

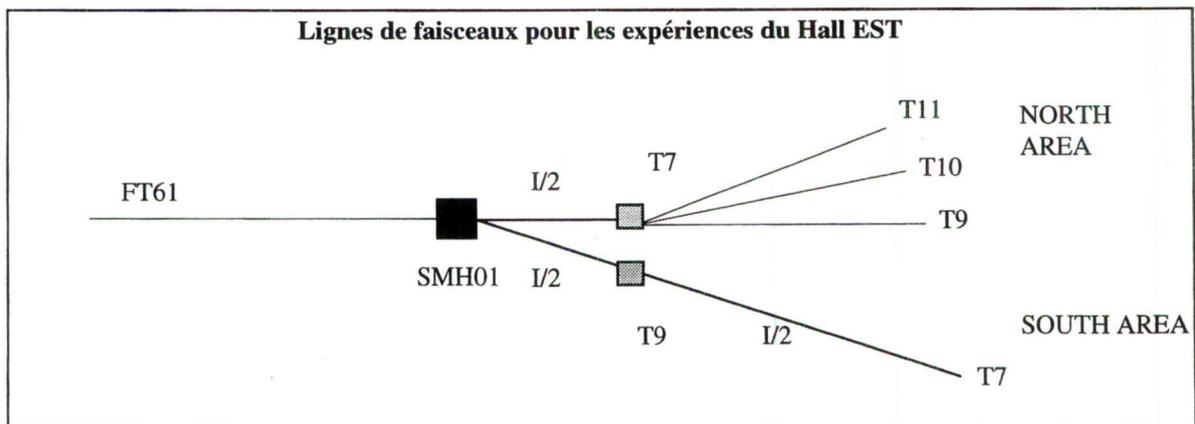
PS/OP/Note 97-01
24 Janvier 1997

L'éjection lente en section droite 61 de la machine PS
Marine Gourber-Pace, Charles Steinbach

INTRODUCTION

Objectif de l'éjection lente en SD 61 de la machine PS

L'éjection lente en section droite 61 de l'anneau PS a pour but de produire un déversement (plus communément appelé "spill") long et continu de particules (faisceau primaire) aux expériences du Hall Est. Les physiciens travaillent sur les faisceaux secondaires issus de la collision de ce faisceau primaire contre une cible fixe externe. En effet, comme illustré sur la figure ci-dessous, un aimant SMH01 (appelé "splitter") sépare le faisceau primaire en 2 faisceaux qui vont heurter chacun une cible spécifique et produire un ou plusieurs faisceaux secondaires de particules. En opération standard, l'intensité du faisceau primaire est divisée en deux parties égales par SMH01.



Une alternative, implantée autrefois au PS, utilisait des cibles **internes**. Cette alternative présentait des défauts: irradiation de la machine, physique limitée aux particules secondaires, perturbation par le champ de fuite à la sortie du faisceau; elle a donc été abandonnée au profit de l'éjection lente.

L'éjection lente, telle qu'elle est décrite ici, a été entièrement rénovée en 1992, afin d'améliorer ses performances: meilleur vide, protection contre les radiations synchrotroniques pendant les cycles de leptons en plaçant les septa vers l'intérieur de la machine, réduction des pertes sur les septa magnétiques, simplification de la maintenance.

Principe de l'éjection lente SE61

C'est une éjection lente de type "résonnante".

On ne peut pas obtenir des spills de la durée requise (400 à 500 ms) en poussant simplement le faisceau dans le septum électrostatique (comme pour l'éjection sur cinq tours du faisceau SFT/CT). En effet, un spill de 400 ms implique une éjection sur environ 200 000 tours machine. Pour un faisceau de 20 mm de large, le saut des particules au septum électrostatique (SES) à chaque tour devrait être de 0.1 μm , beaucoup plus petit que l'épaisseur réalisable d'un SES (de l'ordre de 0.1 mm).

Il faut, par conséquent, augmenter l'amplitude des oscillations bétatroniques pour pouvoir sauter le SES. Pour cela, on utilise une résonnance.

La résonnance du 3^{ème} ordre ($Q_h = 19/3$) est choisie car c'est la plus proche de la valeur naturelle de la machine ($Q_h = 6.25$) et qu'elle est bien adaptée à son acceptance.

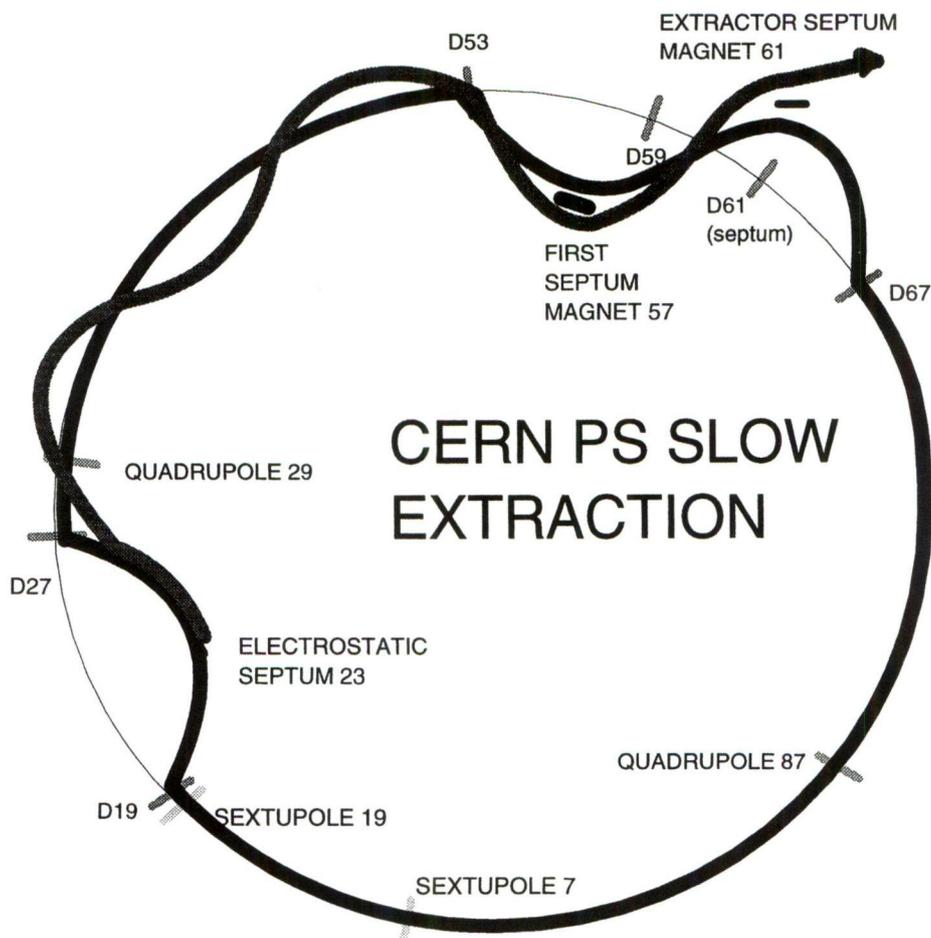
Cette résonnance est excitée par une perturbation sextupolaire introduite par 2 sextupôles. Dans l'espace de phase horizontal (x, x'), cela définit une région stable, dans laquelle les trajectoires sont fermées, délimitée par 3 séparatrices, le long desquelles s'étirent les trajectoires des particules en résonnance. Ainsi,

l'amplitude des oscillations bêta-troniques pour les particules en résonance, augmente. Au bout d'un certain nombre de révolutions, cette amplitude est suffisante pour que les particules sautent le septum électrostatique.

Le septum électrostatique SES23 permet de séparer le faisceau initial en deux (faisceau *circulant* et faisceau *extrait* constitué des particules ayant sauté le septum). La déflexion subie par le faisceau *extrait* est convertie en une séparation physique par le septum magnétique SMH61: le faisceau *extrait* est dirigé dans le canal d'extraction qui débouche sur la ligne de transfert FT61 alors que le faisceau *circulant* est remis sur l'orbite fermée nominale.

On utilise aussi un septum magnétique en 57 (SMH57) pour produire une déflexion supplémentaire du faisceau *extrait* et pour le placer dans le septum d'extraction SMH61. En effet, le kick produit par le SES23 n'est pas suffisant pour que le faisceau puisse sauter le SMH61, celui-ci étant trop épais (23 mm).

