

IPNO 02-01

Rapport scientifique et technique du projet ALTO

Comité de rédaction du projet ALTO :

S. Essabaa, D. Gardès, D. Grialou, F. Ibrahim,

J-C. Le Scornet

CERN LIBRARIES, GENEVA

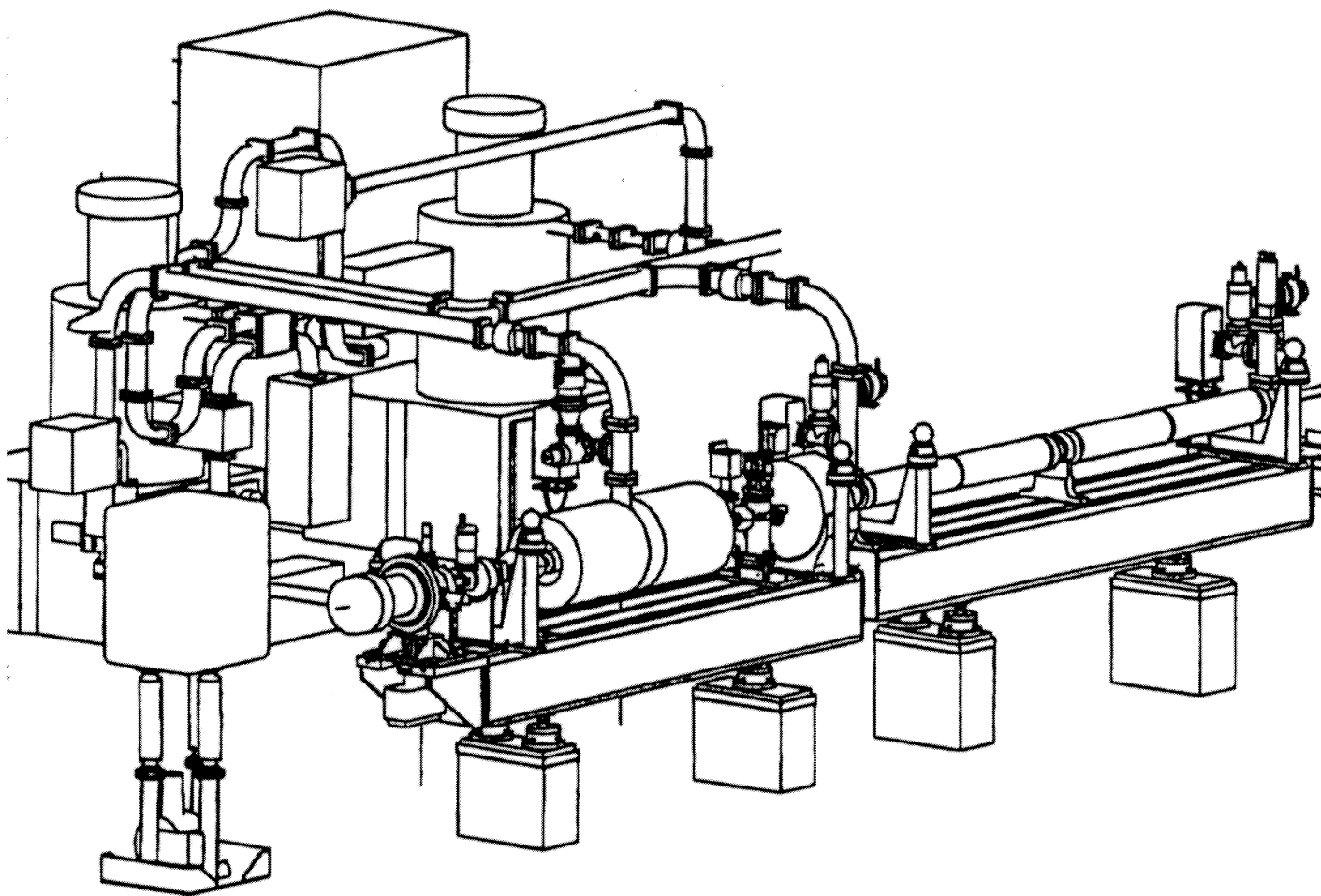


CM-P00045836

RAPPORT SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

ALTO

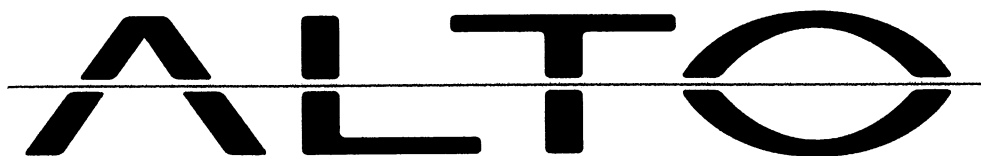
Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay



RAPPORT SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE

PROJET SCIENTIFIQUE

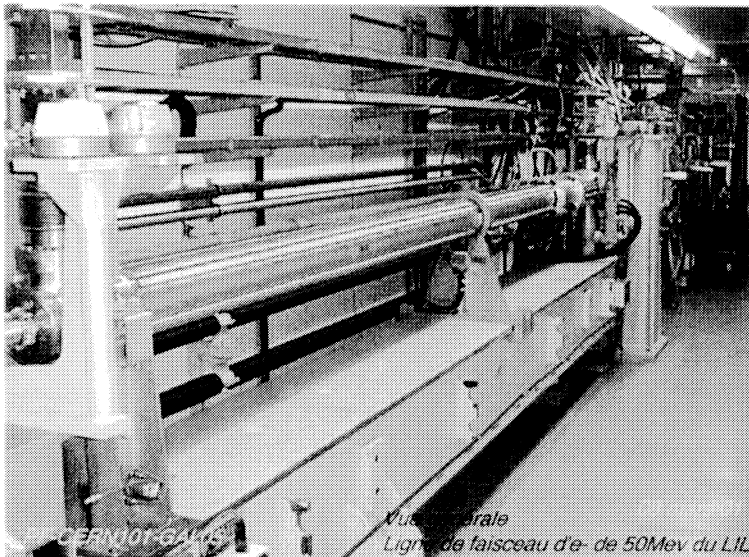
<i>Description du projet</i>	.....	<i>page 2</i>
1. Objectifs et conséquences attendus	.....	<i>page 3</i>
2. Situation actuelle du sujet de recherche au plan national et international	.....	<i>page 4</i>
3. Programme des recherches		
<i>En physique nucléaire</i>	.....	<i>page 6</i>
<i>En biochimie</i>	.....	<i>page 9</i>
4. Nom et composition des différentes équipes impliquées dans le projet	.....	<i>page 11</i>
5. Liens avec d'autres projets de R&D	.....	<i>page 12</i>
6. Collaborations extérieures	.....	<i>page 13</i>
7. Analyse du parc régional, national ou international de ce type d'équipement	.....	<i>page 14</i>
8. Moyens de fonctionnement affectés à l'équipement	.....	<i>page 16</i>
9. Intérêt du projet sur les plans industriels, économique, social et au plan régional	.....	<i>page 16</i>
10. Impact économique et social au niveau régional	.....	<i>page 19</i>
11. Implication dans la formation par la recherche	.....	<i>page 20</i>
12. Coût total du projet	.....	<i>page 21</i>
13. Type de matériels à acquérir	.....	<i>page 21</i>
14. Plan de financement	.....	<i>page 22</i>



Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay

Description du projet

Il s'agit d'implanter un accélérateur linéaire d'électrons de 50 MeV dans les aires expérimentales du Tandem, accélérateur en fonctionnement à l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay. Cet accélérateur est pour l'essentiel la tête de la machine LIL : pré-injecteur du LEP (CERN). Il a été récemment utilisé par une équipe de l'IPN pour réaliser une expérience¹ de **photofission** pour la production de faisceaux d'ions très riches en neutrons. De tels faisceaux sont fortement demandés dans les domaines de l'astrophysique nucléaire et de la structure des noyaux. Les instances scientifiques du CERN, sollicitées par de nombreux laboratoires internationaux, impressionnées par les résultats de cette expérience, ont décidé de céder cet accélérateur à l'IPN (voir courrier CERN du 18 juillet 2001 en Annexe 3) suite à l'arrêt du LEP.



Vue générale :
Ligne de faisceau de l'accélérateur
d'électrons de 50 MeV du LIL

Cet accélérateur linéaire vient s'intégrer à un ensemble expérimental existant, le Tandem d'Orsay, pour lequel il apporte une complémentarité et de nouvelles perspectives d'ouvertures **pluridisciplinaires**. Le Tandem d'Orsay est un accélérateur électrostatique de 15 Mégavolts de tension nominale, ce qui en fait un des leaders mondiaux pour ce genre de machine. Depuis quelques années, des développements originaux sur de nouveaux faisceaux (agrégats massiques par exemple), et une politique volontariste de diversification des utilisateurs du Tandem a permis d'ouvrir la machine à de nouveaux partenaires de recherche. Le comité d'expérience actuel qui sélectionne et répartit les temps de faisceau est le lieu de rencontre de chimistes, de biologistes, d'astrophysiciens, de métallurgistes, d'industriels, etc. En 2001 la répartition entre les domaines de R&D et applications industrielles, la physique nucléaire et les autres disciplines était une répartition par tiers. (voir annexe 2)

Avec l'opportunité qui nous est offerte d'implanter un accélérateur linéaire d'électrons, nous réalisons non seulement un outil incomparable pour la R&D de futurs faisceaux de noyaux exotiques, mais aussi un appareillage qui vient compléter la gamme des applications et conforter la politique d'ouverture pluridisciplinaire du Tandem d'Orsay. Un accélérateur d'électrons pulsé à haute énergie, et surtout à haute intensité, peut être intéressant pour des études de cinétique rapide dans un domaine différent à celui de l'accélérateur ELYSE. La résolution en temps ne sera pas compétitive avec celle d'ELYSE (picoseconde), mais suffisante (μ s) pour des productions de radicaux libres en milieu aqueux ou gazeux. Les électrons haute énergie apportent des dépôts à faible dE/dx bien localisés (LET faibles). Cette radiolyse pulsée s'effectue

¹ F. Ibrahim et al. Photo-fission for the production of radioactive beams : experimental data from an on-line measurement, parution prochaine dans EPJ.

actuellement à partir de source gamma intense ou sur des accélérateurs dédiés tel le Linac 10 MeV de Saclay qui a pris la relève de l'ancien Febetron de 2 MeV.

