

# Etude de l'extraction multipassage par un cristal courbé des faisceaux de haute énergie

*Sophie Bardin*

*étudiante technique LPAN (Paris VI)*

Geneva, Switzerland

September 22, 1992

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Principes de base</b>	<b>3</b>
2.1	Le cristal . . . . .	3
2.1.1	Ses caractéristiques . . . . .	3
2.1.2	Processus de canalisation . . . . .	4
2.1.3	Angle critique . . . . .	5
2.1.4	Effets de décanalisation . . . . .	6
2.1.5	Diffusion multiple dans un cristal . . . . .	6
2.1.6	Notion de paramètre d'impact . . . . .	7
2.1.7	Notion de longueur efficace . . . . .	8
2.2	Extraction multipassages . . . . .	8
2.3	Description du programme de simulation . . . . .	9
2.3.1	Caractéristiques de la machine . . . . .	9
2.3.2	Génération de la distribution de particules . . . . .	10
2.3.3	Transport des particules . . . . .	10
2.3.4	Interaction des particules avec le cristal . . . . .	11
2.3.5	Distribution initiale des particules . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Résultats de la simulation</b>	<b>14</b>
3.1	Paramètres d'impact et distribution des particules . . . . .	14
3.1.1	Avant diffusion multiple . . . . .	14
3.1.2	Après diffusion multiple . . . . .	15
3.2	Efficacité de l'extraction en fonction de beta . . . . .	16
3.3	Pertes relatives dues à la valeur de la fonction bétatronique . . . . .	19
3.4	Optimisation de l'extraction multipassage . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Expérience</b>	<b>21</b>
4.1	Dispositif expérimental . . . . .	21
4.1.1	position du cristal dans la machine . . . . .	21
4.1.2	Déplacement du cristal au cours de l'expérience . . . . .	21
4.1.3	Détecteurs . . . . .	21
4.2	Développement machine . . . . .	22
4.2.1	Influence d'un Kick dans l'extraction . . . . .	22
4.2.2	Manipulation . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>24</b>

- Courbure (mrad): 8,5
- Longueur de radiation  $L_r$  (mm): 93,6

## 2.1.2 PROCESSUS DE CANALISATION

### Canalisation plane dans un cristal plan

Le cristal est un édifice ordonné d'atomes qui forment un réseau. De part cette propriété, si on considère deux atomes voisins du réseau, à plus forte raison deux plans d'atomes, on peut constater l'existence d'un puits de potentiel qui va faciliter la canalisation des particules incidentes au cristal <sup>1</sup> [2]. Les particules pénétrant dans le cristal parallèlement à la direction (110) seront piégées dans celui-ci et oscilleront dans des puits de potentiel dont les gradients de champ atteindront parfois plus de  $10^{11}$  V/cm. Il est important de remarquer toutefois que, malgré ces importants puits de potentiel, on observe que certaines particules sont décanalisées.

Dans le cas d'un cristal plan le principal phénomène de décanalisation est dû à la diffusion multiple sur les électrons des atomes du cristal. On introduit alors la notion de longueur de décanalisation  $L_d$ , qui varie proportionnellement avec l'impulsion de la particule. Elle représente la longueur au bout de laquelle la densité de particules canalisées est réduite d'un facteur  $1/e$ .

### Canalisation plane dans un cristal courbé

Dans un cristal courbé, les particules auront tendance à suivre sa courbure, mais il ne faut pas perdre de vue que cette courbure introduit des pertes additionnelles. Il apparaît alors un effet de décanalisation dû à la courbure du cristal. Du point de vue physique, ces pertes se traduisent par une distorsion du puits de potentiel du fait de la présence d'un terme centrifuge. Le processus de canalisation par un cristal courbé sera observable selon la valeur du rayon de courbure, il nous faudra pour cela ne jamais atteindre la valeur critique donnée par la relation [3]:

$$R_c = \frac{p v}{\pi Z_1 Z_2 e^2 n}$$

- p l'impulsion de la particule
- v sa vitesse(=c)

---

<sup>1</sup>remarque: la canalisation des particules dans le cristal se fait entre deux plans et non pas dans une maille