Figure 1. Trajectoires des faisceaux extrait et circulant

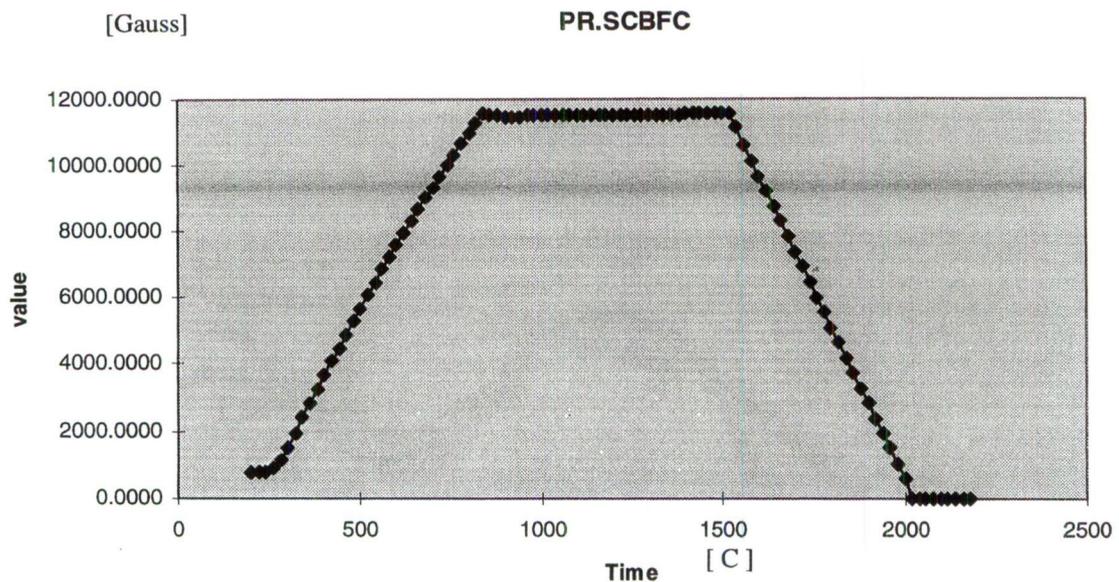


LE FAISCEAU PHYSE

Il s'agit d'un faisceau de protons pré-accélérés dans le LINAC II et le Booster jusqu'à 1.7 GeV/c, accélérés jusqu'à 24 GeV/c dans le PS et éjectés dans la ligne de transfert FT61.

L'intensité maximale de ce faisceau est de $20 \cdot 10^{10}$ ppp par cible, soit $40 \cdot 10^{10}$ ppp pour un partage égal entre les 2 cibles (T7 et T9). Cette limitation est due au blindage du Hall Est.

CYCLE MAGNETIQUE



La valeur du champ sur le palier d'injection est de 804 Gauss. Le palier dure de C205 à C234. L'énergie du faisceau est de 1 GeV ($p = 1.7$ GeV/c). Le faisceau est injecté à C215.

Le champ monte ensuite jusqu'à C845 où il atteint sa valeur maximale: 11590 G. Il redescend ensuite légèrement jusqu'à C890 afin de permettre l'enclenchement du By-pass de l'alimentation principale (qui abaisse le taux d'ondulation résiduelle du champ dans les aimants principaux, ce qui permet de réduire le "ripple" sur le "spill").

A partir de C890, le palier d'éjection commence. Il se termine en C1510. La pente du champ magnétique est légèrement positive pendant toute la durée du palier, afin d'introduire le faisceau dans la résonance.

La forme particulière du cycle magnétique juste avant et pendant le processus d'éjection est détaillée dans le paragraphe suivant intitulé "Forme du champ magnétique à l'éjection".

CYCLE PLS

La programmation de la “user matrix” est la suivante:

User: PHYSE

Cycle type: B

Duration: 2.4 s

Destination: EJ61

Particle type: PROTON

Harmonic number: H20

Cycle correspondant pour la machine Booster:

User: PHY

Duration: 1.2 s

Linac destination: PSB

PSB destination: PS

Linac3 destination: LOCAL

Particle type: PROTON

INJECTION

Le processus d’injection de ce faisceau est similaire à celui du faisceau SFT (faisceau de protons éjectés à 14 GeV/c vers le SPS, utilisé pour la physique sur cibles fixes en zones Nord et Ouest).

Pour une description détaillée du processus d’injection, se reporter à la note [5].

Le faisceau est injecté à C215 sur le palier 1.7 GeV/c du champ magnétique.

Les 5 paquets d’un anneau du Booster sont injectés dans le septum d’injection SMH42 de la machine PS. On se limite à un seul anneau car il est difficile, en utilisant les 4 anneaux, d’obtenir une intensité réduite stable à l’éjection du Booster. Pendant tout le processus d’injection, l’orbite fermée du PS est déformée et rapprochée du septum grâce à 4 dipôles: BSM40, 42, 43, 44. Le faisceau injecté est ensuite placé sur l’orbite nominale du PS par le kicker KFA45.

Dans le plan longitudinal, le faisceau est capturé par les 10 cavités 9.5 MHz. On applique un blow-up sur le palier d’injection qui augmente l’émittance longitudinale afin de stabiliser le faisceau.

ACCELERATION

A basse énergie, le réglage du faisceau PHYSE est similaire à celui du faisceau SFT (Se reporter à la note [5]).

Dans le plan **transversal**, les oscillations sont corrigées par les équipements suivants:

- **dipôles horizontaux et verticaux**, actifs de l’injection jusqu’à C480.
- **quadripôles normaux et “skew”, focalisants et défocalisants**, actifs de l’injection jusqu’à C480.
- **Pole Face Windings (PFW) focalisants, défocalisants et boucle en huit**, actifs à partir de C310.
- **PAS de sextupôles ni d’octupôles.**

Dans le plan **longitudinal**:

- un seul palier à 1.7 GeV/c avec application d’un blow-up par les cavités 200 MHz. Pas de palier 3.5 GeV/c, contrairement au cycle SFT.

A haute énergie (à partir de la transition), les corrections transversales sont réalisées par les PFWs. Les circuits focalisants et défocalisants des PFWs demeurent actifs pendant le processus d’éjection pour permettre de régler le point de fonctionnement et la chromaticité de la machine dite “nue”, alors que la boucle en huit est coupée juste avant le début de l’éjection.

EJECTION

Le processus d'éjection du faisceau est la partie la plus délicate de l'opération PHYSE, d'un double point de vue, théorique et opérationnel.

C'est une éjection de type "résonnante": comme cela a été déjà mentionné, l'extraction résonnante permet de délivrer des déversements de particules longs et continus, requis par les expériences de physique.

I. Rappel théorique sur l'éjection lente

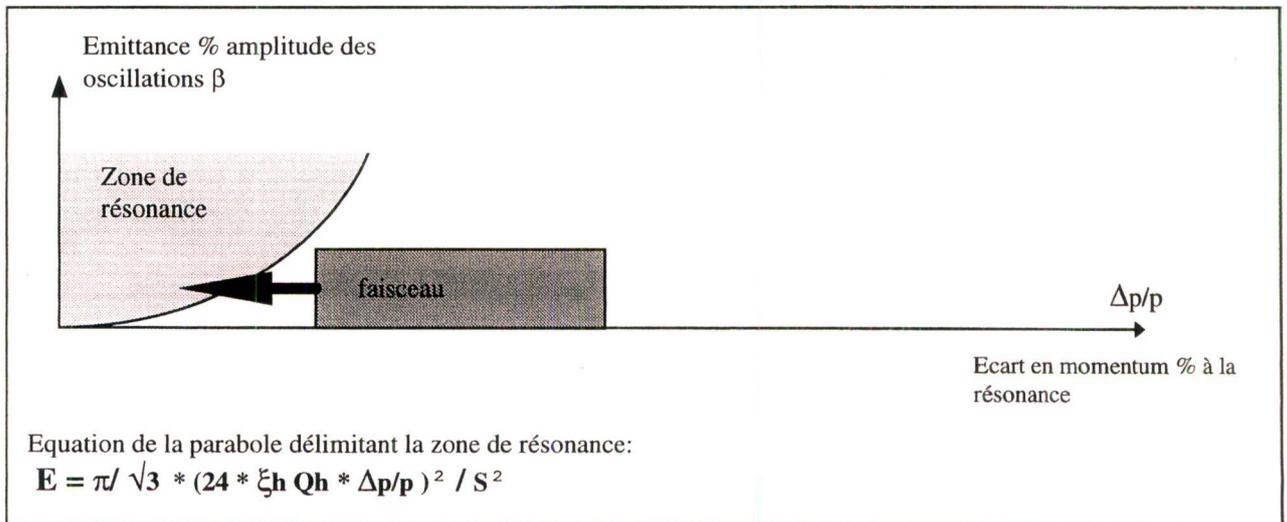
Les principes théoriques qui régissent le processus de l'éjection lente sont rappelés dans l'Annexe à ce document.