1. Objectifs et conséquences attendus :

Trois objectifs sont directement visés :

- En recherche fondamentale, via la photo-fission, il s'agit de tester notre compréhension de la matière nucléaire et sa validité lorsque cette dernière est poussée dans des états « extrêmes » ;
- En R&D accélérateurs, il s'agit, sous faisceau, de disposer de banc d'essais pour de nouvelles structures Haute fréquence et supraconductrices, diagnostics, et détecteurs dont les développements sont en compétition dans plusieurs laboratoires européens et mondiaux, et tendent vers des ensembles expérimentaux de plus en plus complexes ;
- En applications pour la recherche et l'industrie, selon ces axes :
 - la biochimie sous rayonnement ionisant (étude des mécanismes mis en jeu dans les maladies dites du « stress oxydant », cancer, SIDA, vieillissement...);
 - l'irradiation de protéines à l'état solide (stérilisation des aliments, des épices et des médicaments ; étude de l'influence du débit de dose sur la radiosensibilité des solides ;
 - cassure d'ADN : rôle des rayonnements (études des systèmes biologiques sous irradiations parallèles rayons X et faisceaux d'électrons...);
 - les irradiations de composants électroniques – durcissement (simulation des conditions spatiales ou d'environnements irradiés...).

Dans un environnement régional très affecté par la diminution et l'obsolescence de son parc d'accélérateurs de recherche², ce projet aura pour conséquence immédiate de maintenir et développer un patrimoine francilien unique³ de savoir-faire et de compétences à l'interface recherche/procédés et méthodes industrielles, où son caractère fédérateur permettra :

- l'accès à un outil expérimental novateur, aux équipes de recherche franciliennes du CNRS (IPNO et LAL), du CEA et de l'Université Paris XI notamment;
- de développer à la fois les synergies de recherches interdisciplinaires, en physique et chimie des matériaux, avec l'Interface Physique Biologie (IPB) dont s'honore notre Institut, et avec le pôle technologique qui, autour des Divisions Accélérateurs du LAL et de l'IPN, est l'un des tout premiers européens en la matière.

² L'IPN quant à lui ne dispose plus que d'un seul des trois accélérateurs en activité dans les années 1980, avec une perte correspondante d'une centaine d'emplois (notamment d'ITA).

³ C'est ce patrimoine du LAL et de l'IPN, notamment en matière de cryogénie, qui a permis à la France de négocier avec le CERN sa contribution spécifique pour la construction du LHC, sous la forme de conventions hommes/an.

2. Situation actuelle du sujet de recherche au plan national et international :

L'étude des noyaux loin de la stabilité est constitutive de l'histoire de la physique nucléaire dès son origine, et connaît un essor considérable. Etudier ces noyaux, c'est se donner la chance d'accéder à des informations nouvelles sur la structure nucléaire et ainsi mesurer la solidité de notre conception de la matière nucléaire et sa validité lorsque cette dernière est poussée dans des états "extrêmes".

La production de noyaux exotiques s'est avérée un défi permanent dans la poursuite de leur étude. Ces difficultés ont laissé une grande part des noyaux riches en neutrons dans l'inconnu. Afin d'accéder à ce potentiel intact de découvertes, il est nécessaire de produire ces noyaux en grande quantité et sous la forme de faisceaux accélérés. Les problèmes que soulèvent la mise en œuvre de tels faisceaux suscitent à l'heure actuelle un énorme effort de réflexion et de mise au point technique de la part de la communauté mondiale.

Le programme PARRNe (Production d'Atomes Radioactifs Riches en Neutrons), initié et conduit par l'IPN, représente une contribution concrète à cet effort dans le cadre du projet SPIRAL 2 au GANIL⁴. Ce programme a pour objectif la détermination des conditions optimales de production des noyaux riches en neutrons à partir de la fission de l'uranium 238.

L'optimisation des conditions de production passe par celles des conditions d'extraction et d'ionisation des produits de fission mais également par l'optimisation des conditions de la fission et plus particulièrement par le choix du mécanisme induisant cette fission.

Fission induite par neutrons rapides :

Dans un premier temps, la fission induite par neutrons rapides a été étudiée. Les neutrons rapides sont obtenus en arrêtant un faisceau de deutons dans un convertisseur. La recherche de l'énergie optimale des deutons s'est faite, grâce au dispositif expérimental PARRNe 1, au Tandem d'Orsay (20 MeV), à Louvain la Neuve⁵ (50 MeV) et à KVI auprès d'AGOR⁶ (80 et 130 MeV). Ce dispositif permet de déterminer de manière relative l'efficacité de la réaction de fission en mesurant l'activité des gaz rares radioactifs (Kr et Xe) produits par la fission en les piégeant sur un doigt froid situé à 8 m de la cible. Ces mesures ont montré qu'une énergie de 100 MeV en deutons constituerait un optimum pour la production.

La force des expériences PARRNe 1 est leur portabilité qui permet d'effectuer ces mesures dans des conditions identiques auprès de différents accélérateurs.

Photofission :

Récemment, une deuxième méthode de production de fragments de fission a été étudiée. Un faisceau d'électrons est ralenti dans un convertisseur ou directement dans la cible, produisant ainsi un rayonnement de freinage induisant à son tour la fission. La section efficace de photo-fission est de l'ordre de 0.16 barn (contre 1.6 barn pour des neutrons rapides de 40 MeV) mais l'efficacité de conversion électrons/gammas est beaucoup plus importante que celle deutons/neutrons. Il était alors nécessaire, pour tester cette nouvelle méthode de production, d'effectuer, dans les mêmes conditions expérimentales, une expérience de type PARRNe 1 utilisant un faisceau d'électrons.