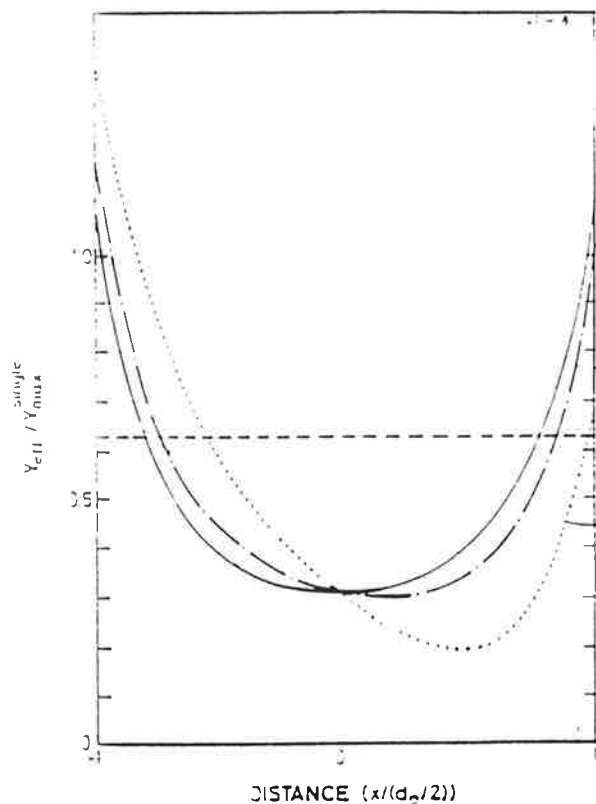


Figure 1: Courbe du puits de potentiel cristallin

- $v$  sa vitesse(=c)
- $C = \sqrt{3}$
- $a = a_0 Z_2^{-1/3}$

#### 2.1.4 EFFETS DE DÉCANALISATION

Toutes les particules passant dans le cristal ne subiront pas l'effet de canalisation. Une des raisons a déjà été évoquée dans le paragraphe précédent. Pour pouvoir décrire de façon complète ce processus de décanalisation il nous faudra aussi tenir compte des effets suivants:

- Diffusion multiple des particules dans le cristal
- Diffusion des particules sur le potentiel cristallin
- Décanalisation due a la courbure du cristal(voir ci-dessus)
- Perte d'énergie par ionisation dans le cristal

Mais pour l'instant, nous allons, dans les paragraphes suivants, nous concentrer sur un seul point: l'étude approfondie du processus de diffusion multiple.

#### 2.1.5 DIFFUSION MULTIPLE DANS UN CRISTAL

##### Principe

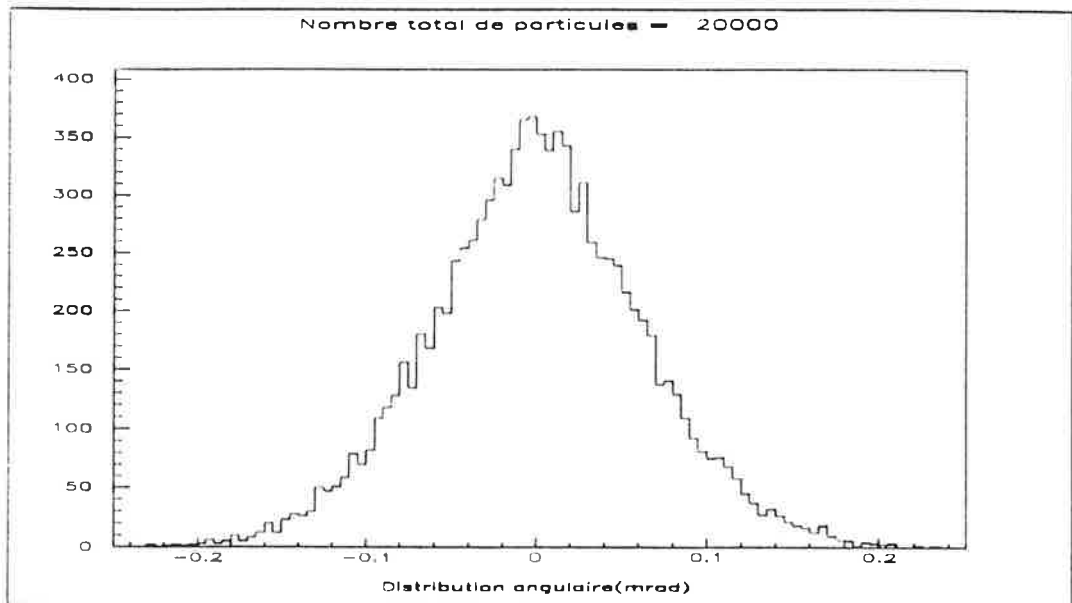


Figure 2: Distribution angulaire à la sortie du cristal  $\theta_{out}$

d'impact dont la valeur est inférieure au dixième de micromètre, les particules ne seront pas soumises au processus de canalisation. En effet, bien qu'on ait choisi le cristal de silicium pour ses facilités d'usinage, les faces présentent des irrégularités auxquelles il est difficile de remédier.