II. Principe de l'éjection lente utilisée au PS

Introduction du faisceau dans la résonance

Le point de fonctionnement horizontal naturel de la machine ($Q_h=6.2$) est amené à une valeur proche de la résonance du troisième ordre ($6.333=19/3$) grâce à deux quadripôles QH29 et QH87 ($Q_h = 19/3 - \epsilon$; $\epsilon > 0$).

Le faisceau est "poussé" dans la résonance progressivement en augmentant légèrement le champ magnétique sur le palier d'éjection pendant tout le processus d'extraction.



L'énergie moyenne du faisceau décroît pendant le processus, car la résonance est approchée par les valeurs de Q_h inférieures à $19/3$.

Comme expliqué dans l'Annexe, les particules possédant une énergie donnée définissent un triangle de stabilité dont l'aire est proportionnelle à $\Delta p/p$; plus l'énergie de la particule sera faible, plus son triangle de stabilité sera petit et proche du centre de la machine.

L'aire des triangles de stabilité qui contiennent toutes les particules qui ne sont pas en résonance diminue au fur et à mesure du processus; de plus en plus de particules sortent de la zone de stabilité et entrent en résonance.

Partage du faisceau par le septum électrostatique SES23

La résonance est excitée par deux sextupôles X19 et X7 afin d'augmenter, tous les trois tours, l'amplitude des oscillations bêtatroniques du faisceau.

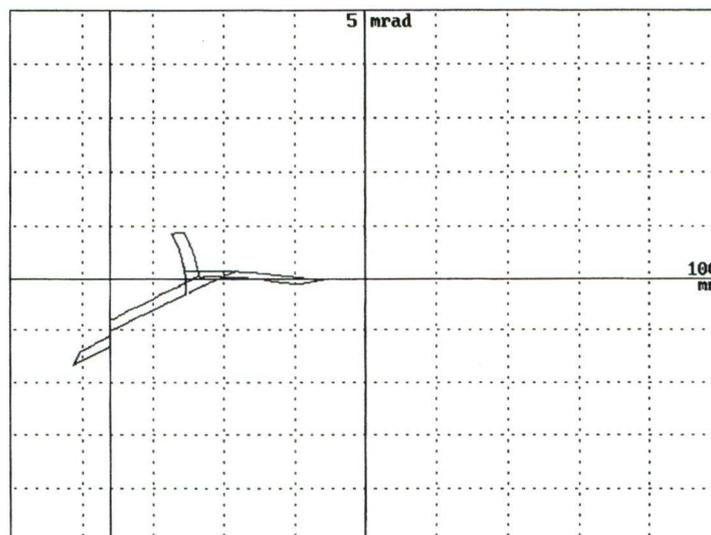
Au bout d'un certain nombre de révolutions, une fraction du faisceau effectue des oscillations dont l'amplitude est suffisante pour sauter le septum électrostatique. Le septum défléchit ce faisceau appelé *extrait* et le place sur une orbite différente de celle du faisceau *circulant*.

Optique du faisceau au septum SES23

Les conditions optimales **théoriques** d'optique à l'emplacement du SES23 (représentées par la relation (A3) dans l'Annexe) ne sont pas vérifiées pratiquement pour l'opération PHYSE dans le PS. En effet, leur vérification imposerait une dispersion négative en 23, ce qui empêcherait l'optimisation de la séparation des deux faisceaux (*extrait* et *circulant*) au septum SMH57 (cf relation (A4) dans l'Annexe).

En revanche, **la non-vérification des conditions théoriques au septum SES23 induit inévitablement des pertes locales plus importantes.**

Figure 2. Représentation au septum électrostatique SES23 dans l'espace de phase



Séparation des faisceaux au premier septum magnétique SMH57

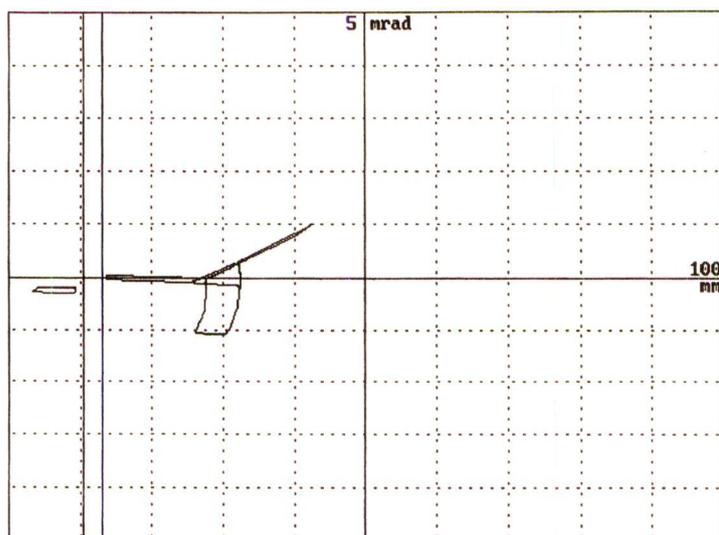
Le septum SMH57 est placé dans une section où l'espace entre les faisceaux *circulant* et *extrait* est suffisamment grand (8 mm) pour accepter l'épaisseur du septum (4mm). Ce deuxième septum n'est pas le septum d'extraction proprement dit; il produit une déflexion supplémentaire du faisceau *extrait* afin de le placer dans le septum d'extraction en SD61, qui l'éjectera dans le canal de la ligne de transfert 61.

Optique du faisceau au septum SMH57

Pour optimiser la séparation au septum SMH57, la chromaticité et la dispersion doivent être ajustées afin que la position de la séparation soit indépendante de l'énergie. En accord avec la théorie, la relation (A4) de l'Annexe est vérifiée pratiquement pour l'opération PHYSE dans le PS en:

- réglant la valeur absolue de la chromaticité au moyen des Pole Face Windings et des sextupôles, ce qui permet d'ajuster la dispersion d'énergie du faisceau *extrait*.
- appliquant une dispersion petite au septum SES23 et une dispersion grande au premier septum magnétique SMH57, au moyen des quadripôles.

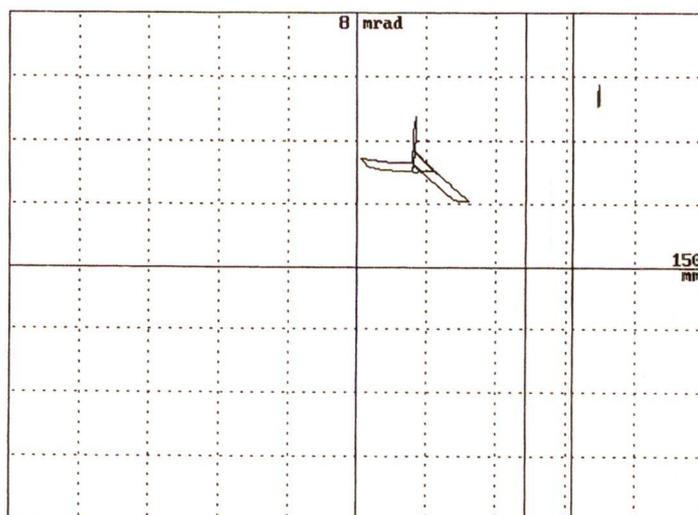
Figure 3. Représentation au septum magnétique SMH57 dans l'espace de phase



Extraction du faisceau par le deuxième septum magnétique SMH61

Le faisceau *extrait* est défléchi et envoyé dans le canal d'extraction de la ligne FT61.

Figure 4. Représentation au septum magnétique SMH61 dans l'espace de phase



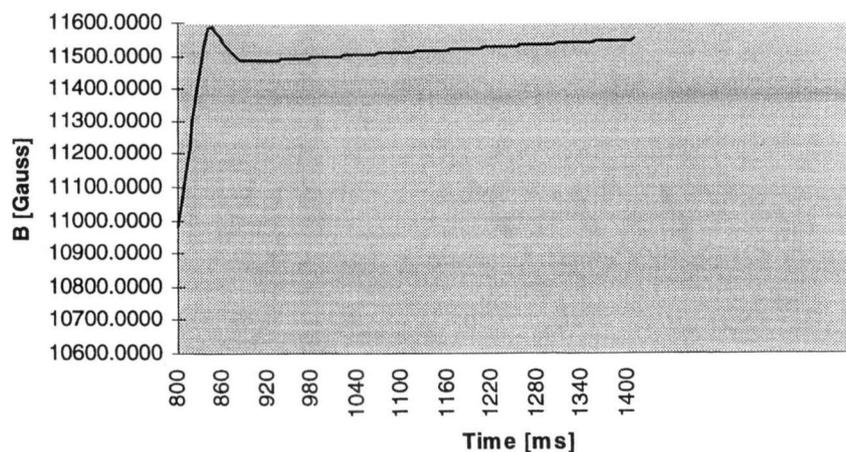
III. Description du processus d'éjection lente pour PHYSE

Forme du champ magnétique à l'éjection (représentation graphique du cycle B(t) en page 3)

Le processus d'éjection (ou "spill") dure 400 ms environ (maximum 500 ms), ce qui correspond à 200 000 révolutions (la fréquence de révolution est de 475 kHz).

