

Service Accélérateurs

M. Baylac, J.-M. De Conto, O. Doyen (th.), E. Froidefond, M. Fruneau, Y. Gómez-Martínez, M.-L. Lombard, R. Micoud, M. Pétryszyn, M. Planet, J.-C. Ravel.

The group is mainly involved in beam dynamics and radio-frequency aspects of particle accelerators. Beam dynamics activities were recently strengthened within the framework of the European program CARE, where new skills have been developed in the field of high intensity pulsed proton injectors (HIPPI). Contributions in the field of radio frequency are various. The group is responsible for the high power couplers dedicated to the super-conducting cavities of the SPIRAL 2 project, which was recently approved for construction. Side coupled cavities and a high power coupling port are also being designed for intense proton injectors. Approval of the construction of the hadrontherapy facility ETOILE was announced by the French government in May 2005. The accelerator will be built in Lyon. In preparation for it, LPSC implemented collaboration with the Italian center CNAO which is building a very similar structure near Milan. The group is also working with pulsed neutrons. The original generator, GENEPI 1, after a successful coupling with the MASURCA reactor, was removed from Cadarache. The local neutron facility is operated routinely for PEREN experiments. Study of beam dynamics for electron guns within TV sets is carried on for Thomson Tubes and Displays.

◆ SPIRAL 2 : coupleurs de puissance des cavités supraconductrices

Les coupleurs ont pour but de transférer la puissance des amplificateurs radiofréquence (88 MHz pour SPIRAL 2) aux cavités accélératrices. Ce transfert de puissance peut atteindre 12 kW en continu (CW) et par coupleur, ce qui correspond au courant maximum prévu pour SPIRAL 2 (5 mA) compte tenu du gain d'énergie requis par cavité. La seconde fonction des coupleurs est d'assurer l'étanchéité entre le vide de l'accélérateur (vide cryogénique et vide d'isolement) et l'atmosphère. Cette fonction est assurée par une fenêtre en céramique. Le coupleur assume donc un rôle de transition radiofréquence, vide et thermique. La puissance Joule dissipée doit être soigneusement étudiée pour éviter toute surcharge thermique aux cavités supraconductrices.

Des études théoriques (radiofréquence 3D, thermiques et mécaniques) ont été menées et deux géométries ont été considérées : une géométrie avec une céramique cylindrique et une avec une céramique annulaire (dite *disque*), en coopération avec le service d'études et réalisations mécaniques. Un prototype a été construit pour chacune de ces géométries (voir chapitre consacré au SERM). Le LPSC s'est équipé d'un local de nettoyage sous flux laminaire afin d'opérer au montage des coupleurs, ainsi que d'un banc de test radiofréquence pour leur caractérisation individuelle (achat d'un amplificateur 40 kW).

Ces tests servent à mesurer les paramètres RF (transmission et réflexion de puissance) ainsi que la tenue en tension et courant. Une première phase à basse puissance permet de contrôler la présence de multipactor (émission électronique à basse puissance) et de conditionner les coupleurs. Les mesures effectuées sur les prototypes permettront également de définir les procédures à suivre lors de la production des coupleurs de série. Les différents types de tests radiofréquence réalisés sur les deux prototypes sont :

- des tests en ondes stationnaires, en tension et en courant sur chaque coupleur, le coupleur étant terminé dans ce cas, soit par un court circuit, soit par un circuit ouvert ;
- des tests en ondes progressives, en montant les deux prototypes tête-bêche et en terminant le circuit par une charge adaptée 50 ohms de puissance.

Ces mesures sont réalisées à basse et haute puissance, jusqu'à 10 kW CW en ondes stationnaires et jusqu'à 20 kW CW en ondes progressives, soit environ le double de la puissance nominale. Les différentes mesures sont faites grâce au logiciel LabView : puissance incidente, puissance réfléchie, cycle utile, pression et courant dans le détecteur d'électrons. Les deux coupleurs ont

