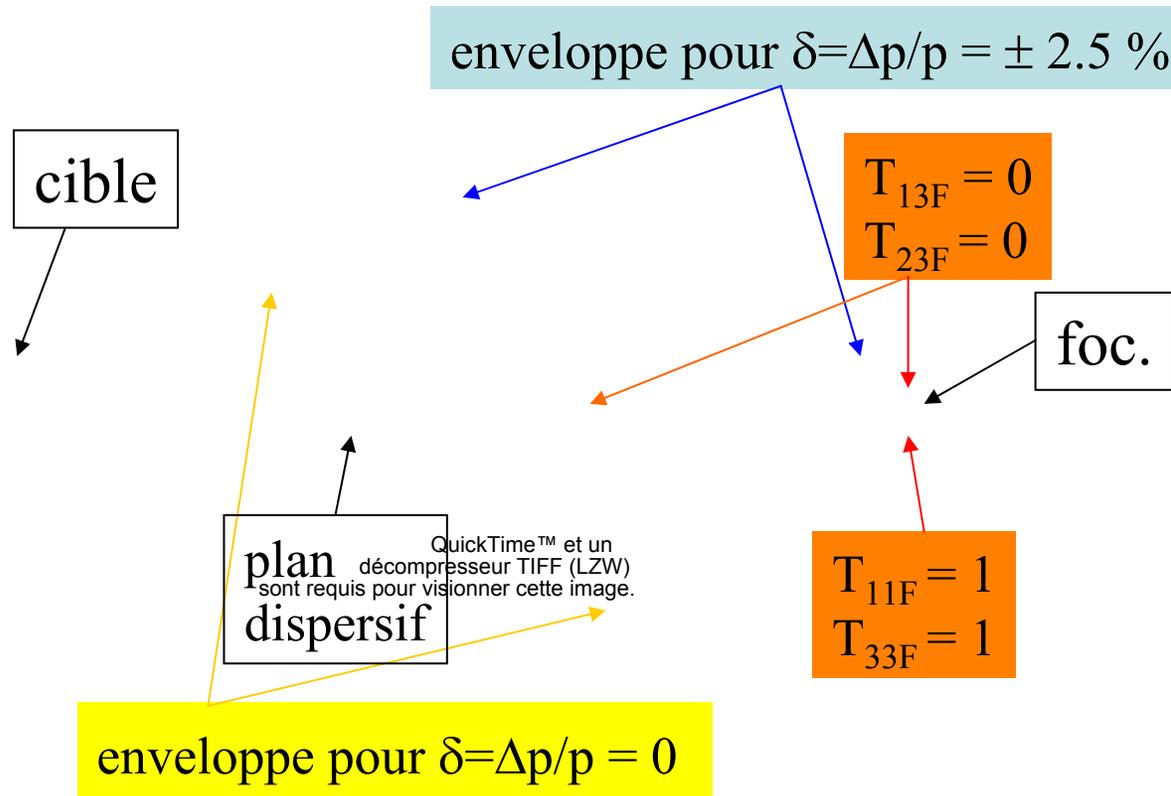
- par ailleurs, à ces conditions sur les termes chromatiques s'ajoutent celles sur les grandissements afin d'afficher la bonne résolution et d'adapter par exemple les dimensions du faisceau à celles de la détection:

$$T_{11C} \times T_{11A} = T_{11F} \text{ grandissement en position} = (x/x_0)$$

$$T_{22C} \times T_{22A} = T_{22F} \text{ grandissement en angle} = (\theta/\theta_0)$$

.....

# Enveloppe du faisceau dans le spectromètre LISE



## *Acceptance géométrique*

‘Fenêtre’ angulaire de transmission des particules.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

Coupures opérées par les différents éléments de la ligne, Q-poles, dipôles.

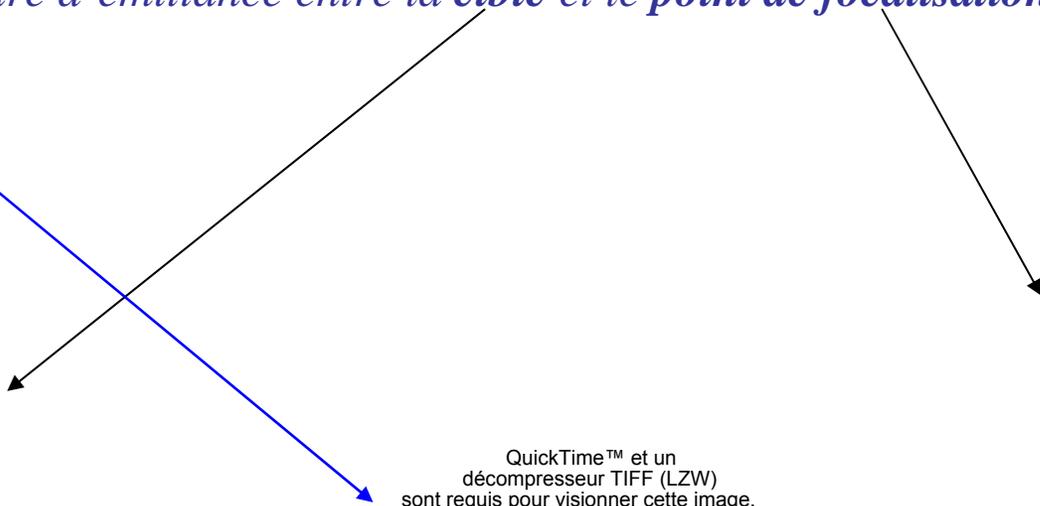
of LISE

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

fenêtre de transmission  
en moment

Coupures opérées par les différents  
éléments de la ligne, Q-poles, dipôles.

*Évolution de la figure d'émittance entre la **cible** et le **point de focalisation** en passant par le **plan dispersif***



QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

Simulation  
code Transport

configuration de l'émittance au **point cible** de LISE: faisceau focalisé.

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

configuration de l'émittance dans le **plan focal dispersif** de LISE

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

configuration de l'émittance dans le **plan focal final achromatique** de LISE

La *deuxième sélection* est opérée par la technique du *dégradeur achromatique*.

On dispose dans le plan focal du dipole d'analyse (1) réglé sur  $B\rho_1$  une feuille d'un matériau de nature et d'épaisseur  $e$  appropriées afin de **ralentir** sélectivement les particules du faisceau secondaire transmises par ce dipole. À la sortie du **ralentisseur** les particules ayant perdu l'énergie souhaitée  $\Delta E$  sont conduites par le dipole 2 (de compensation) réglé sur  $B\rho_2$ , au point de focalisation F. (*La variation transverse de l'épaisseur  $e(x)$  est calculée pour que la qualité optique de la ligne c.à.d son achromatisme soit préservée*).