Nous avons donc installé très récemment (Avril 2001) le système expérimental PARRNe 1 auprès du LIL, l'injecteur du LEP au CERN⁷. Le faisceau d'électrons de 50 MeV fourni par cet injecteur nous a permis de tester la production des gaz rares par photofission dans les mêmes conditions que lors des expériences précédentes. Les résultats obtenus montrent de manière non ambiguë que l'option électrons est comparable au niveau de la production avec l'option deutons (figure 1). Le coût, plus faible, d'un

⁴ GANIL, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, CEA/IN2P3, Caen.

⁵ UCL, Université Catholique de Louvain, Place de l'université 1, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

⁶ KVI, Kernfysisch Versneller Instituut, AGOR, Zernkelaan 25, 9747 AA Groningen, Pays-Bas.

⁷ CERN, Centre Européen de Recherches Nucléaires, Genève, Suisse.

3. Programme des recherches :

En physique nucléaire :

Dans le cadre de la réflexion sur le futur du GANIL, deux options sont envisagées pour SPIRAL 2, l'une incluant des deutons (neutrons rapides) l'autre des électrons (photofission). L'étude concernant les deutons est actuellement bien avancée grâce au programme PARRNe. Il serait très important d'effectuer une étude similaire avec un faisceau d'électrons de 50 MeV.

La disponibilité d'un faisceau d'électrons au Tandem d'Orsay permettrait d'étudier l'ensemble des isotopes produits par photofission. L'une des questions fondamentales concernant les différentes méthodes de production réside dans le choix d'une fission à haute ou basse énergie d'excitation. La fission induite par neutrons rapides favorise une distribution symétrique des fragments alors qu'une fission plus "froide" présente deux bosses bien distinctes centrées autour du Rb et Cs. L'utilisation d'une méthode de production de type ISOL restreint cependant considérablement l'avantage de la fission symétrique du fait du caractère réfractaire de la plupart des éléments de la "vallée". Pour ce qui est de la fission très asymétrique, qui donne accès à des régions particulièrement intéressantes (région N=50 du ^{78}Ni), celle-ci est globalement favorisée par une fission à haute énergie d'excitation. Cependant, du fait de cette énergie élevée, l'évaporation de neutrons est alors importante, ramenant ces éléments produits vers la vallée de stabilité, au détriment des noyaux les plus exotiques.

Une étude approfondie de la production de ces noyaux les plus exotiques par photofission est donc fondamentale. Le dispositif PARRNe 2 au Tandem constitue l'instrument idéal pour cette étude. Dans ce but, une demande a été faite auprès du CERN afin de récupérer dans le cadre du démantèlement du LEP, la première section accélératrice utilisée pour l'expérience PARRNe 1. La disponibilité d'un faisceau d'électrons de 50 MeV au Tandem d'Orsay permettrait ainsi de disposer d'un banc d'essai complet pour SPIRAL 2. L'intensité étant limitée à 10 μA dans le cadre d'ALTO, nous ne rencontrerons pas les problèmes liés à la puissance du faisceau prévu pour SPIRAL II.

Une telle installation permettra d'augmenter de manière considérable la production des fragments de fissions produits à PARRNe ouvrant ainsi de nouvelles voies d'études à basse énergie pour les noyaux exotiques riches en neutrons.

En effet, le fait d'utiliser des électrons frappant directement la cible de carbure d'uranium permet un gain dans les productions d'un facteur 2.5 par rapport à l'utilisation de deutons de 80 MeV (figure 1). De plus, grâce aux expériences PARRNe 1, nous savons que le gain en production entre des deutons de 26 MeV (Tandem d'Orsay) et des deutons de 80 MeV (KVI) est d'un facteur 10. De plus, le Tandem peut fournir au maximum une intensité de 1 μA de deutons de 26 MeV alors que l'accélérateur d'électrons pourra fournir 5 μA de faisceau à 50 MeV. Le gain en production par rapport à l'installation existante sera alors d'un facteur 125 ce qui permettra de disposer de $4,4 \cdot 10^7$ ^{132}Sn /s au Tandem d'Orsay (contre $3,0 \cdot 10^7$ ^{132}Sn / μC à ISOLDE) et de $2,5 \cdot 10^5$ ^{78}Zn /s (contre $4,0 \cdot 10^5$ ^{78}Zn / μC à ISOLDE).

De telles productions permettent d'envisager des études de structure nucléaire par décroissance β ainsi que des études des propriétés des états fondamentaux pour les noyaux exotiques riches en neutrons produits. Plusieurs régions d'intérêt deviennent alors accessibles impliquant des thématiques et des techniques expérimentales très diverses :

- *Etude de l'évolution de la magie pour les noyaux proches du noyau doublement magique ^{78}Ni sur N=50. (F. Ibrahim IPN Orsay)*

Cette région est particulièrement intéressante pour tester la magie de la couche N=50 loin de la stabilité. En effet, le caractère doublement magique de la région de ^{132}Sn est désormais bien établi tant par les études de structure nucléaire que par les mesures de rayon carré moyen de

charge. D'un autre côté, le rapport $A/Z=2,79$ du ^{78}Ni classe ce noyau dans la catégorie supérieure en terme d'exotécité par rapport à ^{132}Sn qui compte un rapport A/Z de 2,64. Une façon (indirecte) de tester le caractère doublement magique du ^{78}Ni consiste à étudier la structure à basse énergie des noyaux situés le long et autour de $N=50$ lorsque l'on s'éloigne de la vallée de stabilité en direction de $Z=28$. Cette thématique a déjà démarré auprès du Tandem d'Orsay sur l'installation PARRNe en utilisant le faisceau de deutons de 26 MeV. Des résultats très intéressants sur la décroissances des Ga très riches en neutrons ont d'ores et déjà été obtenus donnant des informations très intéressantes sur le passage de la couche $N=50$ pour les noyaux de Ge . L'installation d'un accélérateur d'électrons au Tandem permettra d'augmenter d'un facteur 100 les productions et ainsi d'aller bien plus loin dans cette étude, et en particulier d'accéder à la position du premier état excité 2^+ de ^{80}Zn , qui est le dernier noyau pair - pair sur $N=50$ avant ^{78}Ni .