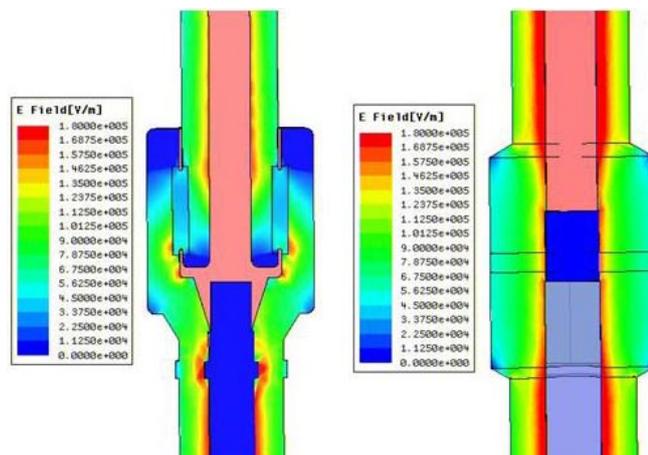


Figure 1 : Champ électrique pour une céramique cylindrique (à gauche) et pour une céramique disque (à droite) pour une puissance incidente 20 kW.

donné satisfaction en ondes stationnaires jusqu'à la puissance maximale et le multipactor a été réduit par conditionnement. Les mesures en ondes progressives sont en cours. Le service électronique et le service d'acquisition de données du laboratoire travaillent actuellement, sur la base des premiers résultats, à l'automatisation du système. La fabrication et le test de trois premiers coupleurs, dits têtes de série, sont prévus pour 2006. Le LPSC assurera ensuite la production d'une série de 35 coupleurs de 2007 à 2009.

À titre d'illustration, nous donnons à la figure 1 la représentation du champ électrique, calculé par éléments finis, qui a permis de définir la géométrie des coupleurs en fonction du type de céramique.

◆ CNAO : Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica

Collaboration CNAO et CERN.

Le CNAO est un centre médical dédié au traitement des tumeurs cancéreuses par faisceaux d'ions carbone accélérés par un synchrotron. Ces faisceaux apparaissent comme l'une des meilleures modalités actuelles de thérapie. Le CNAO est en cours de construction à Pavie, près de Milan. Le ministère français de la santé a approuvé en mai 2005 l'élaboration d'un centre de hadronthérapie près de Lyon : le projet ETOILE (voir chapitre pluridisciplinaire). En attente de la construction d'ETOILE, le LPSC collabore depuis 2004 avec le centre italien, très similaire à l'accélérateur français. Le faisceau d'ions est créé par une source de type ECR (Electron Cyclotron Resonance), mis en forme puis injecté dans un anneau synchrotron. Les ions circulent dans l'anneau où ils sont accélérés jusqu'à une énergie pouvant atteindre 400 MeV par nucléon, avant d'être éjectés pour être transportés vers trois salles de traitement. Le service accélérateur participe en coopération avec le CERN, aux mesures magnétiques des dipôles de l'anneau synchrotron.

L'anneau de l'accélérateur comprend 16 dipôles identiques. Il s'agit d'aimants courbes, de type H à faces parallèles qui délivrent un champ maximum de 1,5 T. Les qualités requises pour le faisceau imposent des contraintes très sévères sur les performances des dipôles : le champ magnétique doit être homogène à mieux que 0,02% et ceci sur une zone très étendue de l'entrefer. Par conséquent, les caractéristiques du champ magnétique doivent être mesurées avec une très grande précision. Un ensemble de 13 bobines a été construit par le CERN pour mesurer le flux du champ magnétique selon différentes trajectoires à l'intérieur de l'aimant. Le service accélérateurs (SA) a réalisé l'étude des erreurs systématiques liées à ce dispositif de mesure. Pour cela, le bobinage expérimental a été simulé pour calculer le flux magnétique intercepté en exploitant les cartes de champ générées par le CNAO via un code de calcul électromagnétique. Dans un premier temps, une grande sensibilité des résultats a été observée en fonction des paramètres du code de calcul. Le SA a effectué des calculs ayant pour but d'estimer l'effet des dimensions des bobines de mesure. L'effet d'un désalignement du fluxmètre à l'intérieur du dipôle a également été analysé. Ces travaux ont validé le niveau de précision requis pour la mesure exploitant ce nouvel appareillage. En revanche, ils ont mis en évidence une inhomogénéité intrinsèque du dipôle excédant les spécifications. Ceci a permis de concevoir et de lancer en fabrication un ensemble de chanfreins adaptés permettant une compensation des variations du champ magnétique à la fois horizontalement et verticalement. En outre, une campagne de mesure du champ magnétique sera menée avec une sonde de Hall. La possibilité d'élaborer un intégrateur a été explorée en vue d'évaluer le champ magnétique dans tout le volume de l'entrefer de l'aimant, à partir de l'ensemble des mesures exécutées uniquement à certaines positions.

