



LYCEN 9362 ✓  
Rapport Interne  
Décembre 1993

See 9414

**Accélérateur d'agrégats de l'I.P.N. de Lyon**  
**Voies Haute Energie avec post-accélérateur R.F.Q.**  
**Bilan du fonctionnement de novembre 1992 à décembre 1993**

**R.Filliol<sup>1</sup>, R.Genre, J.P.Lopez<sup>1</sup>, J.Martin<sup>1</sup>, H.Mathez<sup>1</sup>**

Institut de Physique Nucléaire de Lyon, IN2P3-CNRS/Univ.C.Bernard  
43, Bd du 11 Novembre 1918, F-69622 Villeurbanne Cedex, France

L'objet de ce rapport est de présenter la synthèse des caractéristiques des faisceaux qui ont été produits de manière régulière pour les équipes de physiciens du laboratoire au cours des 12 derniers mois .

<sup>1</sup> Service Accélérateur d'Agrégats



## I. INTRODUCTION.

La période de fin 1991 à fin 1992 a débuté par l'obtention des premiers faisceaux post-accélérés ( Azote moléculaire et agrégats d'Hydrogène  $H_{21}^+$ ) à travers le quadrupole radiofréquence (R.F.Q.) [R1,R2] ; cette confirmation attendue de la capacité de la nouvelle machine à procurer le gain en énergie prévu (facteur 10) a été suivie d'une période d'essais électriques et thermiques hors faisceau, pendant le déroulement d'autres expériences sur la ligne basse énergie .

Cela a permis de mettre en évidence :

- une bonne aptitude à la tenue en tension entre électrodes jusqu'au voisinage de la valeur prévue par le concepteur ( soit 2,2 Kilpatrick environ ).
- l'excitation, dans certaines conditions de réglage de la séquence temporelle de la RF, de résonances mécaniques sur les extrémités libres des électrodes.
- l'incapacité du circuit de refroidissement ( supports et plaque d'accord ) à évacuer des puissances thermiques supérieures à 0,5 kW environ .

Ces mesures systématiques qui constituaient par ailleurs une première "prise de contact" avec une technologie nouvelle pour le laboratoire ont été conduites en s'imposant des limitations sévères, afin de pouvoir pousser le plus loin possible les investigations sans mettre en péril la sûreté et l'avenir de la machine . Le concepteur (I.A.P. Francfort) était par ailleurs demandeur du maximum d'informations sur le comportement de ce RFQ prototype , premier à ce jour permettant une plage d'accord en fréquence de +/- 15 % (c-à-d. acceptant une variation de l'énergie admissible entre 6 et 10 keV/u), et l'un des rares RFQ destiné à fonctionner avec un cycle utile RF très largement supérieur à 1 %.

Il a été décidé à l'issue de ces essais [R3] de modifier radicalement le circuit de refroidissement en établissant une circulation d'eau supplémentaire dans 4 conduits brasés sur les électrodes ; cette opération a impliqué une extraction complète de la structure accélératrice hors du tank avant son transport à Francfort et a été réalisée en un temps remarquablement court (13/07 au 25/09/1992) .

Fin octobre 1992, il était possible de confirmer le succès de l'opération, puisqu'une puissance thermique de plusieurs kW était atteinte quotidiennement, et que l'atténuation des phénomènes de résonance était sensible . Une puissance thermique de plus de 6 kW, maintenue avec une bonne stabilité de l'accord sur plusieurs heures autorisait déjà, même aux puissances-crête correspondant à des agrégats de masse élevée, des cycles utiles de la RF généralement supérieurs à celui de la source, qui est de l'ordre de 10 % .

La question de l'orientation à donner à la suite des essais se posait donc, car il fallait satisfaire :

- la demande du concepteur pour des données techniques exhaustives;
- l'impatience du Groupe technique de Projet et de l'ensemble des

personnes ayant participé à la construction de mettre en service l'installation;

- le souhait du laboratoire de disposer d'un bilan des performances essentielles;
- le désir des physiciens d'utiliser sans attendre le nouvel outil.

Il était finalement décidé de ne pas prolonger ces essais "statiques", mais de délivrer rapidement des faisceaux aux expériences, seule la confrontation quotidienne aux besoins des utilisateurs pouvant permettre de dresser un bilan réaliste des possibilités du nouvel ensemble. L'expérience de Fragmentation d'Agrégats dont l'installation était achevée fut la première utilisatrice.