$$\Delta E \approx \alpha(AZ^2/E)e$$

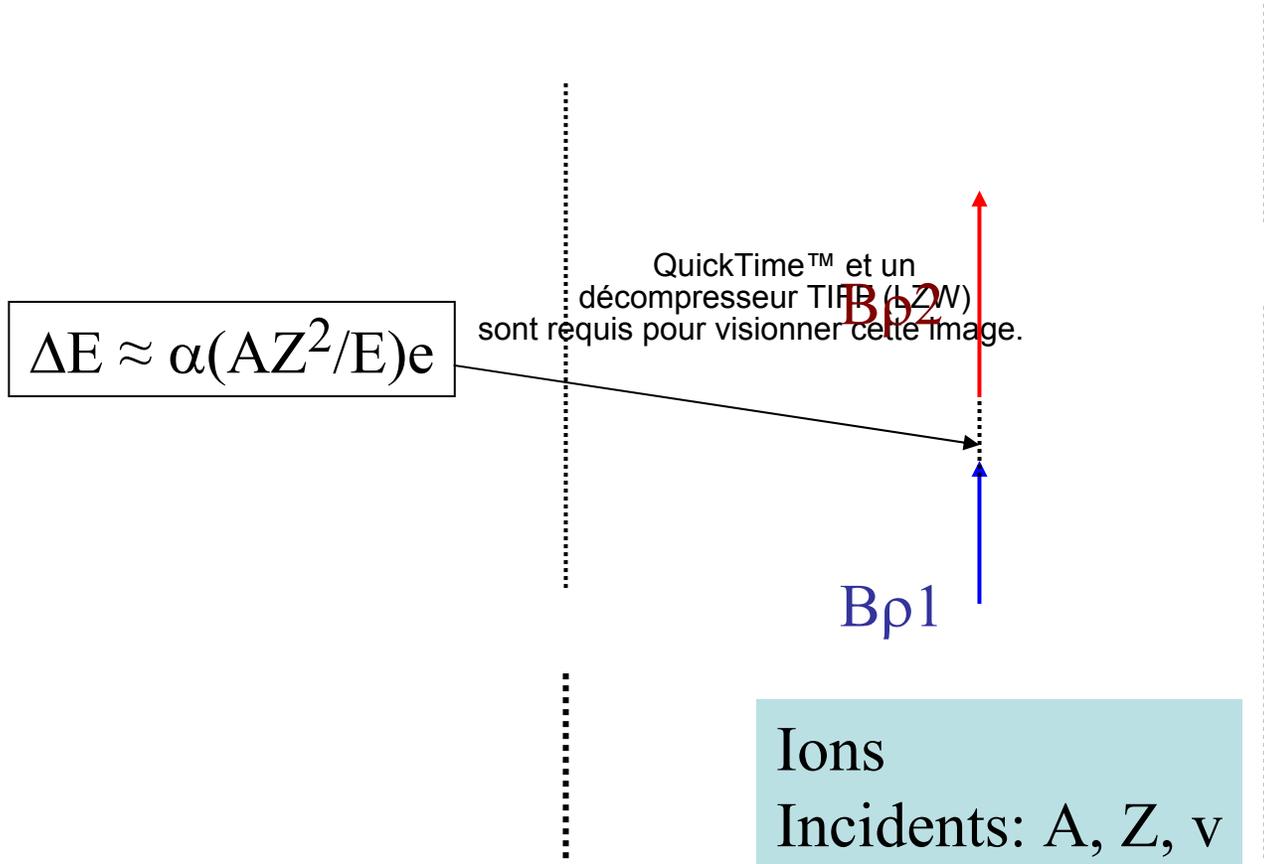
(approximation de la loi de perte d'énergie de Bethe-Bloch aux du Ganil dans un matériau d'épaisseur  $e$ )

$$\Delta B\rho/B\rho = 1/2 \Delta E/E$$

La combinaison 'perte d'énergie dans le dégradeur,  $B\rho$  du dipole 2', sélectionne tous les noyaux tels que:

$$\Delta B\rho/B\rho = k A^3/Z^2$$

dégradeur achromatique:  
(Sélection en  $A^3/Z^2$ )



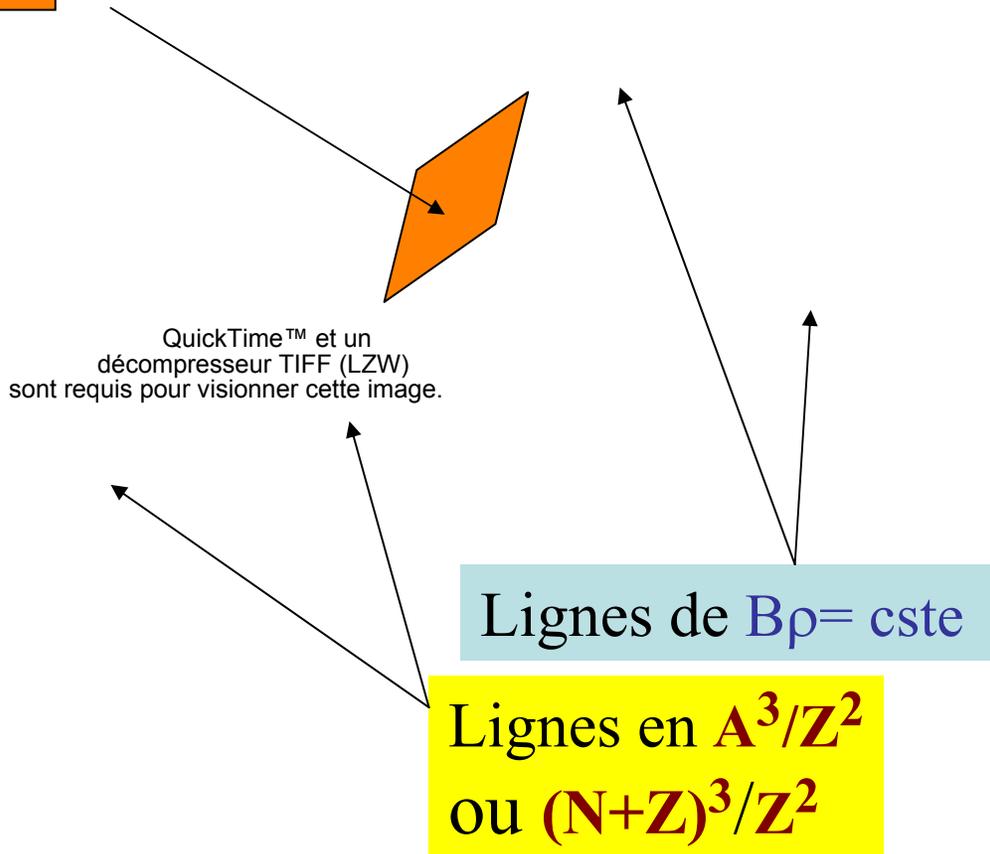
$^{39}\text{Ti}$

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

exemple:  
-sélection du  $^{39}\text{Ti}$   
et réjection de  $^{38}\text{Sc}$   
 $^{37}\text{Ca}$ ,  $^{36}\text{K}$ ..etc  
en fonction de  
l'épaisseur du  
dégradeur.

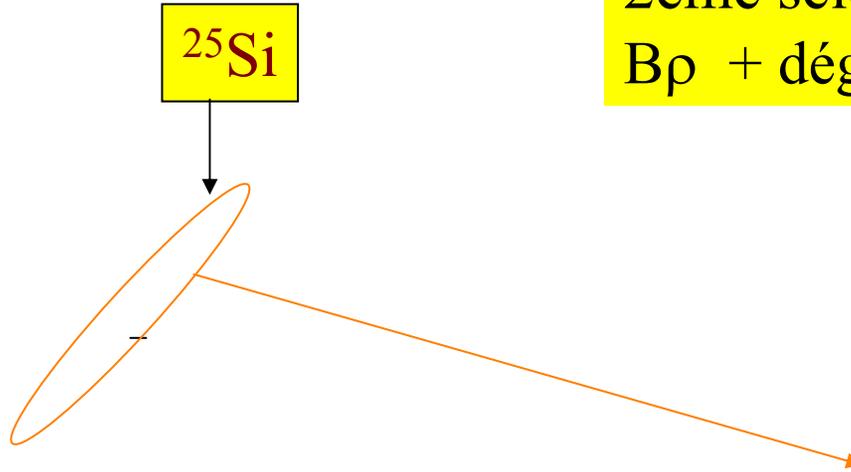
at the focal point

noyaux sélectionnés  
par intersection de:  
 $B\rho \pm 2.5\%$  avec  $A^3/Z^2$



Sélection par la combinaison: dégradateur achromatique +  $B\rho$

2eme sélection par  
 $B\rho$  + dégradeur



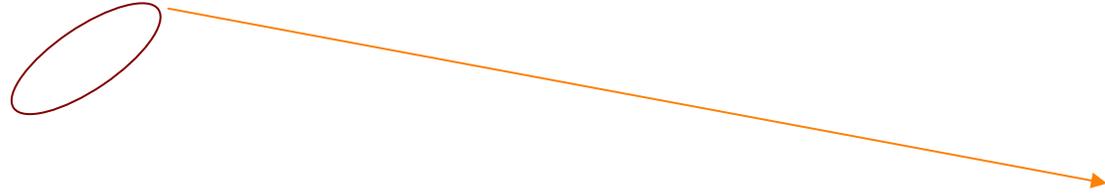
QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

1<sup>ere</sup> Selection par  $B\rho$  ( $A\nu/z$ )