### 2.1.7 NOTION DE LONGUEUR EFFICACE

Du fait de la courbure du cristal, seules les particules qui ne seront pas canalisées et dont le paramètre d'impact, exprimé en micromètres, appartient à l'intervalle  $[ 0, 200 ]$ , ne traverseront pas le cristal dans toute sa longueur (Fig. 3 ci-dessous).

## 2.2 Extraction multipassages

L'extraction multipassage est basée sur le principe que toute particule non canalisée, entrant dans le cristal et y subissant la diffusion multiple, pour une certaine gamme de valeurs de ses coordonnées à la sortie du cristal, peut continuer à tourner dans la machine. D'après ce schéma, une même particule peut être amenée à traverser le cristal plusieurs fois, si elle n'est pas perdue dans la machine, et augmenter ainsi la probabilité d'être extraite du faisceau par canalisation, grâce à l'accroissement de son paramètre d'impact. Du fait de

où,  $\gamma$  est le facteur relativiste:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}}$$

(2) Ce qui correspond à une taille de faisceau:

$$\sigma = \sqrt{\epsilon \beta}$$

soit  $\sigma = 1,4 \text{ mm}$

### 2.3.2 GÉNÉRATION DE LA DISTRIBUTION DE PARTICULES

Afin de pouvoir se replacer dans les conditions expérimentales attendues, nous avons généré la distribution initiale de particules dont nous avons besoin pour simuler le phénomène de canalisation. Pour cela, nous avons considéré que:

- les mouvements des particules dans les plans horizontal et vertical ne sont pas couplés.
- il n'y a pas d'effets non linéaires (la matrice de transport le long de l'accélérateur est linéaire.)
- le paramètre d'impact maximum observable au premier tour est  $2 \mu\text{m}^3$ .

### 2.3.3 TRANSPORT DES PARTICULES

Dans l'espace des phases, où nous travaillons,  $x$  représente l'amplitude de l'oscillation et  $x'$  l'angle par rapport à la direction de propagation ( $dx/ds$ ). Du fait que les deux mouvements ne sont pas couplés (cf ci-dessus), nous avons pu limiter notre étude, dans un premier temps, au plan horizontal. En effet à cause de la position du cristal dans la machine, les effets de canalisation se font ressentir essentiellement dans ce plan. Le mouvement dans l'autre plan sera pris en considération dans une phase ultérieure.

- Calcul des coordonnées de la position des particules entre deux points quelconque de la machine:

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_e$$

où:

---

<sup>3</sup>remarque: le paramètre d'impact maximum est de  $2 \mu\text{m}$ , car il est limité en réalité par la valeur de l'émittance que nous avons fixée pour générer la distribution initiale de particules.

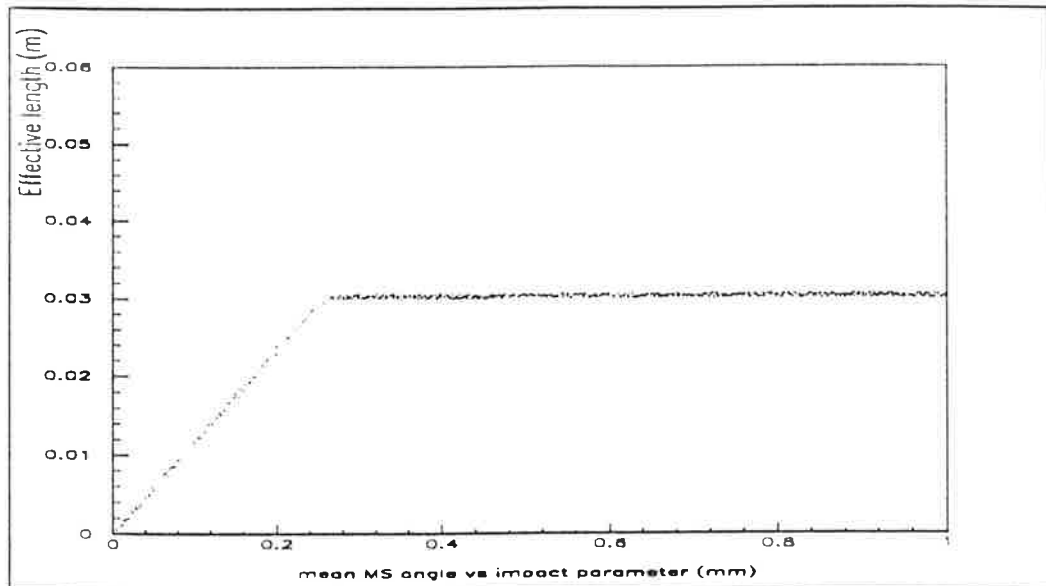


Figure 4: Influence de la longueur effective sur le paramètre d'impact

supérieur à 230  $\mu\text{m}$ , elle traverse celui-ci sur toute sa longueur.