L'exploitation, dans cette expérience, de détecteurs préalablement calibrés en énergie dans une gamme équivalente sur des faisceaux moléculaires au VDG 2,5 Mev, apportait en outre une information supplémentaire essentielle que ne pouvaient fournir les diagnostics d'intensité et de position installés avant et après le post-accelérateur. **Les données techniques collectées au fil de l'avancement du programme des physiciens ont finalement constitué un ensemble cohérent dont il nous paraît intéressant de présenter ci-après les points essentiels.**

## II. CONDITIONS GENERALES DE PRODUCTION DES FAISCEAUX.

### II.a- Périodicité hebdomadaire.

La production d'agrégats d'Hydrogène est assurée par une source cryogénique pulsée. Son cycle thermique impose la mise en froid avant le début d'un run, ce qui nécessite environ une journée; le réchauffement contrôlé à l'issue du run demande un temps du même ordre et doit impérativement être terminé avant la fin de semaine; il est justifié par l'accumulation d'Hydrogène ne participant pas au faisceau et par le bon fonctionnement de la buse. A ces contraintes s'ajoutent la capacité limitée de la réserve d'Hélium liquide embarquée sur la plateforme haute tension de l'injecteur Cockroft-Walton et les difficultés d'approvisionnement de quantités importantes de ce fluide.

Il n'est pas possible, dans ces conditions, de planifier un fonctionnement "en continu" et dans la pratique les expérimentateurs disposent de faisceau pendant 2 journées consécutives en milieu de semaine. Exceptionnellement, cette durée peut être portée à 3 jours. La consommation de fluides varie avec le cycle de la source et avec l'intensité de faisceau requise par l'expérience. En moyenne 2 "shifts" de 14 à 16 heures chacun peuvent être réalisés entre le mercredi matin et le vendredi matin.

### II.b- Variation des paramètres du faisceau.

#### II.b.1. *Energie.*

La tension de l'injecteur Cockroft-Walton est aisément modifiable entre 70 et 400 kV si la "formation" standard a été effectuée après l'arrêt de fin de semaine. Un fonctionnement au delà de cette tension

nécessite un cycle de formation approprié et doit être demandé à temps. De telles tensions sont nécessaires pour injecter les agrégats les plus lourds à la vitesse la plus élevée (10 keV/u) ou au contraire les agrégats en dessous de  $H_{11}$  à 60 keV/u et plus, le RFQ étant alors réglé pour focaliser seulement (voir ci-après). Dans le cas où une variation d'énergie doit intervenir en cours de run, il est indispensable de commencer par la tension d'injection la plus élevée afin de garder le bénéfice de la formation initiale. Pour un même agrégat, la modification de la tension de l'injecteur appelle la reprise de l'ensemble des réglages de la ligne de faisceau, sous assistance informatique; cette opération est complexe, et peut demander 1 heure environ.

La variation de l'énergie d'entrée du post-accélérateur RFQ nécessite de varier sa fréquence d'accord, et d'ajuster en conséquence les réglages des organes de production de RF. Cette opération est complexe et peut demander plusieurs heures pendant lesquelles la puissance est nécessairement coupée; on perd alors l'équilibre thermique qui avait été atteint précédemment. Il est donc particulièrement avantageux d'exécuter les changements d'énergie d'entrée du RFQ en dehors du temps de faisceau.

#### II.b.2. Masse de l'agrégat.

Le changement de la masse de l'agrégat extrait nécessite de modifier à la fois la tension du terminal (pour conserver la vitesse d'entrée du RFQ constante), certains paramètres de la source ainsi que ceux de la ligne de faisceau.(cf. ci-dessus).

A fréquence constante, il faut modifier la puissance de la RF appliquée au post-accélérateur. Nous avons montré qu'en commençant un shift par la puissance la plus élevée qui sera nécessaire (cela peut imposer un temps de montée en puissance de plusieurs heures, mais cette opération débute hors faisceau pendant la phase de conditionnement de la source de l'injecteur), le passage à une puissance inférieure peut être réalisé *en maintenant constante la puissance thermique*, par une augmentation corrélée du cycle utile RF ;(l'utilisateur bénéficiant d'une réduction de la durée de ses comptages). Dans ces conditions l'opération est réalisable en quelques dizaines de minutes sans perturber la stabilité thermique; cette procédure rationalise l'utilisation du temps de faisceau.