Le processus se déroule pendant le palier d'éjection du cycle magnétique. Typiquement, le spill démarre à C1050 et termine à C1450.

Overshoot entre C845 et C890



L' "overshoot" entre C845 et C890 (valeur maximale de 11590 G atteinte à C845 puis redescende à 11482 G à C890) est nécessaire pour enclencher le By-pass de l'alimentation principale (cf. Paragraphe "Cycle magnétique").

Le palier d'éjection commence à C890 et se termine à C1510.

La pente sur le palier d'éjection est constante et vaut 0.13 G/ms.

Manipulations RF avant l'éjection

Perturbation radiale

Elle permet, en déplaçant radialement le faisceau, de fixer l'instant de démarrage du spill.

Typiquement, elle est appliquée à C880 et son temps de montée est de 10 ms.

Dégroupage du faisceau (ou "debunching")

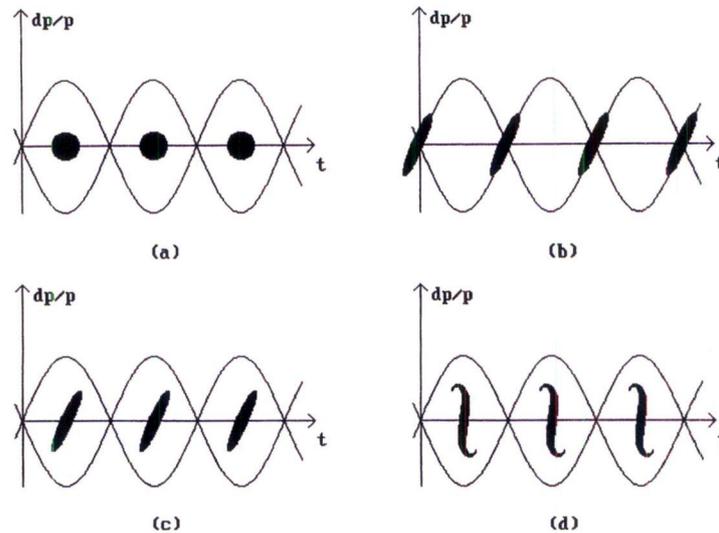
Le faisceau doit être dégroupé (ou "debunché") pour être *extrait* de façon continue: il doit perdre toute structure RF avant l'extraction.

De plus, le faisceau débunché doit avoir une grande dispersion d'énergie afin de produire un spill continu de la durée requise. Pour remplir cette condition, la procédure de debunching se déroule selon les étapes suivantes (se reporter à la figure 5):

- à partir de l'état a (faisceau stable dans le plan de phase longitudinal), on applique un saut de phase de la RF de 180° pour placer le bunch sur la phase instable.
- le bunch s'étire le long des séparatrices du bucket (état b). La durée est choisie selon la dispersion d'énergie souhaitée (typiquement 500 μ s).
- on revient à la phase initiale par un nouveau saut de phase. Le bunch se trouve au centre du bucket et commence à tourner sur lui-même (état c).

- la RF est coupée au moment où le faisceau présente une dispersion d'énergie maximale (état d). La RF reste coupée pendant tout le processus d'éjection et les cavités sont court-circuitées pour éviter que le faisceau, en excitant les cavités, ne se regroupe en paquets.

Figure 5. Séquencement du dégroupage



Séquencement du processus d'éjection

Entrée en résonance du faisceau

Enclenchement des quadripôles QH29 et QH87 et des sextupôles X19 et X7.

Comme les deux sépta SES23 et SMH57 sont placés sur le bord interne de la machine, la trajectoire du faisceau doit être déplacée vers l'intérieur de la machine. Ainsi, le faisceau est "poussé" dans la résonance progressivement en augmentant légèrement le champ magnétique sur le palier d'éjection pendant tout le processus. La valeur naturelle de Q_h augmente et tend vers 19/3.

Découpage (ou "splitting") du faisceau par le SES23

Le septum électrostatique sépare le faisceau initial en deux faisceaux: le faisceau *extrait* (faisceau qui a sauté l'anode du septum) et le faisceau *circulant*.

Pour permettre cette extraction, l'orbite du faisceau *circulant* est déformée et rapprochée du septum grâce au bump produit par les dipôles BHZ19 et BHZ27.

Après le découpage, le faisceau *circulant* décrit l'orbite nominale du PS. Le faisceau *extrait* décrit une trajectoire sinusoïdale autour de l'orbite nominale.

Déflexion du faisceau extrait par le SMH57

La déflexion initiale par le SES23 n'est pas suffisante pour permettre au faisceau de sauter le septum d'éjection SMH61. Le premier septum magnétique SMH57 permet de défléchir le faisceau *extrait* vers l'extérieur de la machine, de façon à ce qu'il traverse la chambre à vide et qu'il soit séparé le mieux possible du faisceau *circulant*. Seul le faisceau *extrait* subit la déflexion du SMH57.

Ejection du faisceau par le SMH61

A l'emplacement du deuxième septum magnétique SMH61, le faisceau *extrait* est défléchi et envoyé dans le canal d'extraction de la ligne FT61.

Equipements impliqués

• **Septa**

Trois septa sont utilisés aujourd'hui pour l'éjection lente en 61: SES23, SMH57 et SMH61.

L'ancienne éjection lente utilisait 4 septa, tous placés sur le côté externe de la machine, ce qui les exposait à l'irradiation par la lumière synchrotronique des faisceaux de leptons.

Pour éviter cette irradiation, le layout actuel repose sur trois septa: SES23, SMH57 (tous deux placés sur le côté interne de la machine) et SMH61 (placé hors du vide, donc protégé des radiations synchrotroniques).

SES23

Septum électrostatique qui sépare le faisceau *extrait* du faisceau *circulant*.

Septum placé dans le vide.

Epaisseur = 0.1 mm. L'épaisseur importante de ce septum induit des pertes.

Angle de déflexion = 0.28 mrad à 24 GeV/c.

Il est alimenté avec une tension continue de 150 Kvolts (largeur de gap = 18mm).

SMH57

Septum magnétique (appelé "septum mince" par opposition au SMH61) qui défléchit le faisceau *extrait* pour lui permettre de sauter le SMH61.

Septum placé dans le vide.

Epaisseur = 4 mm.

Il est enclenché à 960C (= PX.SSMH57 + PX. MSTEJC1).

Séparation entre faisceau *extrait* et faisceau *circulant* = 8 mm

SMH61

Septum magnétique qui éjecte le faisceau *extrait* dans le canal de la ligne FT61.

Septum placé dans l'air, dans le canal d'extraction.

Epaisseur = 23 mm.

Angle de déflexion = 1.2 mrad.

Il est enclenché à 960C (= PX.SSMH61 + PX. MSTEJC1).

La déflexion produite par ce septum étant faible, une éjection du faisceau, sans courant dans cet aimant, est réalisable (mais le faisceau est alors mal centré).

• **Dipôles bumper**

Dipôles horizontaux DHZ19 + 27

Ils créent un bump de type $\lambda/2$ appelé BSW23: ils déforment l'orbite nominale du faisceau *circulant* pour la rapprocher du SES23.

Ils sont enclenchés à 950C.

Dipôles horizontaux DHZ 53 + 59 + 67 et septum bumper 61

Les deux bumps nécessaires pour se rapprocher des septa magnétiques SMH57 et SMH61 sont fortement couplés du fait de la proximité de ces derniers. Ils forment le bump lent BSW57.

Ils sont enclenchés à 950C.

Le dipôle engendrant le bump est **DHZ53**.

DHZ59 permet de défléchir la trajectoire vers SMH61.

Le **septum bumper 61**, placé juste après le septum d'extraction dans la même section droite, ramène le faisceau *circulant* vers le centre de la machine afin d'éviter une position trop extérieure dans les sections 63-65. Il ne kicke que le faisceau *circulant*, pas le faisceau *extrait*.

DHZ67 ferme le bump et replace le faisceau *circulant* sur l'orbite nominale fermée.

- **Quadripôles horizontaux QH29 + QH87**

Leur rôle est multiple:

- * amener le tune horizontal Qh proche de la résonance 19/3 avant l'éjection
- * augmenter le facteur β_h (modulation d'amplitude des oscillations bétatroniques) en SD23 et en SD61
- * diminuer la dispersion Dh en SD23 et augmenter Dh en SD57

Deux quadripôles sont nécessaires car un seul ne serait pas assez puissant pour approcher Qh suffisamment proche de la résonance.