- **Voyage en "terra incognita" : au nord et nord-ouest de ^{78}Ni ... (M. G. Porquet CSNSM Orsay)**

La spectrométrie gamma prompte des fragments de fission s'est avérée un moyen puissant d'étude de la structure de noyaux riches en neutrons, que ce soit par fission spontanée de $^{248}\text{Cm}/^{252}\text{Cf}$ (abondamment étudiée auprès d'Eurogam/Euroball ou Gammasphere) ou par fission induite par ions lourds (le groupe de M. G. Porquet du CSNSM a réalisé plusieurs mesures ces dernières années). La photofission de ^{238}U nous donne accès à un nouveau domaine de noyaux exotiques, celui situé au nord/nord-ouest de ^{78}Ni . Auprès d'ALTO, des états excités jusqu'à des spins de 10-14 hbar pourront, pour la première fois, être identifiés dans ces noyaux, en mesurant les gammas de désexcitation des fragments de fission. Pour cela, un ensemble de détecteurs Ge doit entourer la cible de ^{238}U dont l'épaisseur doit être « soigneusement » choisie pour satisfaire plusieurs impératifs.

- **Mesures de périodes et de décroissances β -n pour le processus r. (O. Sorlin IPN Orsay, S. Grevy LPC Caen)**

Les noyaux magiques riches en neutrons sont ceux qui survivent le mieux aux conditions extrêmes de température et de densité de neutrons qui règnent au cœur des supernovae. Lors de l'explosion de ces étoiles, les captures de neutrons successives se développent rapidement et atteignent les fermetures de couches majeurs en quelques ms. Au delà, l'énergie de séparation de neutron chute fortement, et les noyaux sont photo-désintégrés sitôt qu'ils sont créés. Il s'établit alors un équilibre entre capture de neutrons et photo-désintégration induisant ainsi une attente du processus de nucléosynthèse et par conséquence une accumulation de « géniteurs » de noyaux stables responsables des pics d'abondance r. Au niveau de ces fermetures de couches les durées de vie β sont importantes puisqu'elles déterminent combien de temps on accumule et avec quelle vitesse on déplace cet équilibre vers la chaîne isotopique immédiatement supérieure. Le flux global de nucléosynthèse se déplace vers les Z supérieurs jusqu'au moment où la capture neutron devient compétitive. Alors les σ_n permettent de savoir si ce flux de neutrons peut aller au delà de cette fermeture de couche et détermine le taux de fuite vers la couche neutrons supérieure. Afin de déterminer es taux de capture de neutrons, il faut connaître les niveaux d'énergie, les spins... de ces noyaux au voisinage des fermetures de couches. Ces informations peuvent être obtenues en partie par des études de décroissance β -n. De telles études, ainsi que des mesures de périodes peuvent être menées auprès de l'installation ALTO.

- **Etude des états fondamentaux des noyaux exotiques par spectroscopie laser (F. Le Blanc IPN Orsay)**

La spectroscopie laser permet de sonder les électrons présents dans la matière nucléaire et permettre de déterminer la forme du noyau atomique. Ceci est particulièrement intéressant sur des isotopes très exotiques c'est-à-dire situés loin de la vallée de stabilité. Le noyau se comporte alors bizarrement et change parfois radicalement de forme quand on lui enlève ou quand on lui rajoute seulement un neutron. Les résultats obtenus sont d'une précision telle qu'ils constituent un test sévère des modèles nucléaires et en particulier de l'interaction effective nucléon-nucléon. Dans un atome, l'interaction du cortège électronique avec le noyau provoque ce qu'on appelle la structure hyperfine : tous les niveaux d'énergie atomiques se scindent en plusieurs sous-niveaux. Grâce à un faisceau laser judicieusement choisi, on sonde ceux-ci et on reconstitue un spectre hyperfin d'où on extrait plusieurs paramètres d'interaction électron-noyau. Chacun se décompose en une partie électronique et une partie nucléaire. De cette dernière, on accède à des grandeurs reliées à la forme du noyau : la variation du rayon de charge et le moment quadrupolaire. Les productions attendues auprès d'ALTO rendent possible l'installation d'un système de spectroscopie laser colinéaire. Cette méthode permet d'obtenir une très bonne résolution sur le spectre hyperfin mesuré. Des mesures sur la chaîne isotopique des Ge proches de N=50 ainsi que sur la chaîne isotopique des Ag très riches en neutrons sont possibles avec ALTO.

- **Expériences avec des cibles radioactives au Split-pole . (S. Fortier IPN Orsay)**

Le spectromètre magnétique SPLIT-POLE est utilisé pour étudier les réactions directes (diffusion élastique et inélastique, transferts de nucléons et échanges de charges) induites par les faisceaux d'ions légers du Tandem d'Orsay. La mesure des spectres d'énergie et des sections efficaces apporte des informations fondamentales sur les propriétés des différents états du noyau final (spin et parité, facteur spectroscopique) à comparer aux prédictions des modèles de structure nucléaire. Ce type d'expérience est également une source irremplaçable de données nucléaires utilisables en astrophysique pour les calculs de nucléosynthèse.