#### II.b.3. Intensité

Divers paramètres peuvent être modifiés au niveau de la source pour varier l'intensité crête du faisceau extrait sur plus d'une décade : intensité -ioniseur, focalisation, etc... La stabilité du réglage aux plus faibles courants est subordonnée à la persistance d'un signal utilisable sur les diagnostics de la voie.

Cette intensité-crête n'est transmise à travers le post-accélérateur que pendant les temps actifs RF. La modification du cycle utile (dans la limite de la puissance thermique maximale admissible) permet de varier la quantité d'agrégats transmis par unité de temps sans changer l'intensité-crête ; ce paramètre influe donc sur la durée de l'acquisition sans changer les conditions de fonctionnement des détecteurs .

Les appareils habituellement employés pour la mesure des courants de faisceaux sur les machines continues (electromètres) sont mal adaptés à la mesure de courants impulsionnels de durée aussi brève que celle imposée par la RF. Il en résulte que **l'indication fournie ne doit pas être enregistrée directement [R4]**; il faut y associer les paramètres du circuit collecteur de charges (capacité parallèle) et de la RF pour accéder à la grandeur inconnue . On pourra se reporter à la note LYCEN 9332 [R5] qui traite ce problème en détail.

### II.c- Alignements.

La ligne de faisceau qui succède au post-accélérateur (triplet, steerer, aimant d'analyse H.E.) a été alignée soigneusement sur l'axe de sortie du RFQ (qui n'est pas exactement confondu avec l'axe mécanique du tank). Cette optique a pour but d'accepter le maximum du faisceau issu du RFQ et de le focaliser à une distance donnée au-delà de l'aimant d'analyse. **Elle n'est pas prévue pour convoyer ce faisceau dans un dispositif disposé de façon quelconque ;** la chambre à vide de l'aimant<sup>1</sup> a été aménagée pour le passage d'un faisceau lumineux (laser) destiné à matérialiser l'axe de l'optique, de manière à faciliter l'implantation précise de toute nouvelle expérience . Faute de respecter cette procédure, *on court le risque de ne jamais pouvoir disposer d'un faisceau correct, et on pourrait être tenté d'attribuer à un dysfonctionnement de l'accélérateur ce qui n'est en fait que la conséquence d'un alignement mal réalisé [R4].*

### II.d- Synchronisation de l'acquisition .

Les signaux nécessaires à la conduite de l'expérience sont fournis aux utilisateurs : porte synchrone avec l'ouverture de la source, porte synchrone avec le temps d'application de la RF.

Les paramètres de la source, du guidage, du post-accélérateur sont archivés systématiquement à chaque modification du point de fonctionnement et sont à disposition de l'utilisateur pour contrôle des conditions de l'expérience .

---

<sup>1</sup>Depuis Septembre 1993, la chambre à vide définitive de l'aimant d'analyse haute énergie est en service (en remplacement d'une chambre monovoie provisoire). Elle autorise la coexistence géographique sur l'aire expérimentale de 2 dispositifs, l'un de longueur 3,5 m., l'autre limité à 2 m. en attendant l'éventuelle extension du bâtiment qui a été proposée.

### III . TEMPS DE FONCTIONNEMENT PENDANT LA PERIODE CONSIDEREE.

Du 26 Nov.1992 au 26 Nov.1993, l'accélérateur d'agrégats a été exploité exclusivement avec post-accélérateur. Du faisceau a été délivré alternativement à 2 expériences, pour la collaboration CAS-BIAS ( 3 semaines ) et pour la collaboration Fragmentation. ( 16 semaines ). En outre environ 170 heures de faisceau réparties sur 20 journées ont été produites à l'usage de l'équipe technique pour alignements, test de diagnostics, faisceaologie, essais de source et essais radiofréquence .

A l'issue de la période, l'ensemble des Agrégats de masse comprise entre 5 et 35 ont été produits et guidés dans l'expérience .