Ils sont enclenchés à 950C.

Nota Bene:

Les deux quadripôles sont décentrés radialement, de 15 mm à l'extérieur pour Q29 et de 15 mm vers l'intérieur pour Q87, afin de corriger l'orbite réelle du faisceau, déformée par rapport à l'orbite nominale. En effet, le tune horizontal avant le démarrage du "spill" étant 6.21, les bumps 23 et 57 ne sont plus exactement à $\lambda/2$ donc la trajectoire du faisceau ne se referme pas sur l'orbite nominale. Cet effet affecte la trajectoire sur toute la circonférence de la machine.

	Machine non perturbée		Machine avec 2 quads	
	β_h	Dispersion	β_h	Dispersion
en SES23	22.2 m	3.04 m	36.2 m	1.27 m
en SMH57	22.6 m	3.04 m	35.5 m	5.01 m

- **Sextupôles X19 + X7**

Leur rôle est multiple:

- * exciter la résonance de troisième ordre 19/3
- * produire un "spiral pitch" (largeur du faisceau extrait dans le septum électrostatique) de 10 mm à l'entrée du SES23.
- * augmenter la chromaticité de sa valeur naturelle -1.5 à une valeur proche de -0.5.
- * permettre une orientation adéquate d'une des 3 séparatrices en SD23 dans le plan de phase normalisé; l'angle par rapport à l'axe horizontal doit être compris entre 140 et 160 degrés.

Ils sont enclenchés à 950C.

Caractéristiques du faisceau à l'éjection

	Valeurs numériques
Dispersion en énergie du faisceau extrait en SD23	$\Delta P/P = 8 \cdot 10^{-4}$
Emittance du faisceau extrait	$\epsilon_h = 0.1\pi \mu\text{m}$
Emittance du faisceau circulant	$\epsilon_h = 0.5\pi \mu\text{m}$
Dispersion en SD23	Dh = 1.27 m
Dispersion en SD57	Dh = 5.01 m
β_h en SD23	$\beta_h = 36$ m
β_h en SD57	$\beta_h = 35.5$ m
Chromaticité	$\xi_h = -0.5$
	$Q'h = Q_h * \xi_h = -3.2$

CONTROLE DE L'OPERATION PHYSE

Nota Bene:

Dans l'opération PHYSE, c'est le processus d'éjection qui est le plus délicat à régler car il est spécifique à cette opération. Son contrôle est décrit dans le paragraphe II.

Nous rappelons brièvement, dans le paragraphe I, les paramètres de contrôle du faisceau avant l'éjection qui ne doivent pas être oubliés lors du setting-up.

I. Contrôle du faisceau avant l'éjection

Réglage:

- **des éléments d'injection**
 - du septum d'injection: SMH42
 - du bump d'injection: BSW42
 - du kicker d'injection: KFA45
 - de la capture par les cavités RF 10 MHz
 - du blow-up sur le palier d'injection

- **des correcteurs basse énergie:**
 - des dipôles verticaux + horizontaux: DHZxy + DVTxy
 - des quadripôles normaux et "skew": QFNxy/QDNxy + QSKxy
 - **pas d'utilisation des sextupôles ni des octupôles d'injection**

- **des correcteurs haute énergie:**
 - des circuits focalisants et défocalisants des PFW et de la boucle en huit.

Attention:

Ne pas oublier les PFWS sinon on perd le faisceau vers C320-340.

La boucle en huit doit être coupée juste avant le démarrage de l'éjection.

- **de la perturbation radiale "PA.PERSE"**

Plus la perturbation appliquée est intérieure (position radiale moyenne "MRP" plus petite), plus le "spill" démarre tôt.

- **de la séquence de debunching**

(depuis le programme "Linked timing ctrl" appelé sur PX.TREEH20)

Les intervalles de temps entre les différentes opérations (cf. Paragraphe "Manipulations RF avant l'éjection") permettent de régler la dispersion d'énergie du faisceau à éjecter.

A PX.SBR (Start Bunch Rotation), le faisceau saute sur la phase instable du bucket et y reste pendant l'intervalle: PX.SDBR - PX.SBR.

A PX.SDBR (Start Debunching Bunch Rotation), retour sur la phase stable pendant l'intervalle: PX.R1VMOD1 - PX.SDBR (*check !!*)

II. Contrôle du processus d'éjection lente

Nota Bene:

Il faut régler les paramètres **physiques** de l'éjection en utilisant le programme dédié "**SE61 Spill control**" en évitant de contrôler individuellement les équipements via les knobs. Les WorkingsSets sont plutôt réservés à la visualisation des paramètres.

Visualisation des paramètres génériques de l'éjection et du transfert:

Cmgr "CPS": Wsets "EJECTION61" + "EJECTION61_LINE"

Cmgr "EA": Wsets "ZT9", "ZT10" "ZT11"

Nota Bene: pour chaque timing d'éjection, la CCV affichée correspond au délai à ajouter à la valeur du timing de référence PX.MSTEJC1 (Wset "CENTRAL TIMING").

Visualisation des paramètres spécifiques:

Cmgr "CPS": Menu "Measur": programme "Ejection display"

Visualisation des pertes dans la machine:

Les pertes sont maximales en SD53 du fait de l'épaisseur du septum électrostatique.

Il y a également quelques petites pertes en SD57 et en SD61 (moins importantes qu'en SD57).

- **Visualisation des pertes dans une section droite (SD):**

Cmgr "CPS": Root menu: programme "Naos": "Local + PS + Measures + BLM + PR.BLMxx"

Attention: il faut penser à enlever les écrans TV (PR.MTV57 et FT61.MTV2) lors de l'observation des pertes avec l'outil Naos car elles induisent des pertes.

- **Visualisation des pertes sur la circonférence de la machine:**

Cmgr "CPS": Menu "General": programme "VIP": "PS + Measures + PS.MBL Histogram"

Visualisation de signaux spécifiques:

Cmgr "CPS": Root menu: programme "Naos": "Global + PS + "SES61 KP & ChSt 8/5/96" "

Visualisation de la position du faisceau:

- **Position en SD57:**

Cmgr "CPS": Menu "General": "VIP": "PS-operations + FT61 in/out screens + MTV57"

Le SMH57 est représenté, ce qui permet d'observer:

- à la gauche du septum: le faisceau *circulant*
- à la droite du septum: le faisceau *extrait*

Les faisceaux *circulant* et *extrait* ne doivent pas être trop proches du septum sinon ils induisent des pertes.

- **Position dans le canal d'extraction de la ligne FT61, juste après l'extraction:**

Cmgr "CPS": Menu "General": "VIP": "PS-operations + Margrite screen + FT61.MTV02/ FT61.MTVxx"

Édition des paramètres physiques de l'éjection lente:

Le programme dédié "**SE61 Spill control**" (disponible sous le menu "**Control**") permet de contrôler le processus d'éjection en réglant ses paramètres **physiques**, soit:

- **les valeurs des bumps 23 et 57: x23 et x57**

x23 (courant dans PF.BSW23) permet de régler l'amplitude du saut dans le SES23. Si le bump est plus grand en valeur absolue (x23 plus négatif ⇔ plus de courant dans PF.BSW23), le saut est plus petit car le faisceau *circulant* est plus rapproché du septum.

x57 (courant dans PF.BSW57) permet d'optimiser les pertes au SMH57 par centrage du trou entre le faisceau *circulant* et le faisceau *extrait*. En effet, les pertes sont induites si un des deux faisceaux touche le septum.

- **les valeurs du tune horizontal et de la chromaticité horizontale produits par les PFWS focalisants et défocalisants: Qho et Xiho**
- **les valeurs de variation du tune horizontal et de la chromaticité horizontale produits respectivement par les quadripôles et les sextupôles d'éjection: ΔQ_h et ΔX_{ih}**
 ΔQ_h (courant dans PF.QSE) permet de régler l'instant de démarrage du spill (ΔQ_h plus grand \Leftrightarrow spill plus tôt) et permet de centrer la résonance dans l'ouverture de la machine.
 ΔX_{ih} (courant dans PF.XSE) permet d'optimiser les flancs du trou entre le faisceau *circulant* et le faisceau *extrait* en SD57.

Edition des paramètres dans les septa d'éjection

Dans le wset " EJECTION61", on peut régler l'intensité du courant des alimentations des 2 septa, PR.SMH57 et PR.SMH61:

- Si le courant dans SMH57 est plus grand, le faisceau *extrait* est éjecté plus à l'extérieur dans le septum d'extraction SMH61.
- Si le courant dans SMH61 est plus grand, l'angle du faisceau éjecté dans le canal est plus grand et l'image du faisceau est déplacée sur la gauche de l'écran de la TV2.