*un exemple de double sélection  $B\rho$  + dégradeur*

Exemple de sélection par  $B\rho \pm \Delta B\rho$  et dégradeur

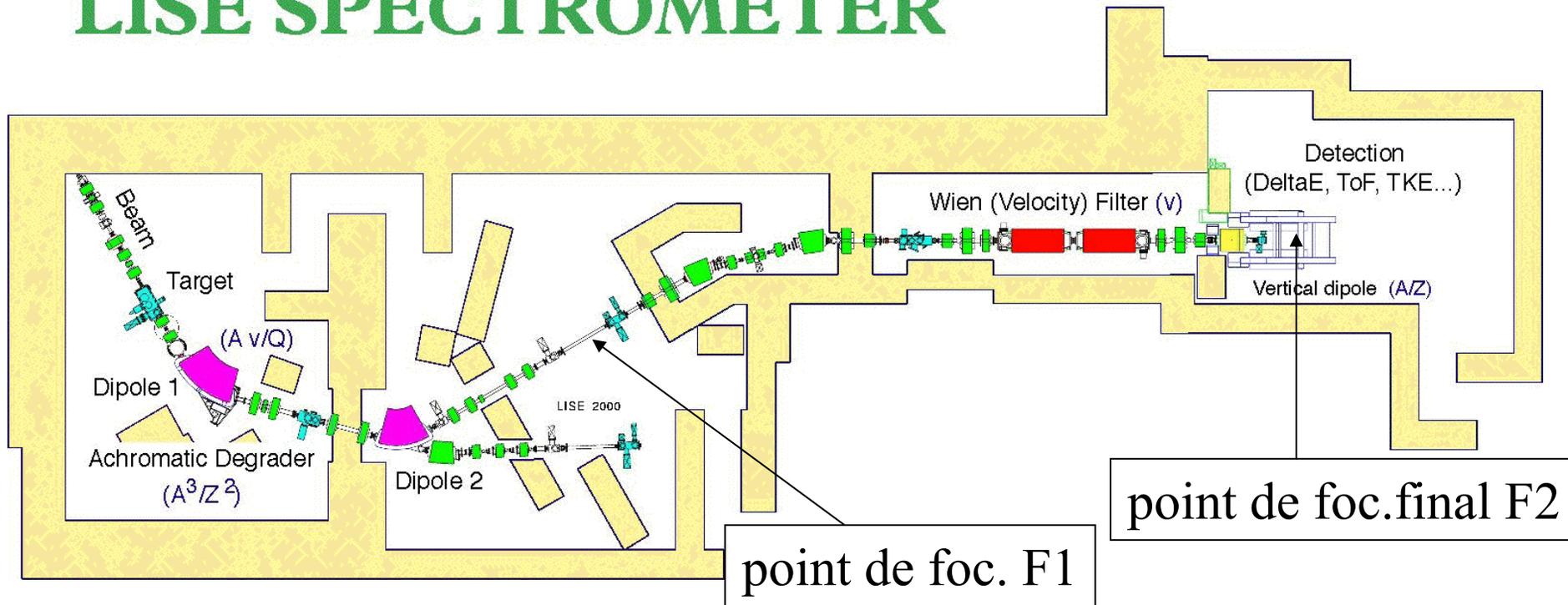
*Variation de  $B\rho$*



QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

*d'après R.Bimbot et al*

# LISE SPECTROMETER

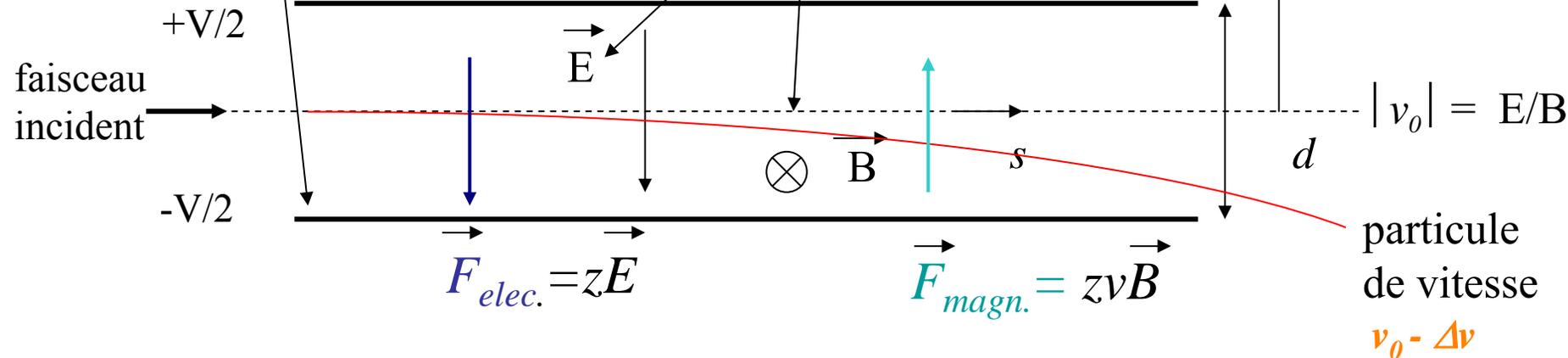


Dans ce qui précède nous avons vu le résultat des sélections opérées par le couplage **B<sub>p</sub> + dégradeur**, observé au point de focalisation **F1**. Dans ce qui suit, nous allons voir l'effet d'une 3<sup>ème</sup> sélection, en vitesse, opérée par un filtre. Le filtre est du type 'filtre de Wien' c.à.d. avec champs magnétique B et électrostatique E croisés. (les mesures sont alors effectuées en F2).

3eme sélection  
Le filtre de vitesse  
du type filtre de Wien

# Principe du filtre de Wien:

Lames portées à la HT



Lorsqu'elles traversent le filtre, les particules subissent la force  $\vec{F} = z (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$  et sont déviées en angle  $x'$  et en position  $x$  comme suit:

$$x' = (z/A v_0) B l (\Delta v/v)$$

$$x = (zE/2p v_0) l^2 (\Delta v/v)$$

(voir démonstration dans les diapos suivantes).

restent sur l'axe optique les particules dont la vitesse est  $|v_0| = E/B$

*Nous supposons (pour simplifier) que la charge de l'ion est égale au numéro atomique Z, (ion complètement épluché c.à.d sans aucun électron,) ce qui à haute énergie au ganil est la plupart du temps vrai. (voir diapo 'états de charges')*

L'équation du mouvement d'une particule de vitesse  $v$ , de charge  $z$  et de masse  $A$  dans un tel champ est:(on supposera que les ions ont une charge égale  $z$ )

$$A(d^2x/dt^2) = z (E+vB)$$

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

$$A(d^2x/dt^2)$$

$$z (E+vB)$$

$$x' = -(zE/pv_0)l(\Delta v/v) \quad = \text{déviation angulaire } \theta$$

ou  $\theta = (z/Av_0)Bl(\Delta v/v)$

$$x = -(zE/2pv_0)l^2(\Delta v/v)$$

# Résolution d'un tel système

d'émittance  $\varepsilon$

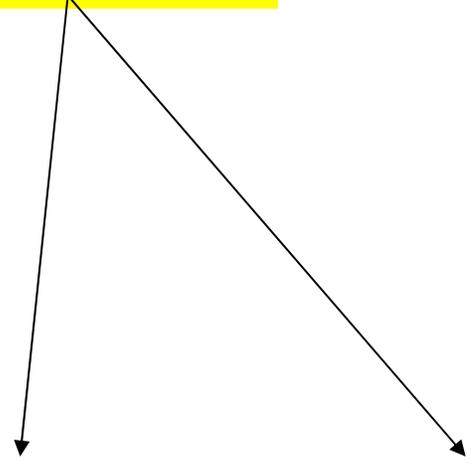
QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

$\theta$

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

$$R \leq d \cdot \theta / \varepsilon$$

filtre de Wien



QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

Point objet

Point image

plan vertical

Enveloppe du faisceau de particules sélectionnées par l'ensemble 'spectromètre + **filtre**'

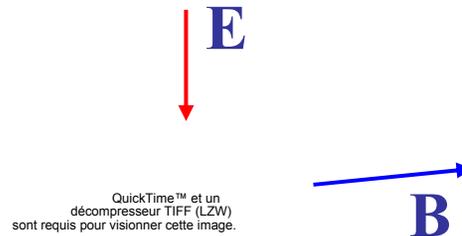
Caisson 2

Caisson 1

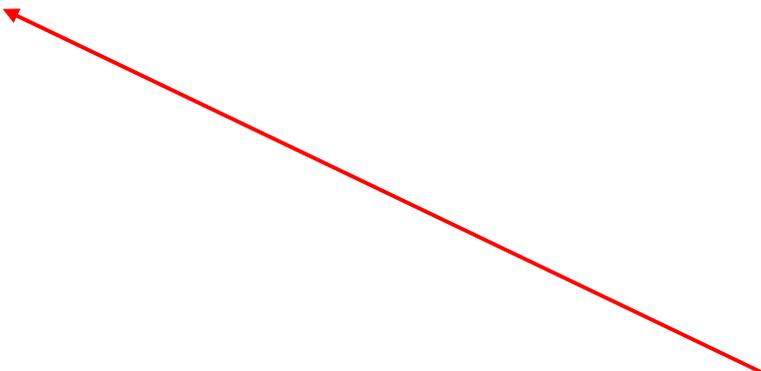
QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