L'installation ALTO à Orsay permet d'envisager la création et l'accumulation de noyaux radioactifs à vie relativement longues ($T > 10^4$ jours) pouvant être utilisés ensuite comme cible dans des expériences sur le Tandem. Un dépôt d'au minimum quelques 10^{14} - 10^{15} atomes sur un support de carbone mince, concentrés sur le point d'impact du faisceau du Tandem (2 mm^2), est nécessaire pour l'étude de réactions nucléaires, comme l'ont montré les expériences réalisées précédemment au Split-pole avec des cibles de $^{178}\text{Hf}^{m2}$ ($T=31$ ans) et de ^7Be ($T=53$ jours). Les calculs de taux de production sur ALTO permettent en particulier d'envisager la fabrication de cibles radioactives listées ci-dessous, ouvrant des perspectives nouvelles notamment pour l'étude des fermetures de couches 38, 40 50 par réactions de transfert de nucléons

Liste (non exhaustive) de cibles potentiellement intéressantes :

^{126}Sn : la suite de la chaîne des étains (stables de 116 à 124)

^{127}Te ($Z=52$) 109 jours ($J^\pi=11/2^-$)

^{90}Sr $T=28$ ans

^{89}Sr $T=50$ jours

^{91}Y $T=58$ jours etc ...

▪ **Mesure de masse à ALTO. (D. Lunney CSNSM Orsay)**

La mécanique quantique et les forces qui agissent entre protons et neutrons déterminent l'énergie de liaison d'un nucléide dans son état fondamental, et par conséquent sa masse.

Le but de l'équipe "Masses Atomiques" du CSNSM est de

- * mesurer ces masses,*
- * étudier les variations de ces masses en fonction des nombres de neutrons et de protons,*
- * modéliser ces variations et tenter de remonter aux forces en question.*

L'installation ALTO devrait permettre de déterminer de manière précise des masses atomique de noyaux de très courtes durée de vie ($T_{1/2} < 1$ s). Ces masses doivent permettre de tester les modèles de la structure nucléaire et les formules de masse loin de la stabilité. Ces tests doivent permettre de déterminer les modèles les plus réalistes et de les améliorer en particulier loin de la stabilité, là où les masses sont essentielles pour les modèles de l'évolution stellaire.

- *A cela s'ajoute d'autres régions d'un très grand intérêt du point de vue de la structure nucléaire et en particulier, les deux régions de déformations quadrupolaires proches de $A=100$, $N=60$ pour les fragments légers et proches de $A=150$, $N=90$ pour les fragments lourds, ainsi que les deux régions de déformation ou de vibration octupolaires proches de $Z=34$, $N=56$ pour les fragments légers et de $Z=56$, $N=90$ pour les fragments lourds.*

En biochimie :

Biochimie sous rayonnement ionisant :

Les buts sont multiples ; tout d'abord, il s'agit de préciser les mécanismes permettant d'expliquer la très grande sensibilité de l'être vivant au rayonnement ionisant. Mais le rayonnement ionisant est également un outil pour l'étude des mécanismes mis en jeu dans les maladies dites du « stress oxydant », au cours desquels les radicaux libres oxydants sont produits. Ces radicaux libres, par leurs réactions rapides avec les protéines, l'ADN, les lipides, sont à l'origine de tous les phénomènes inflammatoires et notamment de ceux qui accompagnent le cancer, le SIDA et également du vieillissement⁸.

Un accélérateur d'électrons pulsé à haute énergie permet de créer les radicaux libres in situ en solution et de suivre leur évolution temporelle (spectroscopie). Ce sont des expériences dites de cinétique rapide à l'échelle de la μ s. On peut ainsi essayer de varier les propriétés redox d'une protéine en créant des « mutants » et ainsi isoler les rôles des différents acides aminés qui la compose.

⁸ C. Houée-Levin, C. Sicard-Roselli, S. Droniou ; Laboratoire de Chimie Physique UMR 8000 Centre Universitaire, 91405 Orsay.

Irradiation de protéines à l'état solide :

La stérilisation des aliments, des épices et des médicaments par le rayonnement ionisant est une méthode qui se développe actuellement pour les raisons suivantes :

- *C'est une méthode sûre qui peut être utilisée sur le produit fini et conditionné, comme les poudres injectables.*
- *On évite l'emploi d'additifs toxiques (oxyde d'éthylène), donc cette méthode a l'aval des écologistes*
- *La technologie des accélérateurs industriels s'est fortement développée et on dispose d'accélérateurs permettant de délivrer les doses nécessaires (de l'ordre de 1-30 kGy) en un temps bref compatible avec une irradiation en chaîne. De plus, l'énergie élevée des électrons (50 MeV max) leur assure un bon pouvoir de pénétration.*

En ce qui concerne les médicaments, le cahier des charges est important. En effet, l'Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) n'est accordée qu'au vu d'études analytiques assurant que la méthode n'a pas introduit d'élément toxique ou allergisant. C'est pourquoi des thèmes de recherche portent sur les modifications radio-induites dans les protéines à l'état solide. On peut ainsi montrer que la radiosensibilité des protéines est fonction de leur taille et plus particulièrement de leur rapport aire /volume. Pour des doses de l'ordre de grandeur de celles que l'on utilise en radiostérilisation, la structure secondaire de protéines est affectée⁹ et ¹⁰.