Dans l'attente de la construction de ces aimants, le LPSC a entamé des calculs de dynamique longitudinale de faisceau en vue d'élaborer les tolérances sur les paramètres RF de la cavité accélératrice. Pour cela, les pertes en particules dans l'anneau sont simulées lorsqu'une erreur est affectée sur la phase ou sur le voltage appliqué sur la cavité pendant les étapes de capture et d'accélération des ions.

◆ HIPPI : injecteurs à protons pulsés de haute intensité

Collaboration CERN et CEA-Saclay (DSM/DAPNIA/SACM).

La vocation du programme CARE (Coordinated Accelerator Research in Europe) du 6^{ème} PCRD est de promouvoir les activités R&D accélérateurs pour les futurs projets de la physique des hautes énergies. L'activité de recherche associée HIPPI couvre l'un des thèmes majeurs de CARE qu'est le développement des injecteurs de protons pulsés de haute intensité. Le LPSC est impliqué dans deux lots de travaux :

- lot numéro 2 (WP2) : structures accélératrices non supraconductrices ;
- lot numéro 5 (WP5) : dynamique de faisceau et conception d'accélérateurs linéaires.

En outre, le SA assure la coordination du lot de travaux numéro 2 (IAP-Franckfort, CERN, CEA, LPSC, Rutherford Laboratory).

Dans le cadre d'HIPPI, le laboratoire collabore avec le CERN pour les études d'un injecteur futur pour le LHC, LINAC 4, qui doit produire et accélérer un faisceau pulsé de protons de 65 mA (crête) jusqu'à 160 MeV. Sa conception actuelle s'articule en trois étages :

- un ensemble de production, pré-accelération et mise en forme du faisceau (projet IPHI),
- un accélérateur linéaire à 352 MHz, qui amène le faisceau de 3 à 90 MeV,
- un accélérateur linéaire à 704 MHz, pour atteindre 160 MeV.

L'accélération linéaire est réalisée par une structure à tubes de glissement (Drift Tube Linac, ou DTL) de type Alvarez pour la basse énergie, suivie d'une structure à couplage par cellule (CCDTL) plus adaptée à la haute énergie. L'accélération finale à 704 MHz est assurée par une structure à couplage latéral (SCL).

Dynamique de faisceau (work package 5)

En vue de la construction prochaine du DTL, le LPSC a étudié les dégradations induites sur les propriétés du faisceau par des erreurs d'alignement mécanique et des erreurs sur le champ accélérateur de la structure. Les calculs de transport particulaire sont effectués avec le code Tracewin (CEA-Saclay). Les pertes de particules tolérables étant extrêmement faibles (~ 1 W/m), il est indispensable d'effectuer les simulations de transport de faisceau avec une grande précision. Pour cela, un travail préliminaire d'optimisation des paramètres d'utilisation du code a été entrepris dans les conditions de LINAC 4. Ce travail a mis en évidence certains artefacts de la modélisation du faisceau et a défini les paramètres du code à employer pour les calculs de dynamique de faisceau au sein de la collaboration.

Le grossissement de l'émittance du faisceau et la fraction de particules perdues lors du transport dans la structure du DTL ont été simulés pour chaque type d'erreur indépendamment. Ceci a permis de définir les tolérances sur l'alignement mécanique des tubes de glissement ainsi que sur le champ radiofréquence. Des simulations globales pour lesquelles tous les types d'erreurs furent appliqués simultanément sur la structure ont été effectuées pour valider les tolérances individuelles et estimer l'abondance totale de pertes particulaires attendues. Le budget des tolérances ainsi établi a été accepté par la collaboration puis transmis aux partenaires en charge de la fabrication du DTL. En outre, le schéma de focalisation de la structure doit être déterminé. Pour cela, une analyse comparative de trois schémas de focalisation différents a été menée. La sensibilité des paramètres du faisceau a été étudiée pour un DTL utilisant une focalisation de type FODO, de type FFDD et une focalisation hybride (FODO+FFDD). L'analyse finale des résultats est en cours.

Les études d'erreur se poursuivent sur le CCDTL et le SCL en vue d'obtenir les tolérances mécaniques et RF de l'ensemble complet d'accélération linéaire.