## Filtre de vitesse du spectromètre LISE

# Filtre de vitesse du spectromètre LISE



$L =$  longueur de champ: 4.5 m  
 $E_{\max} = 4 \cdot 10^6 \text{ V/m}$   
 $B_{\max} = 0.11 \text{ T}$



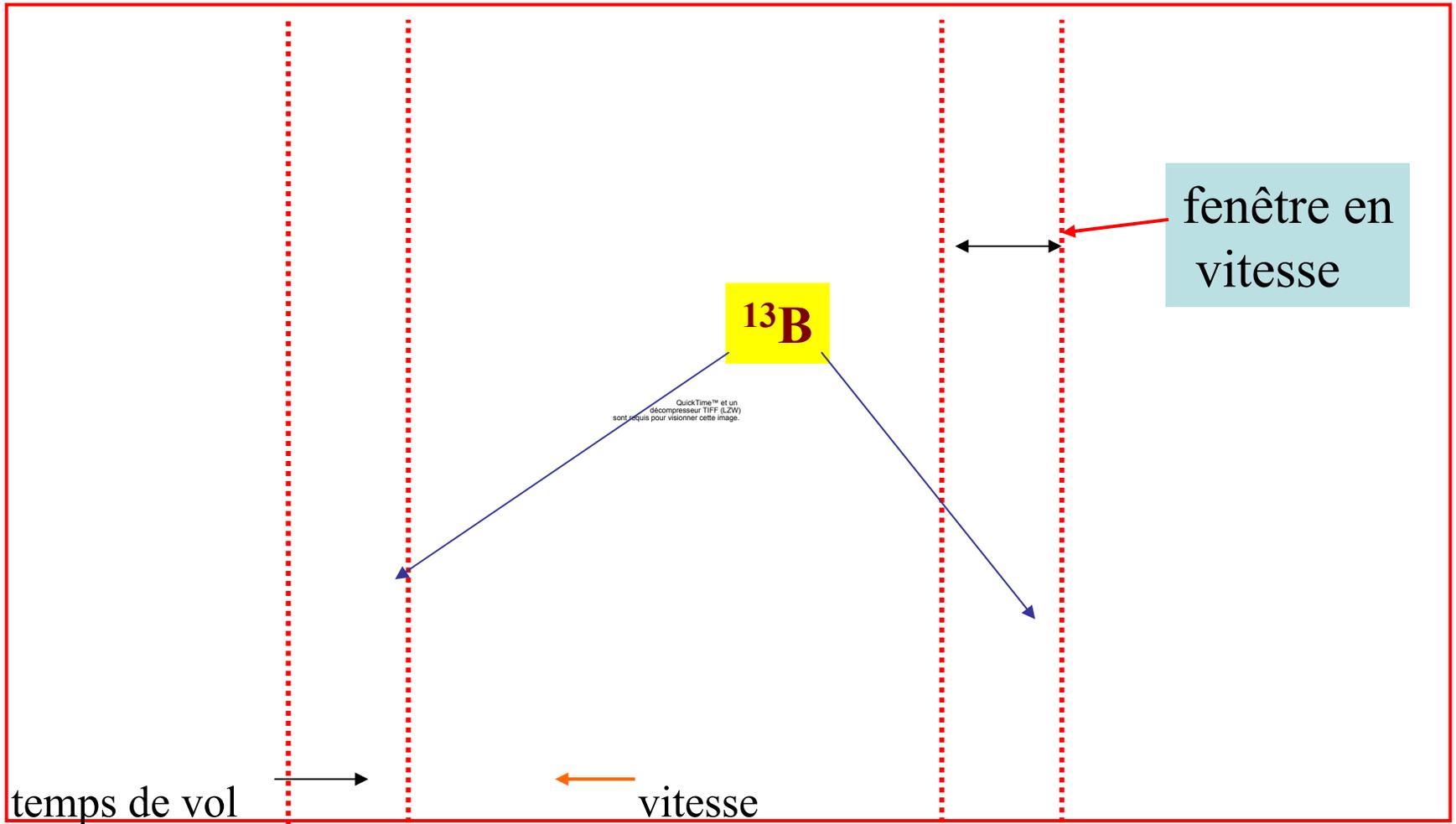
QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

Point de focalisation  
dispersion en  
vitesse  $\leq 10$  mm/°

## Sélection par $B\rho$ + filtre de vitesse.

- Ar 44MeV/u sur cible de Ta 166mg/cm<sup>2</sup>
- mesure effectuée au point de focalisation à l'aide de jonctions silicium .

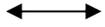
ouverture des fentes 'en vitesse'  
= 3mm ;  $D_v = 1.5 \text{ mm}/\% \Rightarrow$   
 $dv/v = 2\%$



# déplacement de la 'fenêtre' en vitesse, dans le spectre $\Delta E$ , $T_{vol}$

$\Delta E$

$$\Delta v/v \approx 2\%$$



temps de vol



vitesse

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

# Simulations / mesures production/identification

Ex: production du noyau  
de  $^{20}\text{Mg}$  par fragmentation  
d'un faisceau de  $^{24}\text{Mg}$   
sur une cible de Ni.  
Simulation obtenue  
par le code LISE++

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

Production d'un *faisceau secondaire* de  $^{20}\text{Mg}$  à partir de la fragmentation  
d'ions de  $^{24}\text{Mg}$  de 90 MeV/u sur une cible de Ni de 240mg/cm<sup>2</sup> :  $i = 300\text{nAe}$

soit  $n \approx 1.5 \cdot 10^{11}$  p/sec

$\Delta E$

mesure

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.



1<sup>ere</sup> sélection, par le  $B\rho$  : taux de comptage  $\approx q \cdot 10^8/\text{sec}$

$T_{\text{vol}}$

Production d'un *faisceau secondaire de  $^{20}\text{Mg}$*  à partir de la fragmentation  
d'ions de  $^{24}\text{Mg}$  de 90 MeV/u sur une cible de Ni de 240mg/cm<sup>2</sup> :  $i = 300\text{nAe}$

$\Delta E$

mesure

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

2eme sélection, par le dégradeur achromatique **taux de comptage**  $\approx \frac{\mathbf{T}_{\text{vol}}}{\text{qq}} 10^4/\text{sec}$

Production d'un *faisceau secondaire* de  $^{20}\text{Mg}$  à partir de la fragmentation d'ions de  $^{24}\text{Mg}$  de 90 MeV/u sur une cible de Ni de 240mg/cm<sup>2</sup> :  $i = 300\text{nAe}$

$\Delta E$

mesure

pureté du faisceau > 99.8%

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

contaminant  $^{18}\text{Ne}$   


3eme sélection, par le filtre de vitesse:    **taux de comptage  $\approx 310^2/\text{sec}$**   $T_{\text{vol}}$

# Production de $^{20}\text{Mg}$ ..... simulation

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

simulation

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

simulation

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

découverte de  $^{100}\text{Sn}$

$^{112}\text{Sn}$  (58MeV/n + Ni  
Sélection par BRO ...et..

électrodes HT

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

# 4eme sélection: le spectromètre de masse

**4eme sélection, en  $A/Z$  ( $A/q$ ):** On supposera dans la suite, pour simplifier, que la charge  $q=Z$ , c.à.d. que les noyaux sont épluchés (n'ont plus d'électrons), ce qui est très souvent le cas aux énergies du Ganil. (nous reviendront sur la notion d'états de charges).

-les particules sélectionnées par le filtre de vitesse ont la vitesse  $v_0 = E/B_f$

-celles ayant une vitesse qui diffère de  $\Delta v$  sont déviées d'un angle

$$\theta = (z/Av_0) B_f l_f (\Delta v/v_0).$$

Que se passe-t-il si à la sortie du filtre les particules traversent un dipôle?