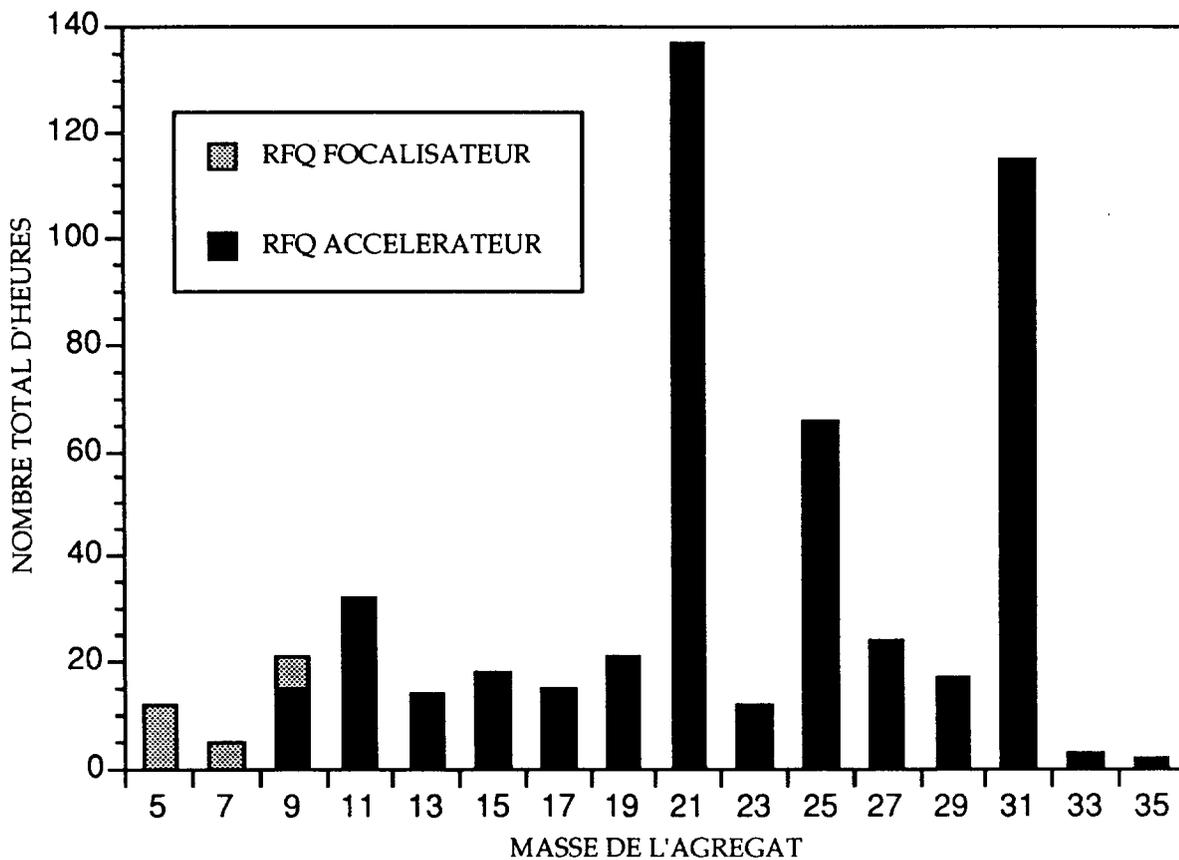


Figure 1 : FAISCEAUX POUR LA PHYSIQUE

Pour les deux plus lourds de cette série ( 33 et 35 ) la durée de production est limitée à quelques heures car ils exigent des tensions entre électrodes dépassant 50 kV ( à 85 MHz ) et imposent d'avoir procédé à une formation RF rigoureuse de la structure avant d'obtenir les conditions de stabilité nécessaires. Cela n'a en général pas été possible faute de temps. De plus la qualité de l'état de surface des électrodes évolue avec la durée de fonctionnement (voir

plus loin) et influence leur tenue en tension.

Pour tous les autres, le temps cumulé de production est largement variable en fonction des besoins de l'expérience . Un minimum commun d'environ 10 à 15 heures représente la durée d'une acquisition-type, et s'inscrit en général dans un shift d'une journée. **Au total il a été fourni 553 heures de faisceaux divers<sup>2</sup> avec la répartition indiquée** (Fig. 1). Ce total comprend également la production de l'Azote moléculaire , disponible à la source "en continu" et qui permet d'exécuter des réglages préliminaires sans mettre en oeuvre le dispositif cryogénique. ( Alignements, tests de détecteurs et diagnostics, etc... ) .

Pour l'ensemble des **723 heures de fonctionnement** (physique + tests) il a été aisé de calculer un ordre de grandeur de la durée réelle d'application de la RF au quadrupole post- accélérateur : environ **180 heures sur 12 mois** ,conséquence du cycle utile exceptionnellement élevé de ce RFQ <sup>3</sup>. Nous pensons que la modification de l'état de surface des électrodes évoqué plus haut est une "fatigue" liée à la durée de fonctionnement . Nous avons d'ailleurs procédé en cours d'année à un polissage qui a permis de restituer la capacité de tenue en tension .