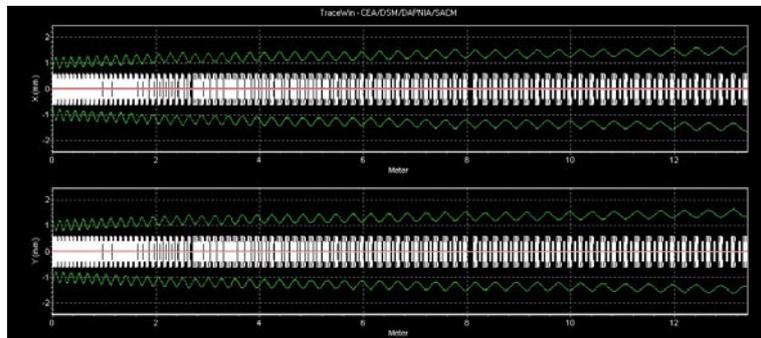


Figure 2: Enveloppe dans la direction x (haut) et y (bas) d'un faisceau pulsé de protons de 65 mA accéléré par le DTL en fonction de la position longitudinale dans le DTL.

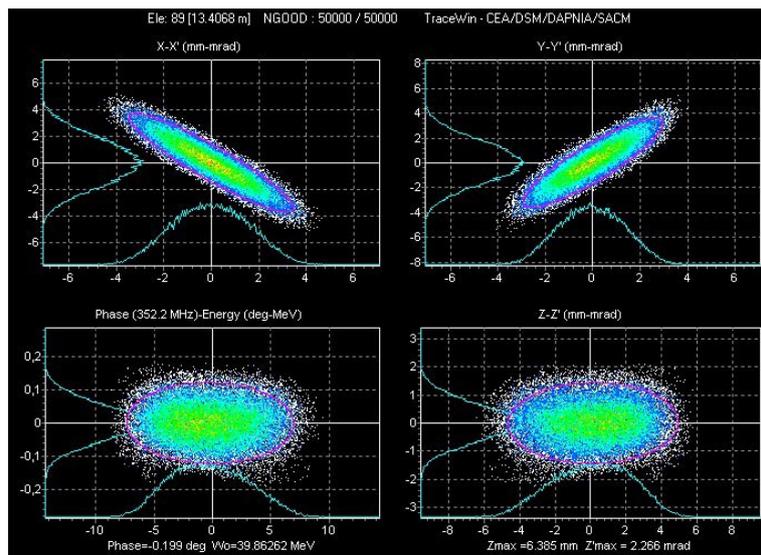


Figure 3: Émittance (longitudinale, transverse) d'un faisceau pulsé de protons de 65 mA en sortie du DTL.

Radio-fréquence (work package 2)

▪ Réalisation d'un port de couplage pour le DTL

Le couplage de la puissance radiofréquence sera effectué par guide d'onde. Sur une conception réalisée par le CEA Saclay, et en relation étroite avec le CERN, le LPSC travaille sur la conception mécanique, thermique et la réalisation de ce système, qui sera constitué d'un guide d'onde demi-hauteur de longueur ajustable. La réalisation est prévue pour 2006.

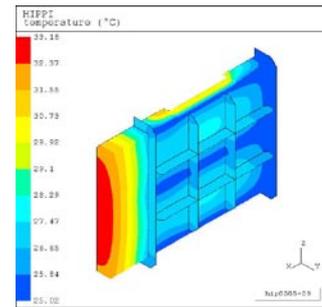
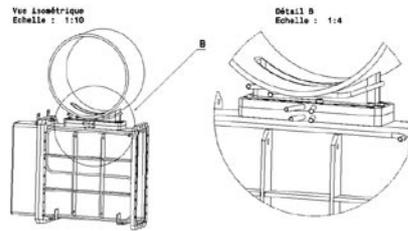


Figure 4: Port de couplage pour le DTL de LINAC 4 (à gauche) et calcul thermique (à droite). L'augmentation maximale de température, avec refroidissement, est de 5 degrés.

▪ Cavités à couplage latéral (SCL)

Dans la gamme 90-160 MeV, la structure dite à cavités à couplage latéral en cuivre massif à 704 MHz est une structure avantageuse pour des faisceaux de protons de cycle utile inférieur à 15%. Les pertes Joule demeurent raisonnables (bonne impédance shunt) et le mode accélérateur présente une sensibilité réduite aux imperfections de réalisation.