Rappel: l'équation de base d'un dipôle est:  $B\rho = Av/z$ , or  $\rho = l_{dip}/\varphi_0 \Rightarrow$

$$\varphi_0 = B_{dip} l_{dip} z/Av_0, \text{ déviation d'une particule de vitesse } v_0$$

-une particule ayant la vitesse  $v - \Delta v$  sera, elle, déviée de:

$$\varphi = B_{dip} l_{dip} z/Av_0 (1 - \Delta v/v)$$

L'ensemble **filtre+dipole** déviara donc la particule d'un angle:

$$\theta_t = \theta + \varphi = (z/Av_0) B_f l_f (\Delta v/v_0) + B_{dip} l_{dip} z/Av_0 (1 - \Delta v/v) =$$

$$(z/Av_0) (B_f l_f - B_{dip} l_{dip}) \Delta v/v_0 + B_{dip} l_{dip} z/Av_0 = B_{dip} l_{dip} z/Av_0 \quad \text{si } B_f l_f = B_{dip} l_{dip} \text{ soit}$$

$$B_f l_f (z/AE/B_f) \Rightarrow \theta_t = (B_f^2 l_f / E) (z/A) \Rightarrow \text{Séparation en } z/A$$

Cela signifie que les particules sont 'refocalisées en vitesse autour de

chaque  $A/z$  Spectromètres - Roscoff 13-21 juin 2007 Remy ANNE et que leur **position** sur la focale ne dépend que de  $A/z$  <sup>108</sup>

φ

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

Comparaison sur un exemple, des séparations effectuées :

1/ par l'ensemble spectromètre + filtre,

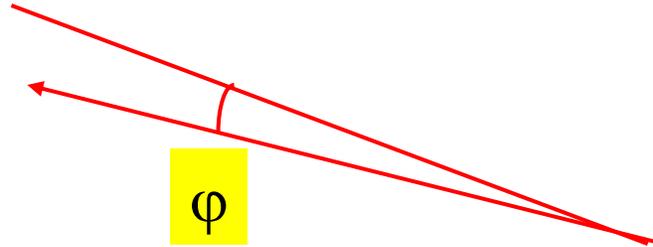
2/ par l'ensemble spectromètre + filtre + dipole.

*L'exemple choisi est celui de la fragmentation de  $^{40}\text{Ar}$  à 85 MeV/u sur une cible de Ni (380 mg/cm<sup>2</sup>) avec dégradeur achromatique en Al de 180 mg/cm<sup>2</sup>*

dipôle du spectromètre  
de masse de LISE.

*La déviation de ce dipôle  
est verticale car le filtre  
de vitesse amont avec lequel  
il est couplé, sélectionne  
les noyaux dans le plan  
vertical.*

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.



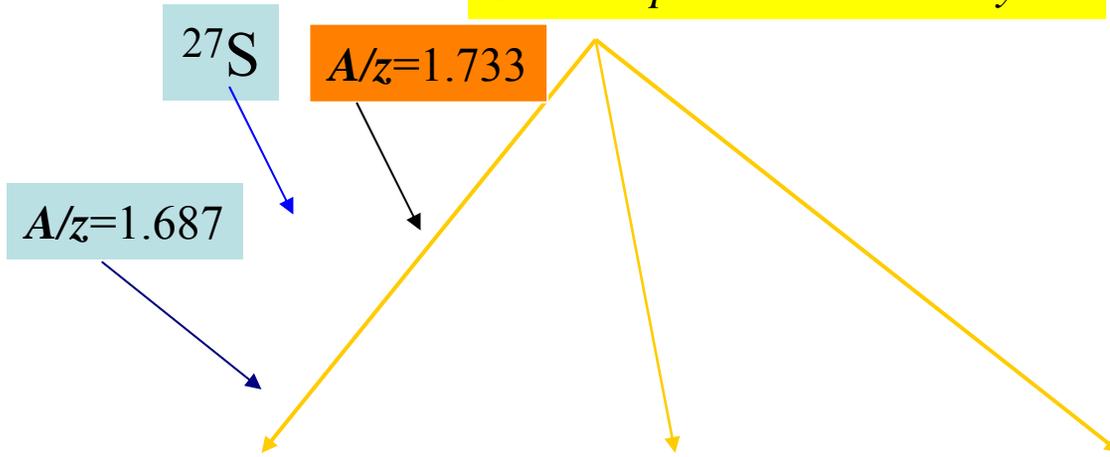
Filtre de vitesse amont 

dipôle de  
déviation verticale

$\varphi$

QuickTime™ et u.  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

## Taux de production des noyaux

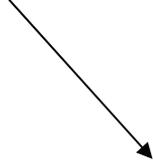


QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

focale →

1/ séparation des particules sur la focale (*dispersive en vitesse*) de l'ensemble *spectromètre + filtre* ( $^{40}\text{Ar}$  à 85 MeV/u sur une cible de Ni (380 mg/cm<sup>2</sup>))  
Les différents noyaux sont **incomplètement séparés**

$$A/z=1.687$$



noyau sélectionné



QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

distance mm

2/ séparation des particules sur la focale (*dispersive en  $A/z$* ) de l'ensemble  
*spectromètre + filtre + dipôle* ( $^{40}\text{Ar}$  à 85 MeV/u sur une cible de Ni (380 mg/cm<sup>2</sup>))  
Les différents noyaux sont **complètement séparés**

# Ensemble magnétique-électrostatique LISE

$10^{12}/\text{sec}$

en résumé: 4 sélections

1

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

$10^{-3}$  à qq $10^3/\text{sec}$

$10^{7-8}/\text{sec}$

$10^{4-6}/\text{sec}$

Ordre de grandeur des taux de comptage

# SPEG: Spectromètre à *Perte d'Énergie* Ganil.

## un spectromètre de haute résolution

- Reprenons le concept d'un ensemble doublement achromatique basé sur le couplage de deux ensembles dispersifs, tel que décrit diapos 70-71 et représenté diapo 117, (mais au lieu du dégradeur,) plaçons la cible qui reçoit le faisceau primaire, dans le plan focal intermédiaire de l'ensemble.

Le faisceau  $y$  est focalisé ( $T_{12A} = 0$ ) **mais également** analysé en moment ( $T_{16A} \neq 0$ .)

Nous avons les relations suivantes:(voir diapo 117)

$$X_i = T_{11A} X_0 + T_{12A} \theta_0 + T_{16A} \delta, \text{ avec } T_{12A} = 0 \text{ au plan focal de l'analyseur}$$

$$X_f = T_{11S} X_i + T_{12S} \theta_i + T_{16S} \delta, \text{ avec } T_{12S} = 0 \text{ au plan focal du spectromètre}$$

$$\text{Soit sur la focale: } X_f = T_{11S} (T_{11A} X_0 + T_{16A} \delta) + T_{16S} \delta$$

-imposons la condition  $\partial X_f / \partial \delta = 0$ , on obtient:

$$\partial X_f / \partial \delta = \mathbf{T_{11S} T_{16A} + T_{16S}} = \mathbf{0} \quad (\text{identique à diapo.71})$$

-regardons ce qui se passe lors d'une réaction nucléaire induite dans la cible et conduisant à un changement de moment  $\delta_r = \Delta p_r / p$ :

- la particule ayant un  $\delta_0$  incident, aura après la réaction un  $\delta$  total