Quelques conseils pour le réglage de l'éjection

- **Vérifier que les pertes n'apparaissent pas dès le début de la ligne de transfert.**
Si c'est le cas, cela indique que l'éjection n'est pas réglée correctement.
- **Optimiser les pertes**
Les pertes de l'histogramme BLM permettent d'apprécier facilement la qualité du réglage de l'éjection.

Si on observe des pertes en SD57, le plus simple est de retoucher le bump 57 (paramètre "x57" dans le programme "SE61 Spill Control"). Si cette première méthode échoue (d'autres pertes sont induites), les pertes en SD57 peuvent être dues à une variation de Qh causée par une petite dérive du courant dans les circuits focalisants et défocalisants des PFWS sur le flat-top. Il faut retoucher Qh en contrôlant l'effet sur les pertes:
 - Si c'est le faisceau *circulant* qui est trop proche du SMH57 et qui induit les pertes, cela indique que la résonance est **trop intérieure** dans la machine; il faut, par conséquent augmenter Qh.
 - Si c'est le faisceau *extrait* qui est trop proche du SMH57 et qui induit les pertes, cela indique que la résonance est **trop extérieure** dans la machine; il faut, par conséquent diminuer Qh.
- **Centrer le spill sur le flat-top du champ magnétique**
Le démarrage du spill est réglé en modifiant l'amplitude de la perturbation radiale.
La longueur du spill est réglée en modifiant la pente du champ magnétique sur le flat-top d'éjection.
Le profil temporel du spill est réglé en modifiant les paramètres du debunching, en particulier le temps passé sur la phase instable du bucket.

REFERENCES

- [1] Ch.Steinbach, "Proposal for a new PS slow extraction", PS/OP/Note 86-24
- [2] Ch.Steinbach, "Machine Development on slow extraction SE61", PS/OP/Note 93-50 (MD)
- [3] Ch.Steinbach, "Beam Optics at resonant extraction septa", EPAC-Berlin 1992
- [4] Ch.Steinbach, H. Stucki, M.Thivent, "The new slow extraction system of the CERN PS", PAC-Washington 1993
- [5] J.Cl.Cendre, A.Pace, "Le transfert continu pour la physique à cible fixe du SPS", SFT/CT Red Book
- [6] Ch. Steinbach, "Slow Extraction from the CERN PS", Transparencies for training course
- [7] W. Hardt, "Ultraslow extraction out of LEAR (Transverse aspects)", PS/DL/LEAR/Note 81-6

ANNEXE: PRINCIPE THEORIQUE DE L'EJECTION LENTE

Introduction

Une éjection lente ne peut pas être réalisée en poussant simplement le faisceau dans un septum électrostatique d'extraction. En effet, pour obtenir une extraction d'une durée de 400 ms (soit environ 200 000 révolutions) pour un faisceau de 20 mm de large, l'amplitude du saut au septum devrait être de 0.1 μm , ce qui est bien inférieur à l'épaisseur minimale de septum réalisable techniquement (de l'ordre de 0.1 mm). Pour que le faisceau puisse sauter le septum électrostatique d'extraction, il faut augmenter l'amplitude de ses oscillations bétatroniques; pour cela on utilise **une résonance**.

Principe de l'éjection lente de type "résonnante"

Hypothèse

Cette étude utilise comme hypothèses de travail les conditions de l'éjection lente PHYSE telle qu'elle est mise en oeuvre au PS, soit:

- **la résonance appliquée se situe dans le plan horizontal.**
- **la résonance appliquée est du troisième ordre.** La valeur du "tune" horizontal Q_h à la résonance est 19/3.
- la résonance est **approchée par les valeurs inférieures de Q_h** ($Q_h < 19/3$).
- la chromaticité de la machine étant négative, la résonance est **approchée par les valeurs supérieures d'énergie**: l'énergie moyenne du faisceau éjecté décroît pendant le processus d'éjection.
- caractéristiques optiques de la machine: **dispersion horizontale positive, chromaticité horizontale négative.**

Principe

La résonance est générée en amenant le point de fonctionnement (ou "tune") horizontal Q_h à une valeur fixe proche de 19/3 grâce à des quadripôles.

Le faisceau est "poussé" dans la résonance en approchant progressivement son énergie de l'énergie de résonance; ceci peut être réalisé en augmentant légèrement le champ magnétique pendant le processus d'extraction. Se faisant, on adapte la machine à des énergies plus hautes. Ainsi, relativement à l'énergie de l'orbite centrale, l'énergie moyenne du faisceau décroît; Q_h augmente et tend vers la valeur 19/3.

La résonance est excitée par une perturbation sextupolaire introduite par un ou plusieurs sextupôles.

Dans l'espace de phase horizontal (x, x'), cela définit une **zone de stabilité**, dans laquelle les trajectoires sont fermées, délimitée par 3 **séparatrices**, le long desquelles s'étirent les trajectoires des particules en résonance.

L'amplitude des oscillations bétatroniques pour les particules en résonance, croît à chaque période de trois tours. Au bout d'un certain nombre de révolutions, cette amplitude est suffisante pour que les particules sautent le septum d'extraction (généralement électrostatique). Celui-ci sépare le faisceau en un faisceau **extrait** et un faisceau **circulant** qui se déplacent sur deux orbites distinctes.

Un deuxième septum (généralement magnétique) sépare physiquement les deux faisceaux en défléchissant le faisceau **extrait** dans le canal d'extraction. Il n'altère pas la trajectoire du faisceau **circulant**.

Démonstration théorique

Reference: M.Q. Barton, Int. Conf. on Accelerators, Geneva 1971

Equation hamiltonienne du mouvement dans l'espace des phases (x, x')

Les conditions sont:

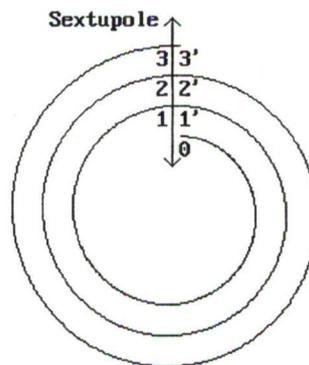
- Qh est proche de la valeur de résonance
- un sextupôle est actif pour exciter la résonance

Effet d'un sextupôle sur un faisceau proche de la résonance

Il s'agit de calculer la trajectoire d'une particule proche de la résonance après 3 passages successifs dans un sextupôle. A chaque passage, la particule subit une déflexion. La trajectoire de la particule après 3 révolutions est le résultat de l'effet de ces 3 déflexions successives.

Le calcul de la trajectoire finale est explicité en développant plusieurs étapes:

- **Calcul de la variation de la trajectoire après 3 passages dans le sextupôle sans prendre en compte les déflexions induites sur le faisceau**



Représentation schématique des révolutions successives dans la machine

Soit, dans le plan de phase normalisé, une particule ayant les coordonnées $\begin{vmatrix} x \\ x' \end{vmatrix}$ à la sortie du sextupôle et représentée par le point 0 sur la figure ci-dessus. Elle se retrouve, après 3 révolutions en:

$$\begin{vmatrix} x_3 \\ x'_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos 6\pi Q & \sin 6\pi Q \\ -\sin 6\pi Q & \cos 6\pi Q \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ x' \end{vmatrix} \quad (\text{A1})$$

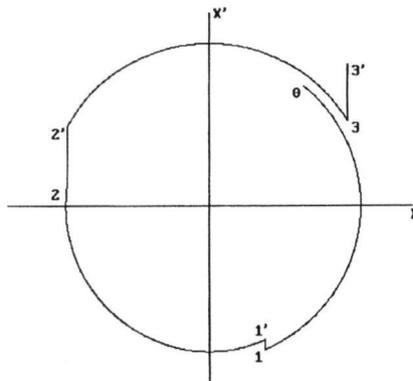
Proche de la résonance:

$$6\pi Q = 2k\pi + \varepsilon \quad \text{avec } \varepsilon \text{ petit}$$

La relation (A1) devient:

$$\begin{vmatrix} x_3 \\ x'_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \varepsilon \\ -\varepsilon & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ x' \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{03'} &= \varepsilon x' \\ \Delta x'_{03'} &= -\varepsilon x \end{aligned}$$



Trajectoire, sur 3 tours successifs, au passage du sextupôle (plan de phase horizontal)

- Calcul de la variation de la trajectoire, après 3 passages, due à la première déflexion (premier passage dans le sextupôle)

La position du faisceau à l'entrée du sextupôle, après un tour, est:

$$\begin{vmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos 2\pi/3 & \sin 2\pi/3 \\ -\sin 2\pi/3 & \cos 2\pi/3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ x' \end{vmatrix}$$