- $\theta_{out}$  est relié à la longueur efficace par la relation de proportionnalité:

$$\theta_{out} \propto \sqrt{\frac{x_{eff}}{L}}$$

Cela a pour conséquence que pour de très petites longueurs efficaces, l'angle introduit par la diffusion multiple est très petit lui aussi. La probabilité de recapture de la particule dans l'orbite de la machine augmente, ainsi que l'efficacité d'extraction.

**Influence de la diffusion multiple dans la position des particules à la sortie du cristal:**

la matrice de transport, donnant la déviation subie par les particules à la traversée du cristal, est donnée par la relation ci-après:

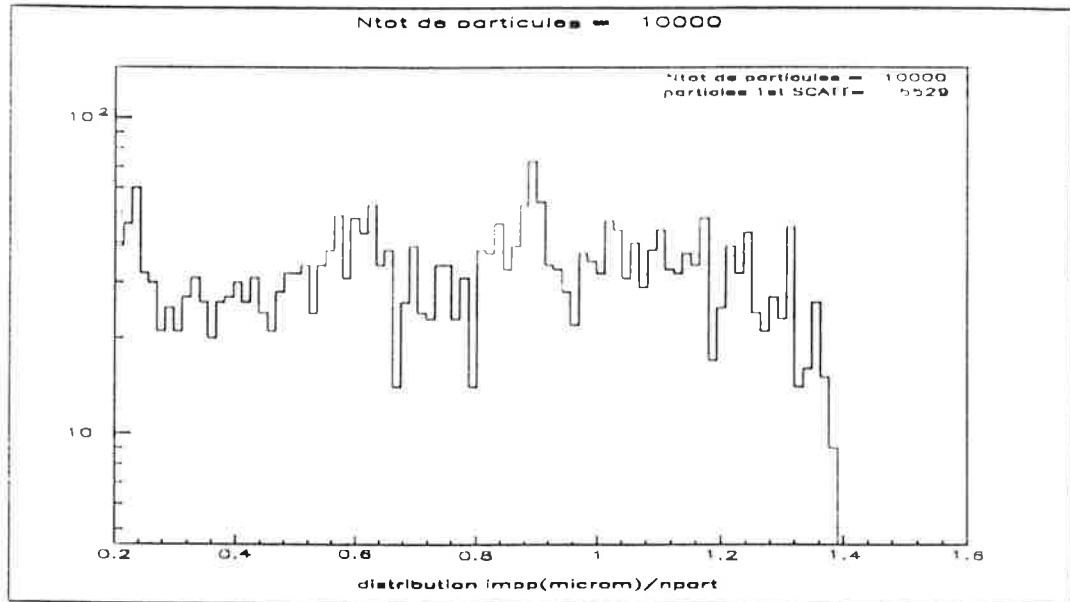


Figure 6: Distribution du paramètre d'impact

### 3 Résultats de la simulation

#### 3.1 Paramètres d'impact et distribution des particules

##### 3.1.1 AVANT DIFFUSION MULTIPLE

La figure ci-après (Fig. 6), nous permet de voir la distribution du paramètre d'impact obtenu à partir de la distribution initiale des particules. Cette distribution est obtenue quand les particules percutent le cristal pour la première fois.

On pourra observer que la graduation de l'axe horizontal ne commence qu'à  $0.2 \mu\text{m}$ , du fait des pertes introduites par les faces du cristal.

La distribution des particules avant le premier passage (Fig. 7), nous est montrée par la figure qui suit.

Il est important de souligner que dans la réalité la région se trouvant entre les deux ellipses extérieure et intérieure est remplie de façon uniforme par les particules. On affirme que les résultats n'en sont pratiquement pas modifiés, car ce qui change est le nombre initial de particule.