Jusqu'à présent les irradiations étaient effectuées en radiolyse gamma. La présence d'un accélérateur délivrant des impulsions d'électrons énergétiques sur le campus d'Orsay permettrait le développement de ces études. On pourrait ainsi travailler dans des conditions plus proches de celles de l'industrie. D'un point de vue plus « scientifique », ceci permettrait également d'étudier l'influence du débit de dose sur la radiosensibilité des solides.

Cassures d'ADN : rôle des rayonnements :

L'accélérateur d'électrons apporte également une approche complémentaire aux études des systèmes biologiques sous rayonnement en parallèle avec les rayons X monochromatiques issus du rayonnement synchrotron, ou des ions lourds du Tandem. C'est ainsi que le dopage de molécules d'ADN par des atomes lourds de platine rendent ces molécules plus radio-sensibles et permet d'envisager un ciblage plus précis de tumeurs soumises au rayonnement. Des expériences de cassure mono et double brin d'ADN menées en X et en ions lourds semblent démontrer le rôle capital des ionisations en couche profonde et pourraient être complétées par des irradiations sous faisceaux d'électrons¹¹ qui apporteraient un nouvel éclairage pour justifier ces hypothèses.

La potentialité des applications dans ces domaines biologiques reste encore très ouverte et la disponibilité d'un faisceau d'électrons de haute énergie sera certainement une stimulation pour de nouvelles idées d'expérience.

⁹ *Protein γ -radiolysis in frozen solutions is a macromolecular surface phenomenon : fragmentation of lysozyme, citrate synthase and α -lactalbumin in native or denatured states. M. Audette, X. Chen, C. Houée-Levin, M. Potier and M. le Maire. Int. J. Radiat. Biol. Int. J. Radiat. Biol. 76, 673-681 (2000).*

¹⁰ *Gamma-radiation effects on α -lactalbumin. A. Chapelier, M. Desmadril, C. Houée-Levin. Can. J. Pharmacol. Physiol. 79, 154-157 (2001).*

¹¹ *C. Le Sech, K. Takakura, C. Saint-Marc, H. Frohlich, M. Charlier, N. Usami, K. Kobayashi. Radiation research 153 (2000) 454.*

4. Nom et composition des différentes équipes impliquées dans le projet :

4.1 Equipes impliquées dans les études préalables du projet :

Mr Saïd Essabaa, Ingénieur de Recherche de la Division Accélérateurs, a été chargé de la responsabilité de l'équipe d'élaboration de l'avant-projet de faisabilité et d'évaluation budgétaire. Cette équipe était constituée des Chercheurs et Ingénieurs des deux laboratoires spécialistes des différents domaines impliqués (HF, faisceauologie, vide, mécanique, radioprotection, source, alimentations, infrastructure...):

- *Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay (LAL) : MM. G. Bienvenu, J.C. Bourdon, T. Garvey, B. Jacquemard et M. Omeich ;*
- *Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO) : M^{mes} D. Grialou et N. Rouvière et MM. J. Arianer, P. Ausset, J-P. Baronick, J-B. Bergot, F. Clapier, L. Coacolo, F. Dupont, S. Essabaa, D. Gardès, F. Ibrahim, T. Junquera, S. Kandri, J-C. Le Scornet, J. Lesrel, AC. Mueller, A. Tkatchenko, B. Waast.*

Une équipe plus restreinte s'est chargée de la mise au point du présent rapport :
D. Gardès, D. Grialou, F. Ibrahim, J-C. Le Scornet et S. Essabaa.

4.2 Equipes de R&D impliquées dans le projet :

La Division Accélérateurs de l'IPNO, maîtresse d'œuvre du projet, regroupe une centaine d'Ingénieurs et de techniciens organisés en 7 groupes de spécialités (Théorie accélérateurs, Technologie accélérateurs, Electronique et Contrôle-commande, Bureau d'études mécaniques, Sources d'Ions, Cryogénie et Tandem), sous la Direction de Alex MUELLER (Directeur) et de Tomas JUNQUERA (Directeur technique). De nombreuses réalisations et contributions aux projets nationaux (CPO, SPIRAL I...) et internationaux (AGOR, LHC...) témoignent du haut niveau de compétences accélérateur de l'IPN.

5. Liens avec d'autres projets de recherche et développement :

Les laboratoires LAL et IPNO souhaitent réunir leurs installations de R&D autour des accélérateurs de particules sur le site du TANDEM d'Orsay. Un accélérateur d'électrons de 50 MeV en fonctionnement est un formidable outil de développement. Plusieurs espaces sont disponibles auprès de l'accélérateur pour développer les sous-ensembles nécessaires au fonctionnement des accélérateurs de particules.

Un premier espace est réservé pour les essais en puissance de structures accélératrices à 3 GHz, la puissance disponible en sortie de klystron est de 35 MW. Cette puissance est amplement suffisante pour conditionner et tester de nouvelles structures accélératrices soit en cuivre dite chaude soit des cavités supraconductrices. En effet un ensemble similaire a été utilisé au LAL pour étudier le comportement des cavités supraconductrices en régime impulsionnel¹².

Cette source de puissance permet aussi de tester de nouveaux composants sur guide d'ondes tels que atténuateurs de puissance, déphaseurs, coupleurs. Ne disposant pas d'une source de puissance, plusieurs industriels sont demandeurs, afin de pouvoir tester leurs composants en puissance.

¹² C.THOMAS "Mesures du gradient accélérateur maximum dans des cavités supraconductrices en régime impulsionnel à 3 GHz" thèse LAL 00-01.