La déflexion induite par le sextupôle est:

$$\frac{1}{2} S \left(-\frac{1}{2} x + \frac{\sqrt{3}}{3} x' \right)^2$$

L'effet de cette déflexion après deux tours est:

$$\begin{vmatrix} \Delta x_{13} \\ \Delta x'_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos 4\pi/3 & \sin 4\pi/3 \\ -\sin 4\pi/3 & \cos 4\pi/3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} S \left(-\frac{1}{2} x + \frac{\sqrt{3}}{2} x' \right)^2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{13'} &= -\frac{\sqrt{3}}{4} S \left(-\frac{1}{2} x + \frac{\sqrt{3}}{2} x' \right)^2 \\ \Delta x'_{13'} &= -\frac{1}{4} S \left(-\frac{1}{2} x + \frac{\sqrt{3}}{2} x' \right)^2 \end{aligned}$$

- **Calcul de la variation de la trajectoire, après 3 passages, due à la deuxième déflexion (deuxième passage dans le sextupôle)**

La position du faisceau à l'entrée du sextupôle, après deux tours, est:

$$\begin{vmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos 4\pi / 3 & \sin 4\pi / 3 \\ -\sin 4\pi / 3 & \cos 4\pi / 3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ x' \end{vmatrix}$$

La déflexion induite par le sextupôle est:

$$\frac{1}{2} S \left(-\frac{1}{2} x - \frac{\sqrt{3}}{3} x' \right)^2$$

L'effet de cette déflexion après un tour est:

$$\begin{vmatrix} \Delta x_{23} \\ \Delta x'_{23} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos 2\pi / 3 & \sin 2\pi / 3 \\ -\sin 2\pi / 3 & \cos 2\pi / 3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} S \left(-\frac{1}{2} x - \frac{\sqrt{3}}{2} x' \right)^2 \end{vmatrix}$$

Soit:

$$\begin{aligned} \Delta x_{23} &= \frac{\sqrt{3}}{4} S \left(-\frac{1}{2} x - \frac{\sqrt{3}}{2} x' \right)^2 \\ \Delta x'_{23} &= -\frac{1}{4} S \left(-\frac{1}{2} x - \frac{\sqrt{3}}{2} x' \right)^2 \end{aligned}$$

- **Calcul de la variation de la trajectoire, après 3 passages, due à la troisième déflexion (dernier passage dans le sextupôle)**

La position du faisceau à l'entrée du sextupôle, après trois tours, est:

$$\begin{vmatrix} x_3 \\ x'_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos 6\pi / 3 & \sin 6\pi / 3 \\ -\sin 6\pi / 3 & \cos 6\pi / 3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ x' \end{vmatrix}$$

L'effet de cette dernière déflexion est:

$$\begin{aligned} \Delta x_{33'} &= 0 \\ \Delta x'_{33'} &= \frac{1}{2} S x^2 \end{aligned}$$

- **Expression de l'effet cumulé des 3 déflexions sur la trajectoire**

$$\Delta x = \Delta x_{03'} + \Delta x_{13'} + \Delta x_{23'} + \Delta x_{33'}$$

$$\Delta x' = \Delta x'_{03'} + \Delta x'_{13'} + \Delta x'_{23'} + \Delta x'_{33'}$$

Soit:

$$\Delta x = \varepsilon x' + \frac{3S}{4} xx'$$

$$\Delta x' = -\varepsilon x + \frac{3S}{8}(x^2 - x'^2)$$

La durée nécessaire à une particule pour effectuer 3 révolutions dans la machine (3 passages dans le sextupôle) étant petite par rapport à la durée du processus d'éjection lente, cette durée est choisie comme unité de temps, d'où:

$$\frac{dx}{dt} = \Delta x = \varepsilon x' + \frac{3S}{4} xx'$$

$$\frac{dx'}{dt} = \Delta x' = -\varepsilon x + \frac{3S}{8}(x^2 - x'^2)$$

Equation de l'Hamiltonien du système

S'il existe un Hamiltonien H, il satisfait les relations:

$$\frac{\delta H}{\delta x} = -\frac{dx'}{dt} = \varepsilon x - \frac{3S}{8}(x^2 - x'^2) \quad (\text{A2})$$

$$\frac{\delta H}{\delta x'} = \frac{dx}{dt} = \varepsilon x' + \frac{3S}{4} xx'$$

En intégrant les équations différentielles partielles (A2), on obtient:

$$H = \frac{3S}{8} x'^2 x - \frac{S}{8} x^3 + \frac{\varepsilon}{2} x^2 + \text{fonction indépendante de } x$$

$$H = \frac{3S}{8} xx'^2 + \frac{\varepsilon}{2} x'^2 + \text{fonction indépendante de } x'$$

On peut choisir l'Hamiltonien H satisfaisant les deux relations ci-dessus:

$$H = \frac{\varepsilon}{2}(x^2 + x'^2) + \frac{S}{8}(3xx'^2 - x^3)$$

Trajectoires du faisceau dans l'espace de phase

Elles sont représentées par la famille de courbes à Hamiltonien constant:

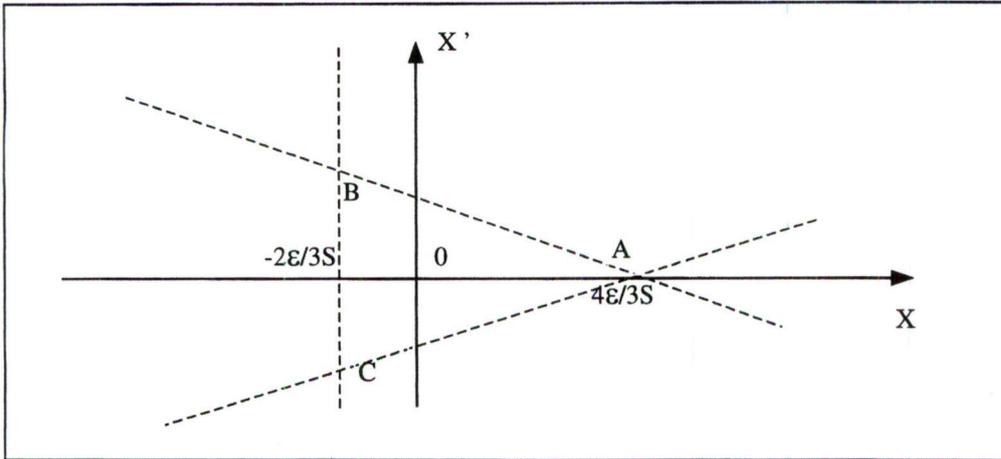
$$H = \frac{\varepsilon}{2}(x^2 + x'^2) + \frac{S}{8}(3xx'^2 - x^3)$$

- Si S est nul, les trajectoires sont des cercles.
- Si x et x' sont petits, les trajectoires sont des cercles déformés.

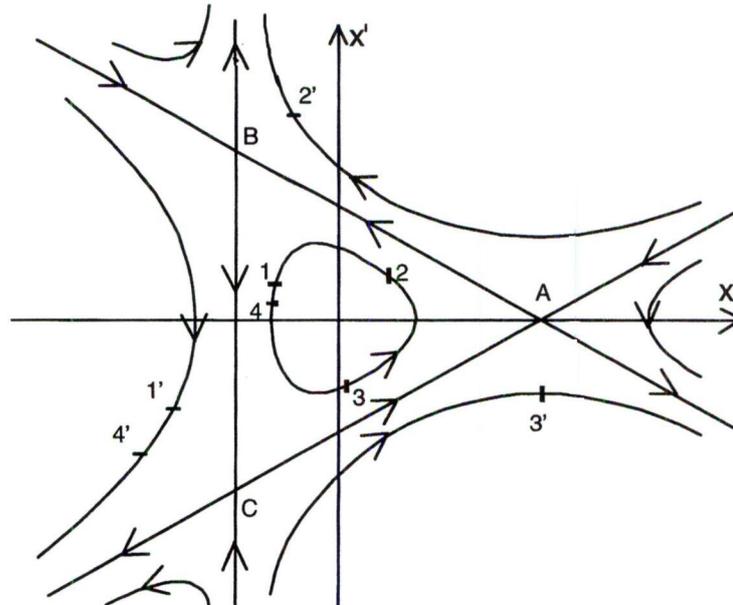
- Les trajectoires sont symétriques par rapport à l'axe x .

Pour la valeur particulière de $H_0 = \left(\frac{2\mathcal{E}}{3}\right)^3 \left(\frac{2}{S}\right)^2$, les trajectoires sont 3 droites, appelées *séparatrices*, qui définissent un **triangle de stabilité** correspondant à l'émittance E :

$$E = \frac{1}{\pi\sqrt{3}} \left(\frac{4\mathcal{E}}{S}\right)^2 = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(24 \frac{\Delta Q_h}{S}\right)^2 = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(24 \frac{\xi_h Q_h \Delta p}{S p}\right)^2$$



- Les autres valeurs de H (différentes de H_0) définissent un réseau de trajectoires divergentes qui s'étirent le long des 3 séparatrices.