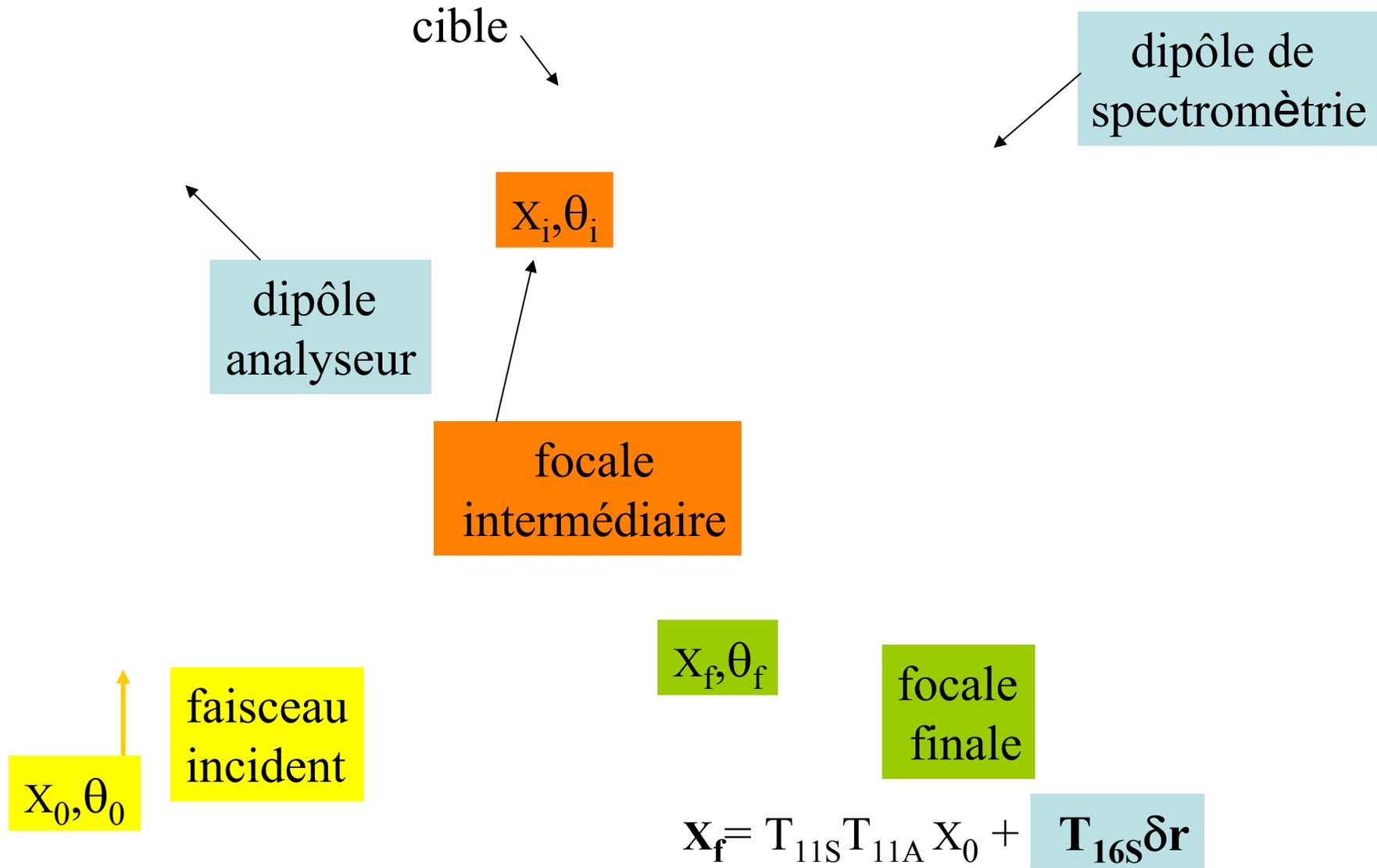
$\delta_t = \delta_0 + \delta_r$ . Sa position sur la focale sera la suivante:

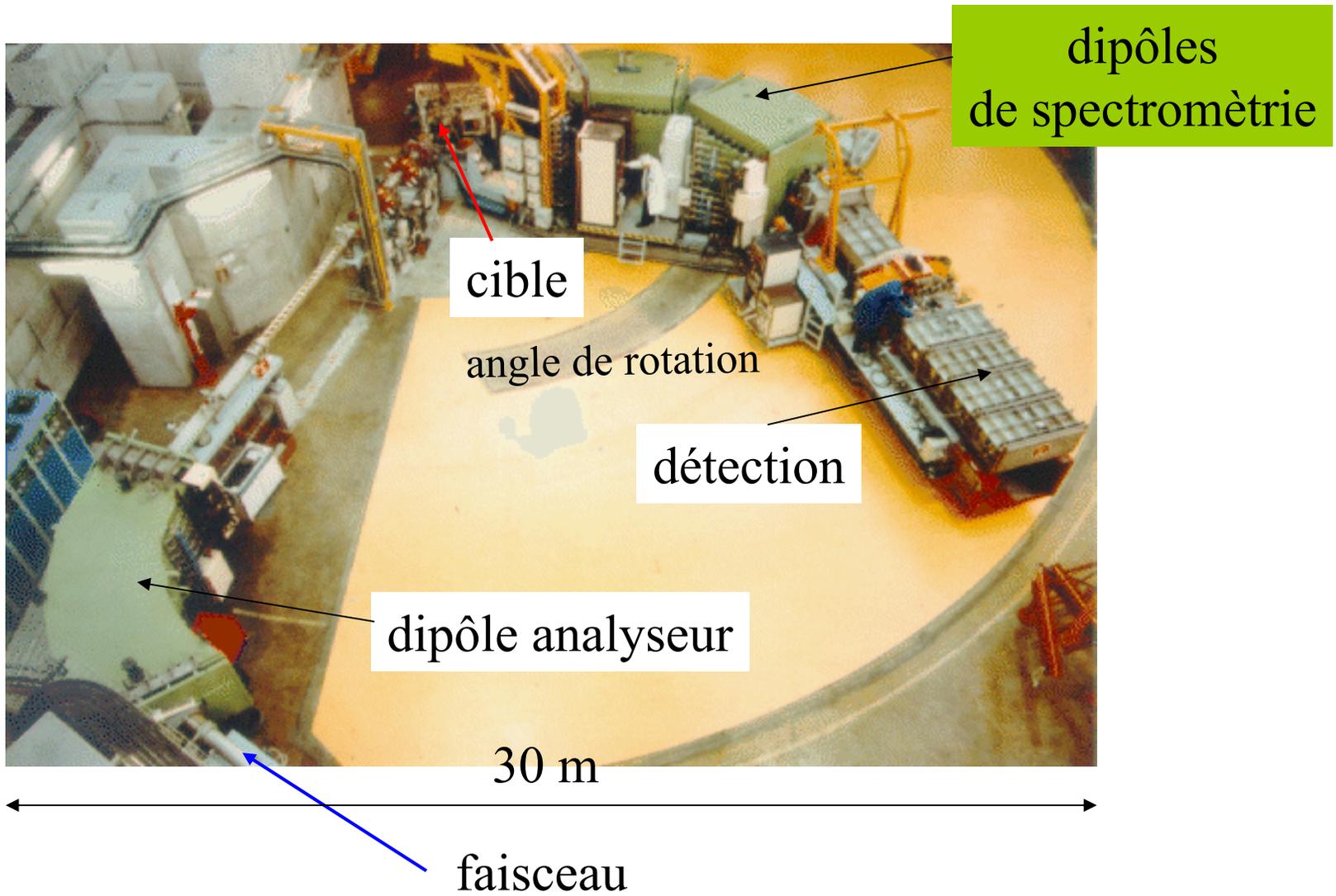
$$X_f = T_{11S} T_{11A} X_0 + T_{16S} \delta_r + (\mathbf{T_{11S} T_{16A} + T_{16S}}) \delta_0 \text{ soit}$$

$$\mathbf{X_f = T_{11S} T_{11A} X_0 + T_{16S} \delta_r}$$

*Elle est indépendante de l'énergie du faisceau (liée à  $\delta_0$ ) et ne dépend que de la **perte d'énergie** (liée à  $\delta_r$ ) dans la cible d'où le **nom de ce type de spectromètre**. La position sur la focale donne directement le  $Q$  de la réaction. L'intérêt d'un tel couplage 'analyseur-spectromètre' est que l'on peut faire des mesures à très haute résolution ( $10^{-4}$  voir exemple) sur les produits d'une réaction, avec un faisceau incident issu d'une machine ayant une résolution en énergie inférieure ( $10^{-3}$ )*

# Synoptique de l'ensemble achromatique SPEG





# Illustration de la haute résolution du spectromètre SPEG

$E_1=1503 \text{ MeV}$

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

**350 keV**

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (LZW)  
sont requis pour visionner cette image.