Les objectifs de l'étude sont :

- de concevoir les cavités du point de vue radiofréquence, selon un cahier des charges donné (champ, facteur de qualité, fréquence, coefficient de couplage) ;
- de mener les études de thermique pour définir le système de refroidissement ;
- de réaliser une maquette dite *technologique*, à trois cellules, pour des tests d'assemblage et de brasure ;
- de réaliser une maquette aluminium (une dizaine de cellules), pour valider la conception radiofréquence, mesurer les paramètres obtenus et définir les procédures de réglage.

Le premier objectif a été réalisé par une collaboration CERN/LPSC. Des études théoriques complémentaires ont permis de définir les tolérances admissibles pour garantir une bonne uniformité de champ de cavité à cavité. En particulier, un facteur de couplage de 3% a été choisi, qui offre un bon compromis entre facteur de qualité élevé et insensibilité aux défauts.

Les études de thermique et de déformation ont permis de définir un système de refroidissement. Elles ont montré qu'on ne saurait dépasser 15% de cycle utile.

La réalisation du prototype aluminium est prévue au LPSC pour 2006. Le modèle technologique sera réalisé en Russie (collaboration avec l'ISTC).

Les procédures d'ajustement seront effectuées au moyen d'un système perturbatif: une bille diélectrique introduite dans une cavité perturbe la fréquence de résonance de l'ensemble d'une quantité proportionnelle au carré du champ accélérateur. On peut ainsi ajuster le champ au pour cent près. Deux méthodes ont été étudiées: par asservissement de fréquence et par mesure directe à l'analyseur de réseau, sur un banc prototype et un ensemble tri-cellule sommaire.

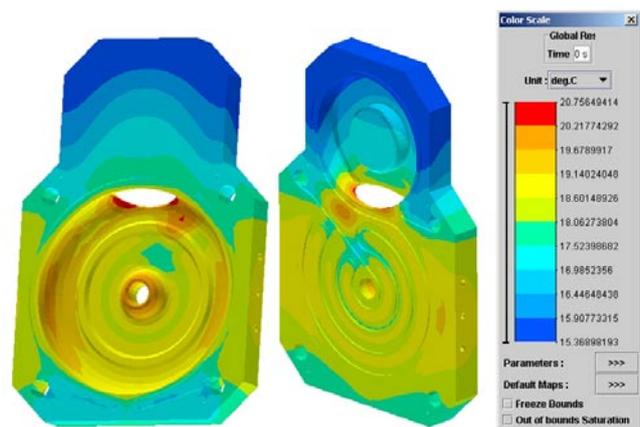


Figure 5: Cavités à couplage latéral. Étude thermique avec refroidissement. À gauche, on voit une cavité accélératrice, à droite une cavité de couplage, communicant par une fente de couplage.

Coordination du lot de travaux numéro 2

Cette activité consiste à organiser les réunions de la collaboration, notamment lors des comités scientifiques, à collecter et synthétiser les rapports d'activité (2 par an) en reportant au coordinateur général d'HIPPI.

En outre, le service accélérateur est responsable du site internet des lots de travaux 2 et 3.

◆ IPHI : réalisation de l'arrêt faisceau

SERM, SA.

Collaboration CEA-Saclay (DSM/DAPNIA/SACM) et IN2P3 (LPSC et IPN-Orsay).

Le LPSC est en charge de la réalisation de l'arrêt faisceau d'IPHI. Cet accélérateur linéaire produira un faisceau de protons de 100 mA CW, accélérés à 3 MeV au moyen d'un RFQ. Les 300 kW du faisceau seront stoppés sur un cône de nickel, ce qui permettra d'étaler la densité de puissance déposée. Ce cône sera refroidi au moyen d'un système de circulation d'eau. Le cône sera lui-même isolé de l'extérieur au moyen d'un blindage en plomb. Le système de refroidissement (*skid*) est en cours de conception et de réalisation.

Le SERM assure la réalisation du bloc d'arrêt faisceau de l'expérience (Figure 6) ayant comme dimensions caractéristiques un diamètre de 250 mm pour une longueur de 2,2 m, de son support, des blindages, des mesures de température et du système de circulation d'eau. La conception a dû répondre à des exigences de performances (puissance à dissiper élevée) et de sécurité (faible activation des matériaux pour laquelle, suite à des essais d'activation sous faisceau, le nickel a été retenu, circuit d'eau pressurisé, etc.).