#### **IV . CARACTERISTIQUES DES FAISCEAUX PRODUITS.**

##### IV. a- Fonctionnement du RFQ en focalisateur.

A la fréquence minimale d'accord de 85,3 MHz, ( vitesse de "synchronisme" : 6,0 keV / u) on peut injecter des faisceaux de vitesse notablement supérieure; la phase ne sera pas convenable pour l'accélération, mais une puissance RF modeste créera un champ électrique permettant la transmission "focalisée" du faisceau incident.

Cette propriété est utilisée avec profit pour les agrégats de masse faible (de 5 à 9); pour ces derniers, l'accélération par le RFQ implique une injection avec une tension du Cockroft de 30 à 54 kV (pour 6 keV/u). Dans cette plage le générateur électrostatique présente de moins bonnes performances et il est plus

---

<sup>2</sup> La 1ère publication de résultats obtenus avec des faisceaux post-accélérés ( expérience Fragmentation ) est en cours d'édition [R6].

<sup>3</sup> Pour comparaison, le RFQ-2 au CERN (qui remplace l'ancien injecteur du P.S. Cockroft- Walton), de dimensions voisines, est alimenté à 202 MHz, sous 250 à 500 kW crête selon l'intensité du faisceau, avec un cycle utile un peu inférieur à 0,001. La puissance thermique n'excède donc pas 0,4 kW et sur 365 jours l'application de la RF ne dépasse pas environ 8 heures .

avantageux d'injecter à 60 keV/u (300 à 540 kV). Le transport s'effectue à travers le RFQ avec une bonne efficacité et en outre la direction du faisceau qui en est issu est la même que lors du fonctionnement "normal" en accélérateur .

La puissance RF nécessaire étant faible ( 1 à 2 kW ), il est possible de fonctionner avec un cycle utile voisin de 100 %; l'intensité transmise est supérieure à celle transmise RF arrêtée et peut être ajustée en variant la puissance RF.

#### IV .b - Fonctionnement du RFQ en accélérateur .

##### *IV.b.1- Plage d'énergie possible .*

La fréquence d'accord minimale est de 85,3 MHz, qui correspond à une énergie de sortie de 60,0 keV/u .

La fréquence d'accord maximale est de 115 MHz, mais ne peut être mise en oeuvre, la plage de réglage de l'amplificateur étant limitée supérieurement à 110 MHz, soit 99,7 keV/u .

Pour les expériences, l'énergie finale a été jusqu'ici maintenue à 60,0 keV/u . Quelques essais ont cependant été réalisés par l'équipe technique vers 96 et 105 MHz lors de l'installation d'une mécanique plus performante pour le positionnement de la boucle de couplage d'entrée . Il est prévu de commencer à fonctionner à une énergie de sortie la plus proche possible de 100 keV/u au début de 1994. L'extrapolation de la courbe de puissance nécessaire (Fig.2) à 60,0 keV/u laisse espérer l'accélération des agrégats de la série 37 à 49 , ce qui correspondrait à une énergie totale voisine de 3 MeV.

L'impédance parallèle de la cavité résonnante baisse lorsque la fréquence d'accord augmente et pour cette raison, une puissance RF supérieure est nécessaire quand on passe pour la même masse de 60 à 100 keV/u . Or l'amplificateur de puissance sature à 80 kW crête (72 à 75 kW est la limite réellement utilisable aux bornes du RFQ en raison de la tension de déchet du circuit de régulation d'amplitude) . Le fonctionnement de 1994 permettra vraisemblablement de vérifier quelle est la masse la plus élevée accélérable à 100 keV/u .