*thèse de  
P.Roussel Chomaz*

*reconstruction sur la focale de SPEG des trajectoires des particules,  
angle et position, à partir des mesures effectuées à l'aide de la détection.*

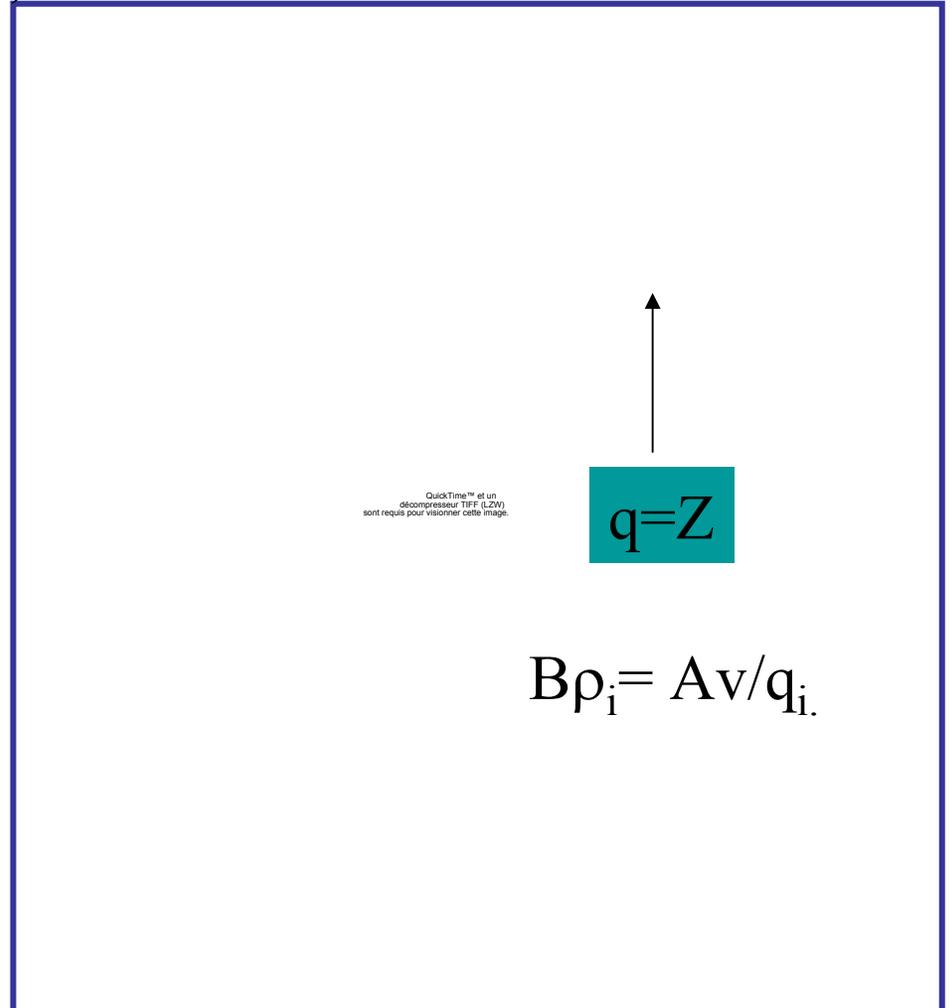
## Etats de charge:

Dans tout ce qui précède, l'intégralité de l'exposé, nous avons fait l'hypothèse simplificatrice que tous les noyaux participant aux réactions nucléaires sont complètement nus (fully stripped), c.à.d. que les noyaux incidents interagissant avec les cibles, avec les détecteurs... sont dépouillés de tous leurs électrons, autrement dit, qu'ils portent une charge positive  $q$  égale à  $Z$ , nombre de protons.

C'est vrai à haute énergie, mais plus du tout lorsque l'énergie des ions est de quelques MeV/u. A la sortie de la cible, par exemple, ces ions ont une probabilité importante de conserver quelques électrons. Ils sont alors statistiquement répartis suivant une distribution qui dépend de la nature de l'ion, de sa vitesse, et de la nature de la cible..(voir courbe suivante). On parle de distribution d'*états de charges*

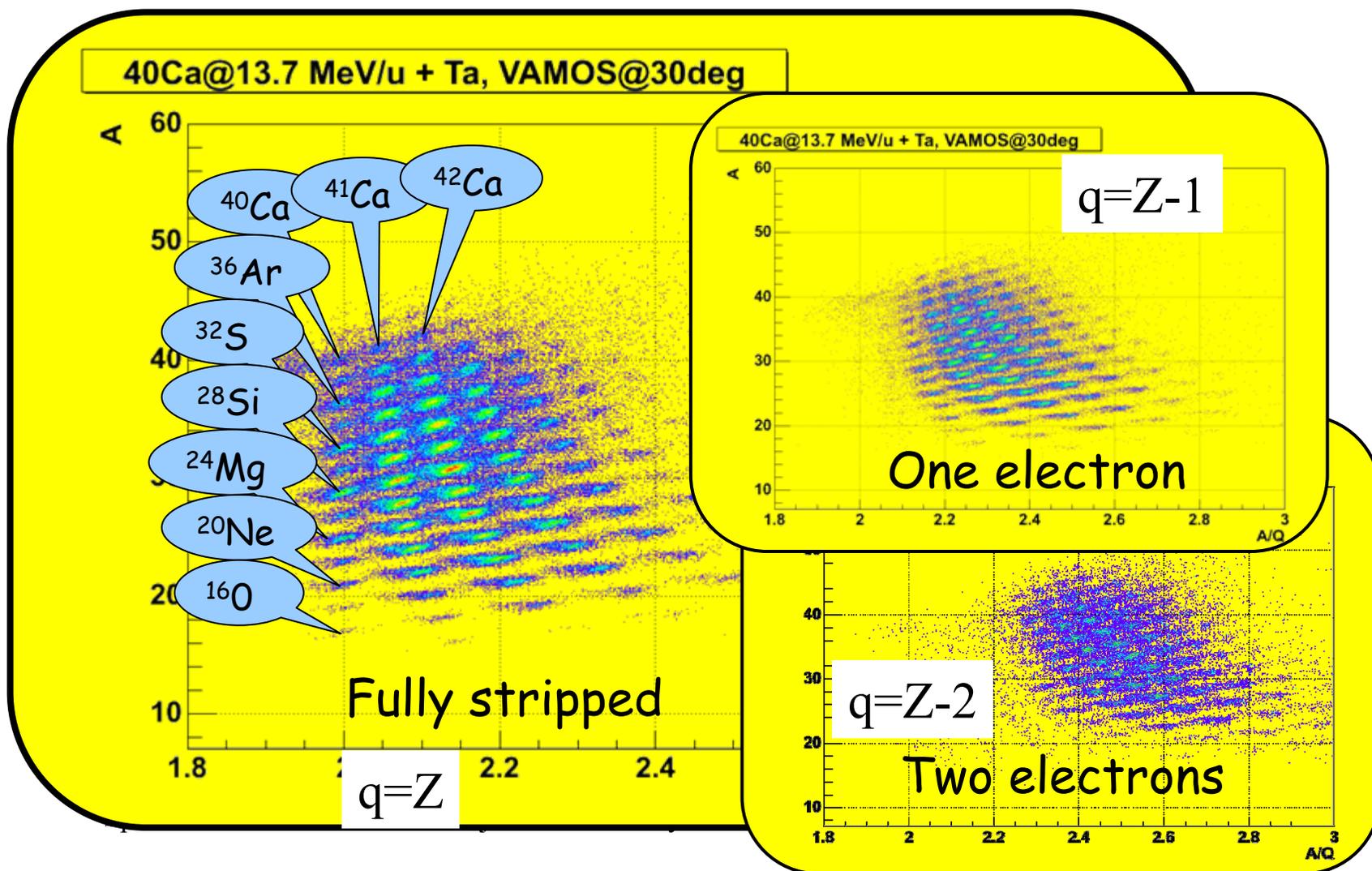
Conséquence: pour la **même réaction nucléaire**, les noyaux participants auront un  $B\rho$  qui dépendra de l'état de charge  $q_i$  sous lequel ils sortiront:  
 $B\rho_i = Av/q_i$  (voir exemple ci-contre)

Cela complique quelque peu l'identification des noyaux, car le spectromètre les déviéra d'un angle différent:  $\varphi_i = BL / (Av/q_i)$   
(voir diapo suivante, montrant les diagrammes d'identification obtenus dans une expérience utilisant le spectromètre VAMOS et sa détection associée)



Exemple de distribution des produits d'une réaction sur plusieurs états de charge.

# Mass versus Mass/Charge



Quelques sources:

W.Mittig: Physique nucléaire instrumentale, *des éléments pour un bon choix*

École internationale Joliot Curie, Maubuisson 12-17 09 1994

M.Rejmund: Conseil scientifique Ganil, intag\_june\_2005.

M.Duval, A.Savalle, A.Villari, B.Tamain : école 'de la source à la cible', 2-6 02 05 GANIL Caen

Ch.O.Bacri: 'de la physique au détecteur' 18-25 11 04 Cargèse

R.Anne et al: The achromatic spectrometer... N.I.M. A257(1987) 215-232; Lise3... N.I.M. B70(1992) 276-285; Lise3... Inter.Conf.on Exotic Nuclei, 1-5 10 91 Foros, Crimée. (Rapport Ganil P 91 25); Lise3 Séminaire 02 89 (Rapport Ganil R90 03).