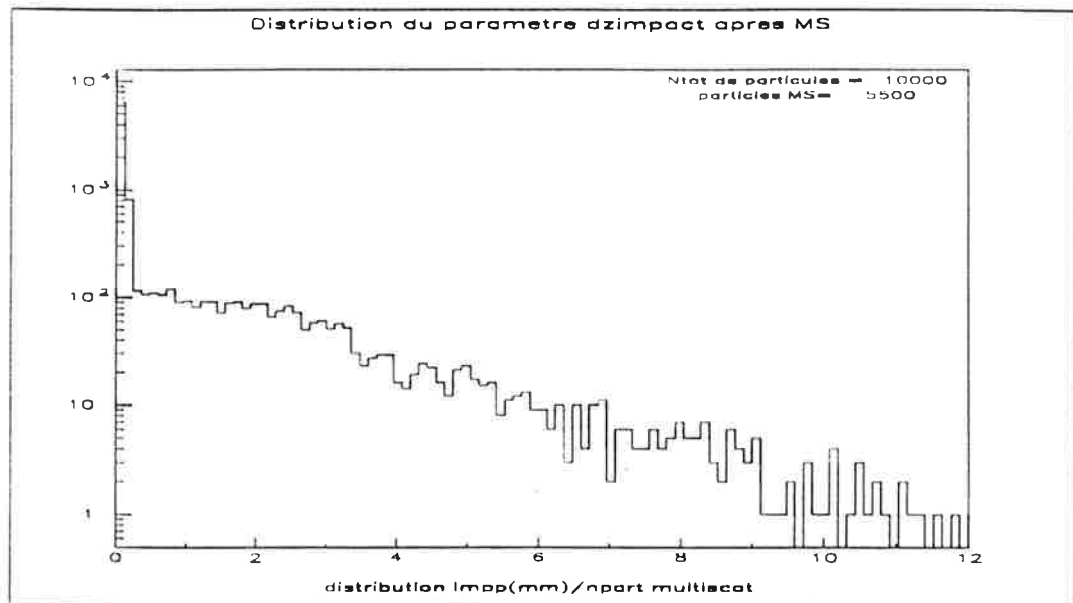


Figure 8: Distribution du paramètre d'impact après le second passage des particules dans le cristal

trop grande.

Les particules, se trouvant dans la section verticale dans laquelle le paramètre d'impact varie entre 0 et 1,5 mm, ont encore la possibilité de se trouver réabsorbées par la machine, donc d'être canalisées aux tours suivants.

Un des paramètres qui influence la position des particules par rapport aux zones décrites précédemment est la fonction bêatronique au point d'emplacement du cristal. L'efficacité d'extraction dépendra donc de la valeur de la fonction  $\beta$ , comme nous le montrerons dans un paragraphe ultérieur.

La distribution des particules dans la zone d'intérêt (Fig. 10), est un zoom de la zone délimitée par les quatres droites sur la figure 9. On peut observer sur cet agrandissement, la distribution des particules une fois que le kick introduit par le processus de diffusion multiple est pris en considération.

### 3.2 Efficacité de l'extraction en fonction de beta

A partir des distributions dans l'espace des phases montrées au cours des paragraphes précédents, il apparaît clairement que certaines particules sont hors de l'acceptance caractéristique au cristal à cette énergie.

Cette exclusion est due, d'une part au fait que le paramètre d'impact est

supérieur à l'épaisseur du cristal (perte due à l'amplitude:  $l_{amp}$ ) et d'autre part au fait que l'angle d'incidence des particules sur le cristal est supérieur à l'angle critique (perte due à l'angle:  $l_{ang}$ ). Par anticipation, on peut écrire que cette perte relative est fonction des paramètres de la machine et donc qu'une optimisation des résultats est possible. Pour étudier la contribution relative de ces deux facteurs de perte ( $l_{amp}$  et  $l_{ang}$ ), on a considéré que l'efficacité d'extraction dépend de la fonction bétatronique au cristal. De façon à la différencier des autres effets contribuant à la non-canalisation et aux pertes, nous avons limité notre simulation aux particules qui heurtaient le cristal pour la seconde fois après un nombre fini de tours.

Ci-dessous (Fig. 11), l'efficacité de canalisation pour ces particules est représentée comme une fonction de  $\beta_x$  au point d'interaction.