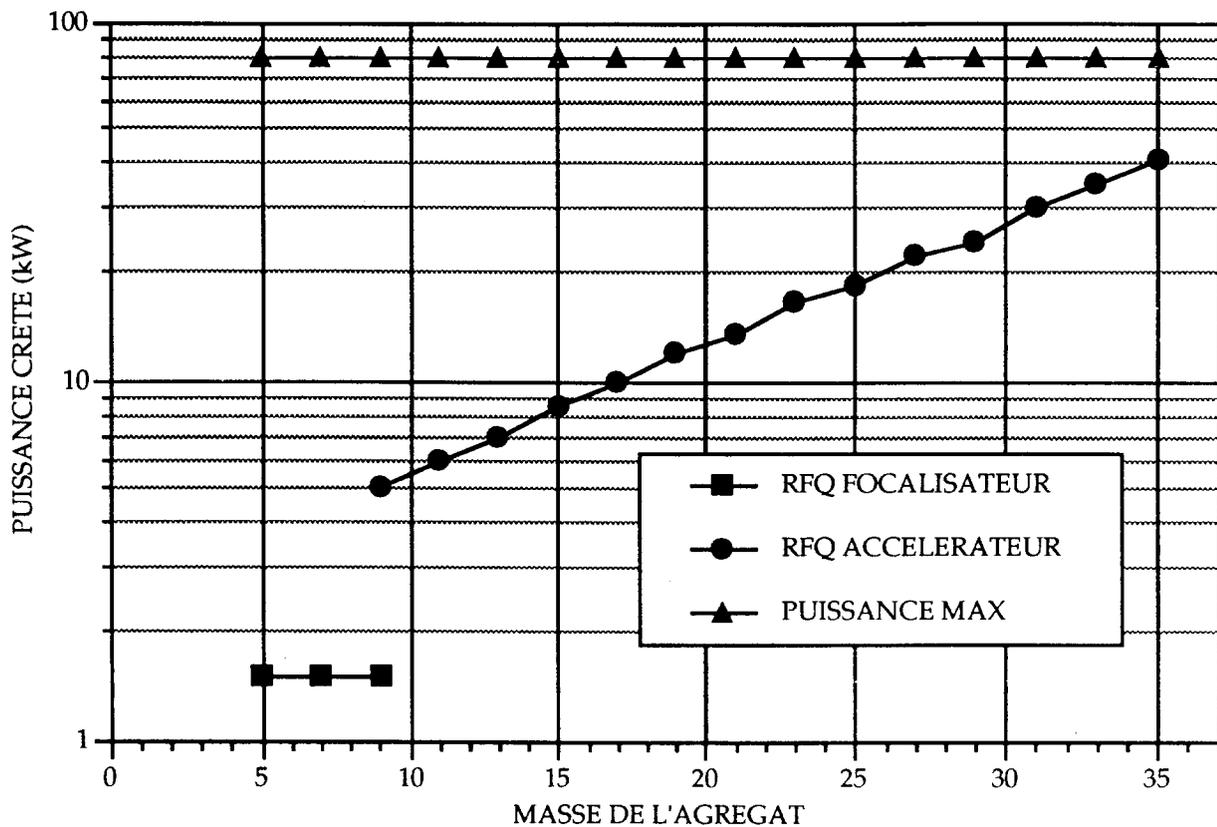


Figure 2 : PUISSANCE RF A 60 keV/u

IV.b.2- Structure temporelle du faisceau .

\* Source.

Le temps actif est réglable de 30 à 150 mS, des valeurs supérieures dégradent la qualité du vide au niveau de la source cryogénique. Le temps de repos est réglable entre 1 et 2 secondes, en fonction de la quantité de gaz injectée .

\* Radiofréquence.

Le temps actif est en général de 0,5 mS., le temps d'arrêt varie en fonction de la masse accélérée (Fig.3) de 0,5 mS à 10 mS.

La puissance crête RF appliquée à la structure croît avec la masse de l'agrégat (Fig.2); pour respecter la limite de puissance thermique moyenne que nous avons fixée ( 3 à 6 kW) selon que l'on est ou non dans une zone de tension entre électrodes présentant des risques de claquages ), le cycle utile de la RF ( rapport de la durée d'une salve d'ondes RF à la durée séparant 2 salves ) est modifié en sens inverse (Fig. 3).