Le dimensionnement thermomécanique du bloc d'arrêt proprement dit, a été effectué à l'aide de simulations numériques analytiques et en éléments finis. Le SERM a défini la géométrie et les débits d'eau de refroidissement permettant d'obtenir des températures de fonctionnement raisonnables. La tenue mécanique de l'ensemble a été validée.

Cet ensemble est en phase de fabrication sur décembre 2005 - janvier 2006.

Il sera installé à Saclay en milieu d'année 2006, puis transféré au CERN.

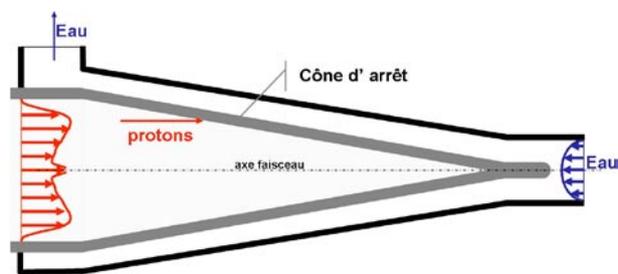


Figure 6 : Bloc d'arrêt faisceau de l'expérience IPHI.

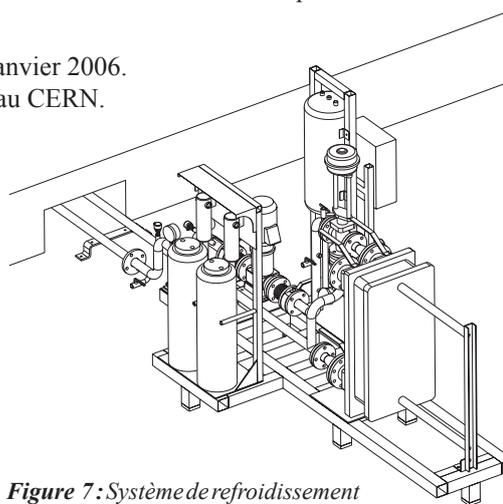


Figure 7 : Système de refroidissement du bloc d'arrêt faisceau IPHI.

◆ GENEPI

GENEPI 2 est un générateur de neutrons basé sur l'accélération d'un faisceau pulsé de deutons d'énergie 250 keV. L'utilisation d'un duoplasmatron commandé comme un thyatron permet de réaliser des impulsions courtes, d'environ 500 ns, pour des courant pics de 50 mA environ.

GENEPI 2 est motivé et utilisé par la plateforme PEREN destinée à l'étude de solutions nucléaires innovantes (voir chapitre pluridisciplinaire). L'accélérateur fonctionne de manière routinière au LPSC.

◆ Collaboration avec « Thomson Tubes and Displays »

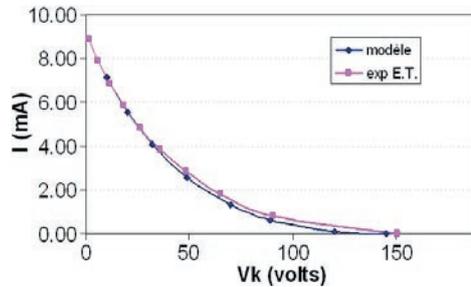
Une thèse CIFRE a été entreprise au LPSC pour le compte de Thomson Tubes and Displays (Genlis, France). Son objectif est de modéliser et de comprendre finement la physique des faisceaux d'électrons dans les canons de tubes de télévision. Les résultats innovants obtenus sont les suivants :

- la mesure des caractéristiques des faisceaux (émittance) par des procédés connus en physique des accélérateurs, mais nouveaux pour la télévision (méthode des trois gradients) ;
- le développement d'un modèle semi-analytique qui permet de reproduire les courbes caractéristiques

courant/tension des canons, avec une précision meilleure que les codes particuliers dont dispose l'industriel, et qui restent des *boîtes noires* ;

- le développement d'un modèle analytique de la formation du faisceau, qui fait apparaître les paramètres essentiels définissant le faisceau initial, comme le champ pic sur la cathode ou encore la zone émissive, et qui permet de trouver l'émittance initiale des électrons. Il a été montré, par exemple, que l'énergie initiale (thermique) des électrons, avait un effet négligeable sur l'émittance native du faisceau, comparé aux non-linéarités locales, et naturelles, du champ.

Figure 8 : Courbe de courant-tension caractéristique d'un canon à électrons. Comparaison expérience versus modèle théorique.



GENEPI 2 – PEREN