Dans le plan de phase horizontal (x, x') , une particule initialement en 1 décrit les points 2 puis 3 puis 4 à l'intérieur de la zone stable. L'amplitude de ses oscillations ne diverge pas.

Une particule, initialement en dehors de la zone stable, en 1' par exemple, décrit 2' puis 3' puis 4'. Sa trajectoire s'étire le long des séparatrices, s'éloignant de plus en plus de l'orbite fermée. L'amplitude de ses oscillations varie exponentiellement avec le temps.

Effet de la dispersion d'énergie $\Delta p/p$ du faisceau

- **Déplacement des triangles de stabilité**

Comme:

$$\Delta R/R = D_p \Delta p/p$$

La dispersion horizontale D_p étant positive, le triangle de stabilité se rapproche du centre de la machine si l'énergie diminue.

- **Changement de la taille des triangles de stabilité**

Comme:

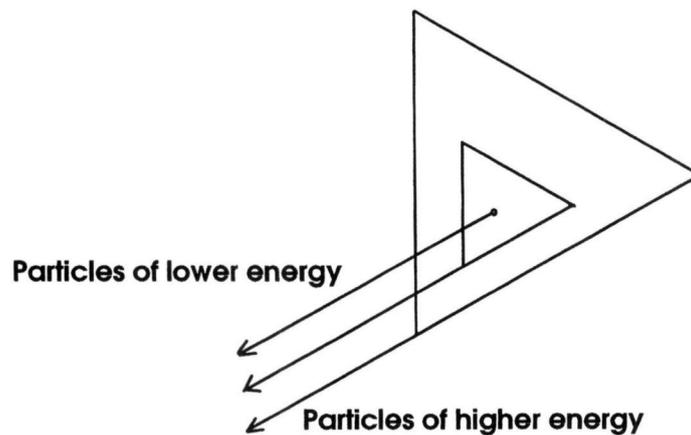
$$\Delta Q_h/Q_{h0} = \xi_h \Delta p/p_0$$

La chromaticité ξ_h étant négative, le triangle de stabilité est plus petit si l'énergie diminue.

En effet:

Soit une particule (p, Q) telle que $p < p_0$ par rapport à une particule de référence (p_0, Q_0).

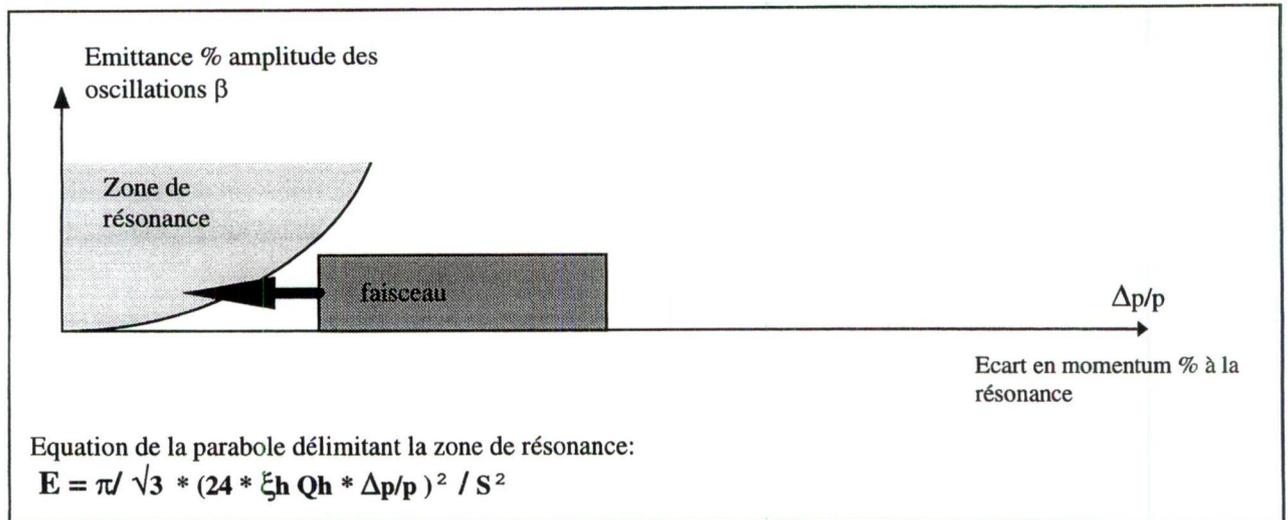
$\xi_h < 0$ implique $\Delta Q > 0$ donc $Q > Q_0$. Puisque la résonance est approchée par les valeurs inférieures de $19/3$, l'écart par rapport à la résonance ε est plus petit. L'aire du triangle étant proportionnelle au carré de ε , le triangle de stabilité est plus petit pour la particule (p, Q).



Il est nécessaire que le faisceau présente une forte dispersion d'énergie au démarrage de l'extraction, afin de générer un spill de longue durée. En effet, un faisceau présentant une dispersion idéalement nulle, produirait un spill court puisque toutes les particules entreraient en résonance suivant le seul critère d'amplitude béatronique (se reporter au dessin du paragraphe suivant "Entrée en résonance du faisceau")

Entrée en résonance du faisceau

Au début du processus d'extraction, le tune horizontal Q_h est amenée à une valeur constante proche de la résonance. Pendant le processus d'extraction, le faisceau est poussé dans la résonance (Q_h se rapproche de plus en plus de la valeur de résonance $19/3$) en augmentant continûment le champ magnétique.



Conditions optiques requises

L'optimisation du processus d'éjection lente (minimisation des pertes et haute efficacité) impose des contraintes sur l'optique du faisceau à l'emplacement des 2 septa.

A l'emplacement du septum électrostatique, il serait intéressant de minimiser les pertes en superposant les séparatrices des différentes énergies. Cette méthode, proposée par W.Hardt pour la machine LEAR et décrite dans la note [6], impose la relation:

$$8\pi Q_h'/S + D_{n1} * \cos \varphi_1 - D'_{n1} * \sin \varphi_1 = 0 \quad (A3)$$

avec:

$$Q_h' = \xi_h * Q_h$$

D_{n1}, D'_{n1} : coefficients normalisés de dispersion au premier septum

φ_1 : angle de phase bétatronique entre le sextupôle équivalent et le premier septum

A l'emplacement du septum magnétique, il faut remplir une condition similaire pour optimiser l'éjection. Même si le faisceau extrait présente une émittance nulle à l'emplacement du premier septum (la contrainte à l'emplacement du premier septum est vérifiée), du fait que le deuxième septum n'est pas dans la même section que le premier et que, généralement, le transfert n'est pas achromatique, la position des particules du faisceau extrait au deuxième septum va dépendre de leur énergie. Ainsi, deux particules d'énergies différentes et se trouvant en $X_{a1} = X_{b1}$ au premier septum se trouveront en deux positions différentes au deuxième septum: $X_{a2} \neq X_{b2}$.

Pour optimiser la séparation au deuxième septum, la chromaticité et la dispersion sont ajustées afin que la position de la séparation soit indépendante de l'énergie (cela revient à: $X_{a2} = X_{b2}$).

La condition à satisfaire est:

$$D_{n2} * \sin \varphi_1 - D_{n1} * \sin \varphi_2 = 8\pi Q_h' / S * \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (\text{A4})$$

avec:

$$Q_h' = \xi_h * Q_h$$

D_{n2}, D'_{n2} : coefficients normalisés de dispersion au deuxième septum

φ_2 : angle de phase bétatronique entre le sextupôle et le deuxième septum

Un choix approprié des paramètres de dispersion $D_{n1}, D'_{n1}, D_{n2}, D'_{n2}$ (au moyen de la position et de la force des quadripôles) et de la chromaticité Q_h' (au moyen de la position et de la force des sextupôles) permet **THEORIQUEMENT** de satisfaire les **deux conditions (A3) et (A4)** exprimées ci-dessus.

Cependant, pour le PS, du fait que les deux septa sont du même côté de la machine, les conditions (A3) et (A4) n'ont pas pu être remplies toutes les deux. Seule, la condition (A4) est satisfaite. On a renoncé à l'optimisation des pertes au septum électrostatique au prix d'environ 0.5% de pertes supplémentaires.

Pour remplir la condition (A4), il faut appliquer une chromaticité Q_h' assez grande pour limiter la dispersion d'énergie du faisceau *extrait*, ce qui implique que la valeur du bras gauche de l'équation (A4) soit la plus haute possible. Comme les deux septa sont du même côté de l'orbite fermée, il faut appliquer **une faible dispersion horizontale au premier septum et une grande au deuxième septum.**