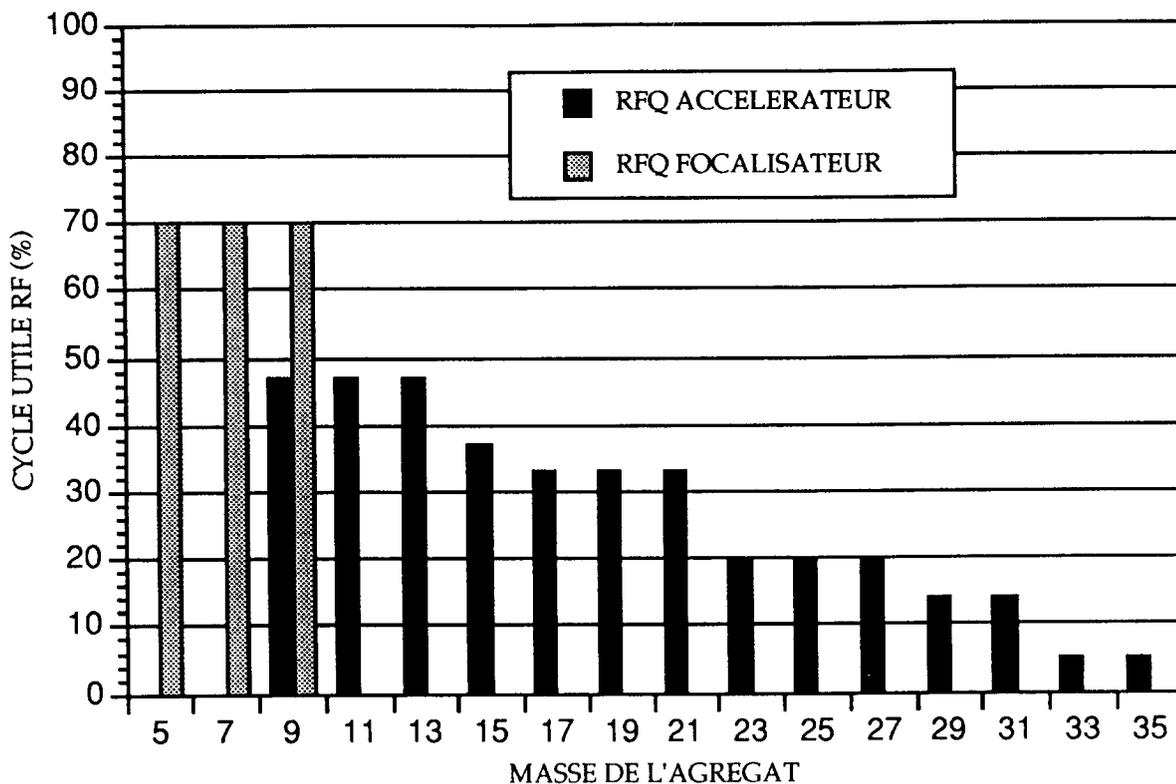


Figure 3 : VARIATION DU CYCLE UTILE RF

#### IV.b.3- Géométrie du faisceau .

Dans le plan de focalisation, le profil du faisceau est un rectangle (petit coté horizontal, grand coté vertical) dont la surface est de l'ordre de 10 à 20 mm<sup>2</sup> . Au voisinage de l'aimant d'analyse, cette surface atteint 1 à 2 cm<sup>2</sup>.

#### IV.b.4- Intensité des faisceaux d'agrégats.

Les mesures de courant effectuées par l'équipe technique ont pour but d'optimiser les réglages du transport *mais ne sont pas organisées pour servir de monitoring aux expériences* .

Les sondes (chambres à fils ou cylindres de Faraday) associées à l'électronique de lecture adaptée (amplis de courant ou Keithley 602) fournissent un signal électrique enregistré sur un oscilloscope à mémoire numérique et archivé dont l'allure générale est conforme à la Fig.4 .On se rapportera à la note LYCEN 9332 [R5] pour déduire l'intensité incidente inconnue des données de l'enregistrement, et des paramètres du circuit de mesure et de la RF.

L'amplitude crête du courant pendant la durée de l'impulsion RF varie en fonction des réglages de source . Dans la pratique, pour les agrégats qui ont été produits jusqu'ici il est courant de mesurer de 1 à plusieurs nanoAmpères

à l'entrée du RFQ et une centaine de picoAmpères en sortie d'analyse Haute Energie .