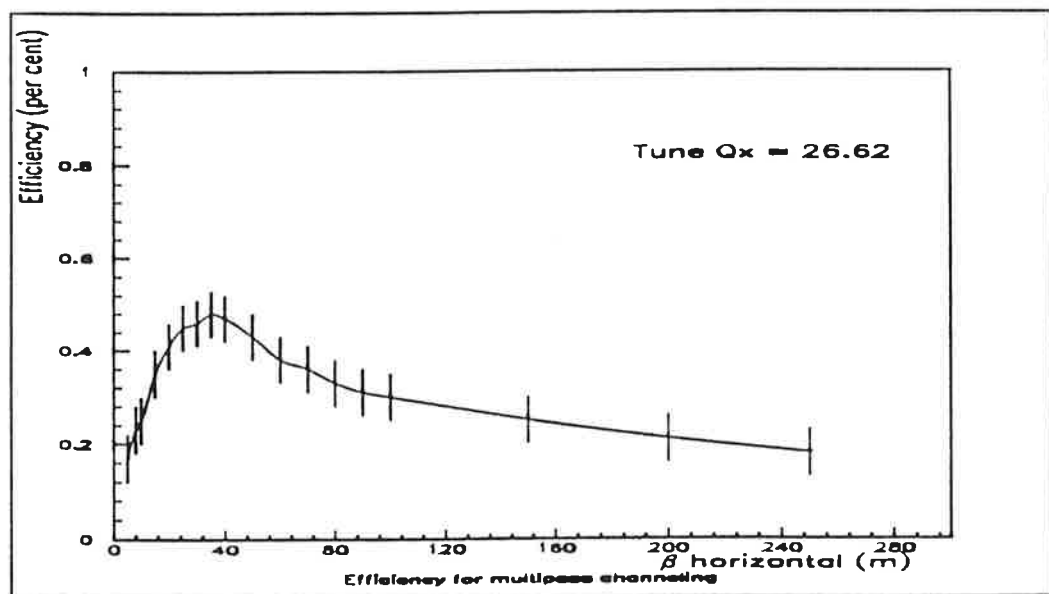


Figure 11: Efficacité d'extraction en fonction de beta

Le nombre d'onde horizontal est fixé à la valeur nominale du SPS de 26,62, et la valeur de la fonction bétatronique peut varier de 5 à 300 m. Il est clair que l'efficacité maximale d'extraction est remarquée autour de 40 m, parce que l'efficacité est fort réduite pour les petites et très grandes valeurs de  $\beta$ . Afin d'avoir un objet de comparaison, nous avons, de nouveau représenté graphiquement (Fig. 12) l'efficacité de la canalisation, mais pour un nombre d'onde différent ( $Q_x = 26,236$ ). Nous avons délibérément opté pour cette valeur du fait de son aspect irrationnel, mais aussi pour illustrer l'influence du nombre d'onde sur la distribution. Nous pouvons voir que la valeur optimale

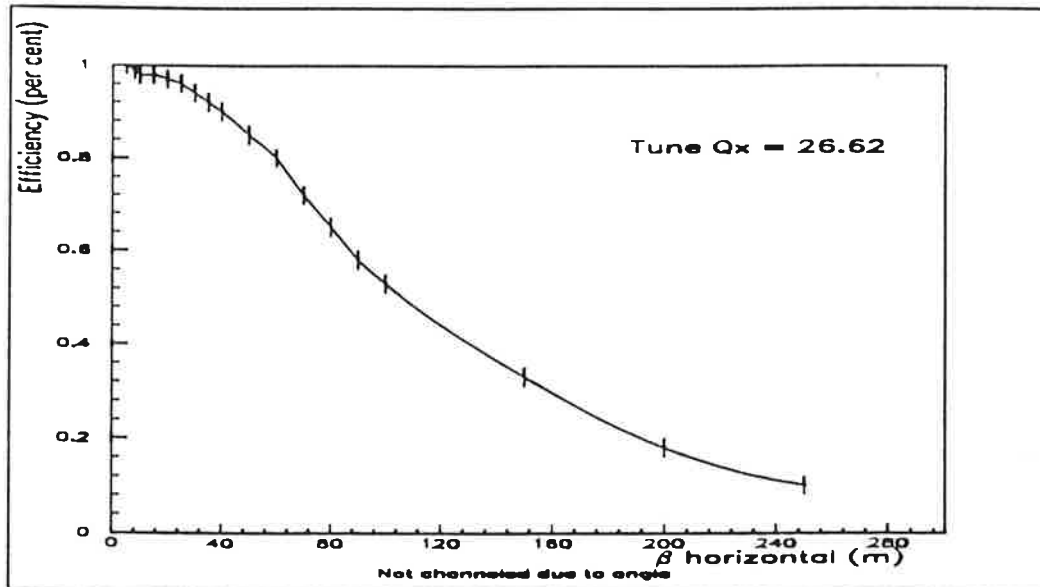


Figure 13: Perte relative due à l'angle en fonction de  $\beta_x$

Il apparaît clairement que la plupart des particules sont perdues pour les faibles valeurs de la fonction bêatronique à cause de leur angle d'incidence sur le cristal. Pour des grandes valeurs de  $\beta$ , certaines particules seront perdues du fait de leur amplitude, même si leur angle d'incidence est inférieur à l'angle critique ( $x' < \psi_c$ ). L'amplitude varie comme l'indique la relation qui suit:

$$x \propto \sqrt{\epsilon \beta}$$

### 3.4 Optimisation de l'extraction multipassage

On pourrait trouver la liste des valeurs des paramètres de la machine, qui optimisent la probabilité d'extraction basée sur le processus de passage multiple. Toutefois, il n'est pas évident que cette mise en œuvre ne soit pas en contradiction avec une bonne efficacité d'extraction sur le premier passage. En fait, une trop petite valeur de la fonction bêatronique tendrait à introduire un angle trop important après le premier passage dans le cristal et entraînerait une non-canalisation de la particule. Il semblerait que l'extraction multipassage ne serait optimisée si l'extraction après le premier tour est compromise.

Pour accroître substantiellement l'efficacité de l'extraction multipassage, il serait question d'agrandir l'épaisseur du cristal, actuellement de 1,5 mm, à de plus grandes valeurs. Toutefois, cela ne ferait qu'accroître l'acceptance en

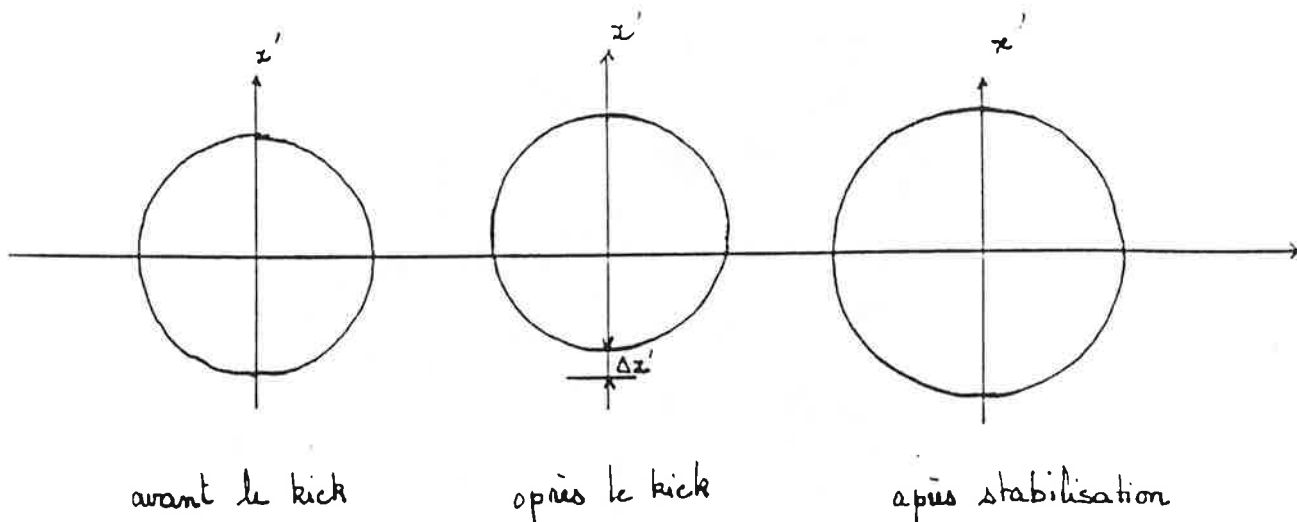


Figure 14: Influence du kick sur la position du faisceau

- un hodoscope (32 mm\*32 mm), ayant une résolution de 1 mm par 1 mm, relié à des compteurs, qui permet d'avoir des informations quantitatives sur le faisceau (intensité, dimensions ...)
- deux chambres à microrubans, qui permettent d'avoir les mêmes informations qu'avec l'hodoscope, mais qui présentent l'avantage d'avoir une meilleure résolution.

Seul le dernier détecteur n'a pas été utilisé au cours de cette expérience. Son installation ne se fera que lorsqu'on saura mieux analyser le faisceau dévié.

## 4.2 Développement machine

### 4.2.1 INFLUENCE D'UN KICK DANS L'EXTRACTION

L'introduction d'un kick sur le faisceau, se ressent dans le comportement dynamique de celui-ci (voir Fig. 14 ci-dessous):

Le faisceau de particule circulant dans la machine, est stable et est caractérisé par une émittance normalisée de  $10 \pi$  (mm mrad), comme nous l'avons vu précédemment. Introduire directement le cristal dans le faisceau, pour observer le processus de canalisation risquerait de le casser du fait de l'intensité du faisceau circulant ( $10^{11}$  part).