R.Bimbot et al: Production and... Z. Phys. A322 (1985) 415

K.G. Steffen: 'High energy beam optics'

D.Bazin, O.Tarasov et al. Code LISE N.I.M.A482(2002)307-327

# Annexe 1

- Systeme de références et symboles utilisés

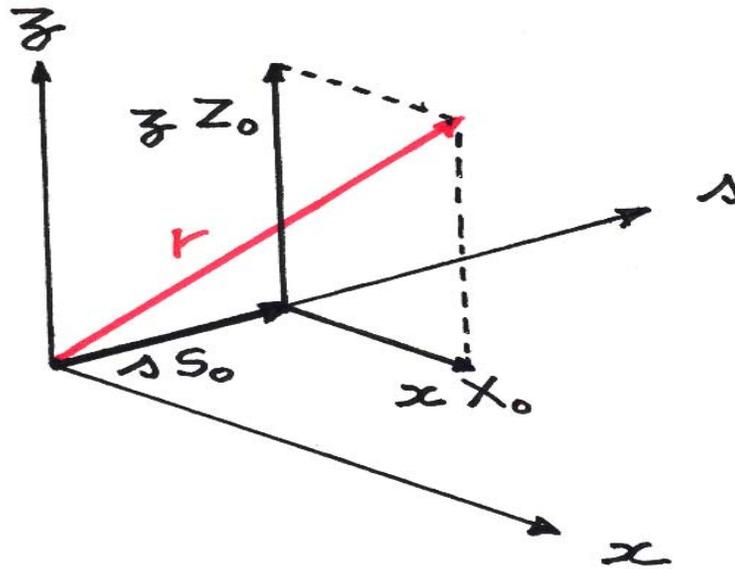


fig 1

- $m$  = masse de la particule en mouvement
- $v$  = vitesse " " "
- $p = m v$  = moment " "
- $B$  = champ magnétique traversé par la particule
- $E$  = champ électrique " "

d'après 'High energy beam optics' par K.G. Steffen

• équations du mouvement. (LORENTZ) A1

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \underline{\text{éq. 1}}$$

avec  $\mathbf{r} = z Z_0 + x X_0 + \lambda S_0$  voir fig 1

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}} = \dot{z} Z_0 + \dot{x} X_0 + \dot{\lambda} S_0$$

$$\mathbf{v}' = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \ddot{\mathbf{r}} = \ddot{z} Z_0 + \ddot{x} X_0 + \ddot{\lambda} S_0$$

insérés dans éq. 1  $\Rightarrow$

$$\ddot{z} = q/m (\dot{x} B_\lambda - \dot{\lambda} B_x)$$

$$\ddot{x} = q/m (\dot{\lambda} B_z - \dot{z} B_\lambda) \quad \underline{\text{éq. 2}}$$

$$\ddot{\lambda} = q/m (\dot{z} B_x - \dot{x} B_z)$$

• Pour obtenir la trajectoire, on introduit  $s$  plutôt que  $t$ , soit :

$$\dot{z} = \frac{dz}{ds} \dot{\lambda} = z' \dot{\lambda} \quad \text{et} \quad \ddot{z} = z'' \dot{\lambda}^2 + z' \ddot{\lambda}$$

avec  $s'^2 + z'^2 + x'^2 = v^2$

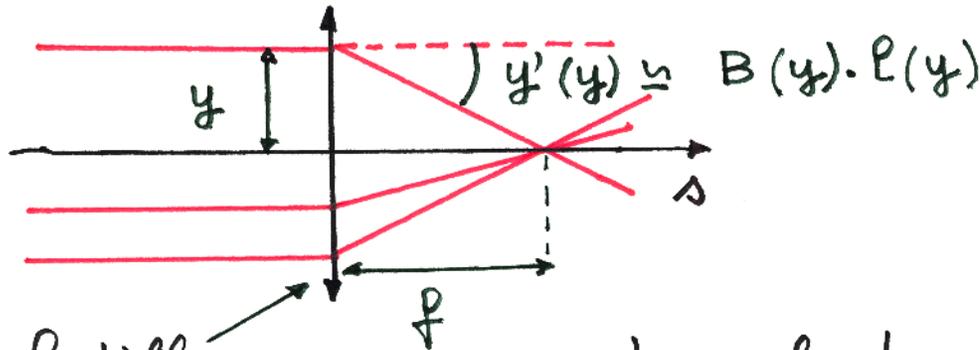
$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{v} (1 + z'^2 + x'^2)^{1/2}$$

on insère dans équ. 2 et on trouve : équ. 3

$$z'' = \rho/p (1 + z'^2 + x'^2)^{1/2} \cdot (x' B_s - (1 + z'^2) B_x + x' z' B_z)$$

$$x'' = -\rho/p (1 + z'^2 + x'^2)^{1/2} \cdot (z' B_s - (1 + x'^2) B_z + x' z' B_x)$$

- cas d'une lentille mince, par analogie avec l'optique (dans un plan  $(y, s) \Rightarrow \begin{cases} x, \Delta \\ z, \Delta \end{cases}$



lentille  
 $\begin{cases} B(y) \\ l(y) \end{cases}$

$$y' = \text{angle de déflexion} = -\frac{1}{f} \cdot y$$

• Si on intègre équ.3 par rapport à  $s$  en négligeant tous les termes en  $x'$  et  $z'$  et en supposant que  $y = cte$  dans toute la lentille, on trouve:  $y' = \pm \frac{qB \cdot l}{P}$  ou  $\frac{Bl}{y'} = \pm \frac{P}{q}$

• dans un quadrupole

$$B_x = g x$$

$$B_z = g z$$

$$\Rightarrow B^2 = (B_x^2 + B_z^2) = g^2 (x^2 + z^2)$$

$$B^2 = g r^2$$

$g = \text{gradient}$

on pose  $k = \frac{q}{P} \cdot g$

les équ.3 deviennent

$$z'' = -k (1 + z'^2 + x'^2)^{1/2} [(1 + z'^2)z - x'z'x] \quad \text{équ. 4}$$

$$x'' = k (1 + z'^2 + x'^2)^{1/2} [(1 + x'^2)x - x'z'z]$$

Pour la plupart des applications, on limite au 1<sup>er</sup> ordre le développement de  $z$  (ou de  $x$ ) à

$z = a_1 z_0 + a_2 z'_0$  et les équ.4 deviennent

$$z'' + k z = 0$$

$$x'' - k x = 0$$

donc de la forme  $y'' \pm ky = 0$   
avec  $y(0) = y_0$ ,  $y'(0) = y'_0$

• Si  $y''/y < 0$ , les solutions sont en cos et sin soit

$$y(\Delta) = y_0 \cos \Delta \sqrt{K} + y'_0 \frac{1}{\sqrt{K}} \sin \Delta \sqrt{K} \quad \text{équ. 5}$$

$$y'(\Delta) = -y_0 K \sin \Delta \sqrt{K} + y'_0 \cos \Delta \sqrt{K}$$

si le quadrupôle a une longueur  $l$ , on pose  $\varphi = l \sqrt{K}$  et on obtient la matrice suivante pour le quadrupôle :

$$\begin{bmatrix} y \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \frac{1}{\sqrt{K}} \sin \varphi \\ -\sqrt{K} \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} \quad \text{q. pôle foc}$$

- Rappelons que dans le cas de l'approximation par une lentille mince  $\frac{1}{f} = \sqrt{K} \sin \varphi = K \frac{l}{\varphi} \cdot \sin \varphi \approx Kl \quad (\varphi \ll 1) \Rightarrow$

$$\frac{1}{f} = Kl = \frac{qg}{P} \cdot l = \frac{q}{mv} \times \frac{B}{R} = \frac{B}{R} \times \frac{l}{B\rho} \quad \text{où}$$

$B$  est le champ magnétique sur le pôle  
 $R$  le rayon de gorge du quadrupôle  
 $B\rho$ , la rigidité magnétique de la particule.

• Si  $y''/y > 0$  les solutions sont en cosinus et sinus hyperboliques (q. pôle défoc)

- Relation avec la matrice  $T$

rappelons :

$$x = T_{11} x_0 + T_{12} \theta_0$$

$$x' = T_{11}' x_0 + T_{12}' \theta_0$$

$$x'' = T_{11}'' x_0 + T_{12}'' \theta_0 = -k x$$

soit  $x'' = T_{11}'' x_0 + T_{12}'' \theta_0 = -k T_{11} x_0 - k T_{12} \theta_0$

$$\Rightarrow T_{11}'' = -k T_{11}$$

$$T_{12}'' = -k T_{12}$$

dont les solutions sont des fonctions trigonométriques.

- les mêmes équations peuvent être développées pour tous les autres termes de la matrice  $T$ .