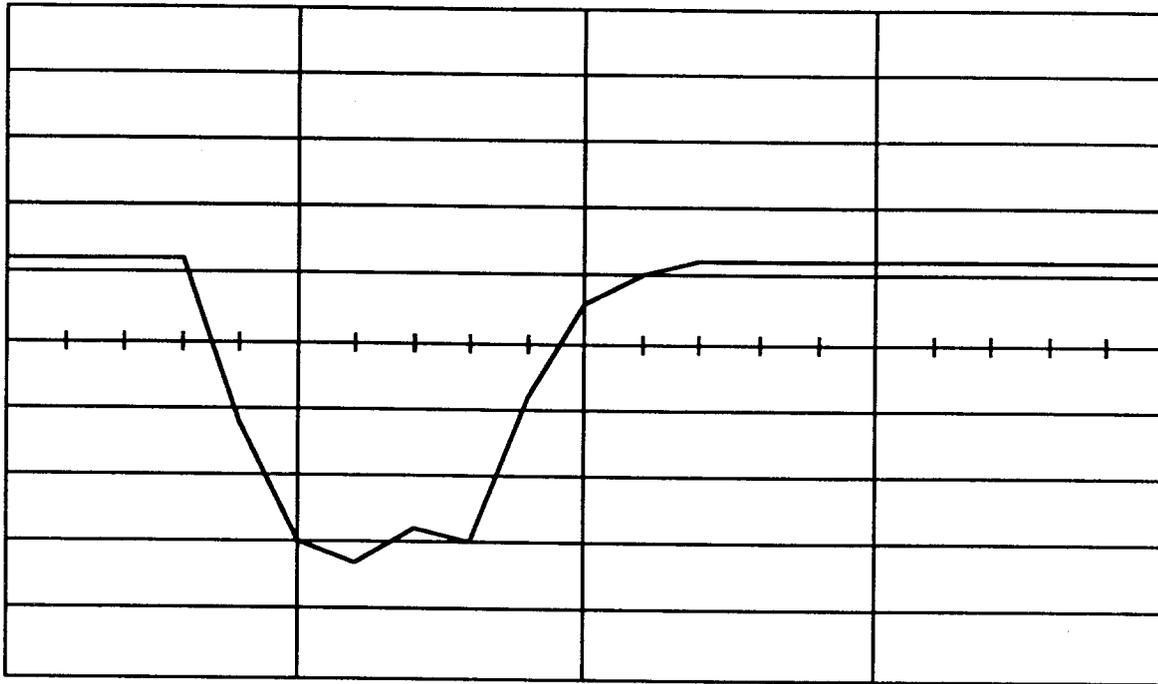


Figure 4 : IMPULSION DE COURANT SUR SCOPE LECROY, FAISCEAU H21+  
(X= 125 mS/car, Y= 0,2 V/car)

## V. CONCLUSION.

L'année 1994 devrait voir la mise en oeuvre de modifications au niveau de la source d'agrégats ( mise en place de cathodes émissives d'un nouveau type dans l'ioniseur) , de la cavité RF (amélioration du vide dans la cuve ), du pilotage des aimants, des mesures permettant d'accéder à l'émittance du faisceau; de nombreux tests restent à exécuter pour compléter notre connaissance de cet ensemble et mener à bien l'optimisation de ses performances, et être ainsi en mesure de fournir aux utilisateurs des conditions de fonctionnement encore améliorées .

Le 10 Décembre 1993.

## REFERENCES

- [1] - A.Schempp, H.Deitinghoff, J.Madlung, U.Bessler, J.Friedrich, J.Dehen, R.Veit, H.O.Moser, G.Hadlinger, M.J.Gaillard, R.Genre, J.Martin  
*Development of a variable energy RFQ for cluster acceleration*  
Proceedings of the 2nd European Particle Accelerator Conference (EPAC 90)  
Editions Frontières
- [2]- M.J.Gaillard, A.Schempp, H.O.Moser, H.Deitinghoff, R.Genre, G.Hadlinger  
A.Kipper, J.Madlung, and J.Martin  
*First high energy hydrogen cluster beams, a new facility at IPN Lyon, France*  
Sixth Int. Symp. on Small Particles and Inorganic Clusters  
ISSPIC 6, Chicago, (1992) Z. Phys. D26 (1993) S 347
- [3]- Compte Rendu du Comité de Projet RFQ du 8 Avril 1992. IPN Lyon
- [4]- Tests des faisceaux d'agrégats haute energie  
Compte Rendu des 4 jours de faisceaux attribués aux Groupes CAS et BIAS.  
26/03/93, IPN Lyon
- [5]- R.Filliol, R.Genre, J.P.Lopez, J.Martin, H.Mathez  
*Méthodes d'évaluation de l'intensité des faisceaux fournis  
par l'accélérateur d'agrégats de l'IPNL*  
LYCEN 9332, Rapport Interne, Juin 1993
- [6]- S.Ouaskit, B.Farizon, M.Farizon, M.J.Gaillard, E.Gerlic  
*Dissociation cross sections of ionic hydrogen clusters by collision  
with helium at 60 keV/amu*  
Phys.Rev.A, 49, 1994