Afin de pouvoir procéder à l'extraction par cristal, nous introduisons, dans la machine, une perturbation par le biais d'un kick. Ce kick a pour propriété d'induire une modification angulaire instantanée du faisceau, et

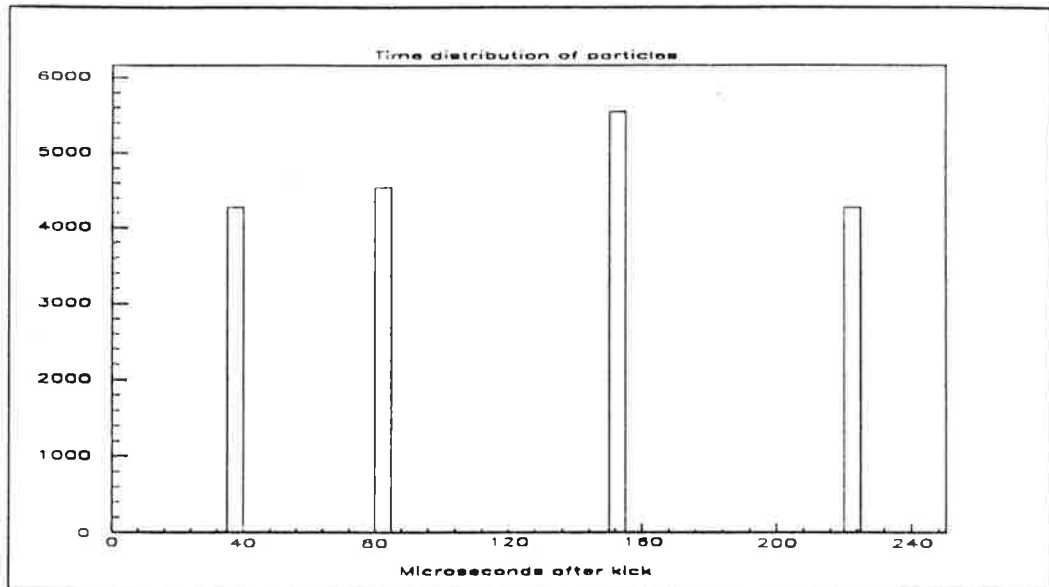


Figure 16: Influence du kick dans l'extraction par cristal.Simulation

le SPS était de l'ordre de  $1.5 \cdot 10^{12}$  protons. Il nous a fallu aussi vérifier la chromaticité ainsi que le couplage de la machine, de façon à ce que celle-ci soit le plus linéaire possible.

Cela résolu, le reste de la manipulation a plutôt été axé autour de l'observation du comportement des commandes ainsi que des signaux enregistrés au niveau des différents détecteurs. Une fois ces tests réalisés, nous avons même eu le temps de tester l'action d'un kick sur le faisceau.

## 5 Conclusion

Dans l'optique d'une étude pour le LHC et d'expériences en cours au SPS, un programme de simulation a été développé, afin d'étudier le comportement dynamique des particules durant l'extraction et notamment la contribution des effets dus au multipassage des particules dans le cristal. La première expérience au SPS a été faite, et on pourrait faire un récapitulatif des résultats de la façon suivante:

- Le comportement dynamique des particules est fortement affecté par la présence du cristal dans l'enceinte de l'accélérateur.
- Une simulation a montré que la diffusion multiple ainsi que le multipassage à travers le cristal modifient fortement les conditions

## References

- [1] *Design Study of the Large Hadron Collider (LHC).*  
CERN 91-03 (1991)
- [2] *A Proposal to Test Beam Extraction by Crystal Channeling at the SPS:  
a First Step towards a LHC Extracted Beam.*  
CERN/drdc 91-25 DRDC/P29 (1991)
- [3] *A.M. Taratin et al.;Theorie of Planar Channeling of Relativistic Protons  
in Bent Crystals.*  
Phys. Stat. Sol B 100 (1980) 273
- [4] J.Lindhard,Kgl. Danske Vid. Selsk. Mat. fys. Medd. 34n°14(1964)
- [5] *Review of Particle Properties,Particle Data Group*  
Physics letters B vol. 204,1-486 (1988)
- [6] *Deflection of 450 GeV Protons by Planar Channeling in a Bent Silicon  
Crystal* CERN 92-14 (1992)
- [7] *Crystal Extraction Studying Team,to be published*  
CERN ?? (1992)