Un autre axe de recherche concerne les canons déclenchés par laser, ce type de canon est aujourd'hui l'un des plus performants (projet TESLA, CLIC) mais mérite d'importants efforts de R&D pour sa mise au point. Un emplacement est réservé au-dessus du tunnel pour installer l'ensemble laser permettant le déclenchement du canon. Dans le futur, ce type de source d'électrons pourra remplacer le canon thermoélectronique de l'injecteur et améliorer sensiblement les performances de l'accélérateur.

Un dernier axe de recherche envisagé est l'étude et le développement de diagnostics permettant de mesurer les caractéristiques d'un faisceau de particules. En effet, il est indispensable pour valider et calibrer un nouveau diagnostic de bénéficier d'un faisceau de particules, plusieurs emplacements sont disponibles sur la ligne de transport pour insérer des mesureurs de courant, des diagnostics optiques etc. Une telle installation de tests avec le potentiel humain des laboratoires LAL et IPNO dans le domaine des accélérateurs permettra de nombreuses recherches et de développer les accélérateurs du futur.

Le projet ALTO a évidemment aussi des liens privilégiés avec le projet SPIRAL II. Ce dernier projet vise une extension des installations actuelles du Grand Accélérateur à Ions Lourds (GANIL) à Caen. En effet, une option possible pour SPIRAL II consiste également dans l'utilisation de la photofission au GANIL. Afin d'évaluer cette option, un groupe de travail, regroupant principalement le CEA, le GANIL et l'IPN d'Orsay, a été constitué. C'est dans cette éventualité que GANIL se doterait à terme d'un accélérateur d'électrons permettant d'envoyer une puissance de 25 kW sur une cible fissile à l'horizon 2006. En ce qui concerne les aspects cible-source, il s'agit là d'une extrapolation considérable de la puissance de 250W que ALTO saura fournir dès la fin 2003. De nombreux problèmes pertinents à cette extrapolation (temps de diffusion dans des cibles étendues, couplage source, évaluations expérimentales des taux de radiations et tenue des matériaux) peuvent être alors étudiés à échelle modélisée sur ALTO dans un calendrier conforme au projet SPIRAL II.

6. Collaborations extérieures (équipes de recherche nationales, européennes ou internationales, entreprises...) :

Les laboratoires internationaux :

Isolde, CERN, CH-1211 Genève 23, Suisse

Institut für Kernchemie, Universität Mainz, D-55128 Mainz, Allemagne

Les entreprises :

ALCATEL ESPACE

ALTEN

CERT/ONERA

CNES

CONAE

DELTA TECHNOLOGIES

INFODUC

MATRA MARCONI SPACE

MHS SA THERMIC

SODERN

THOMSON

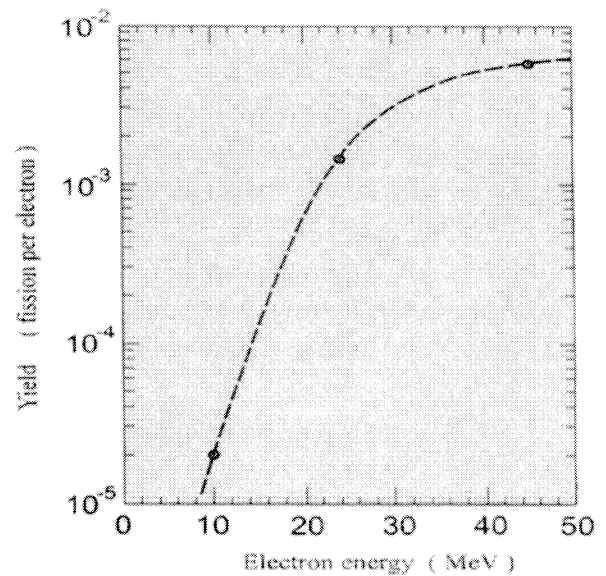
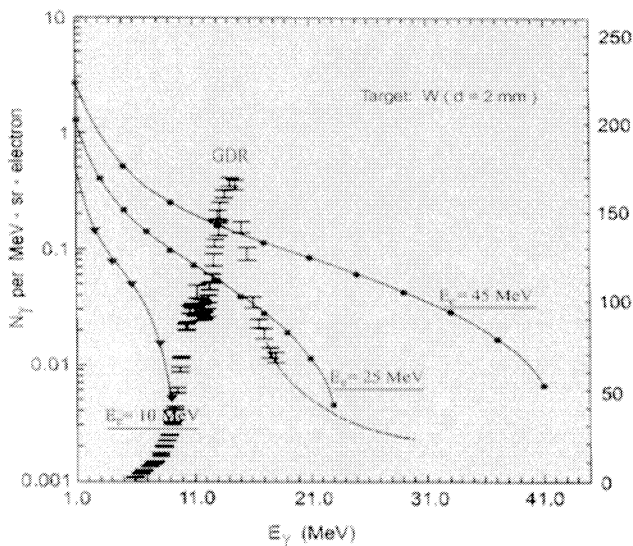
TIMA/CNRS

TRAD

7. Analyse du parc régional, national ou international de ce type d'équipement :

S'il existe de nombreux accélérateurs d'électrons en France et dans le monde, bien peu répondent aux conditions d'énergie, d'intensité et d'émittance nécessaires pour produire des fragments de fission par photofission. Preuve en est la difficile quête d'un tel accélérateur en Europe, pour pouvoir réaliser l'expérience de photo fission réalisée en avril 2001...sur le pré injecteur du LEP au CERN. C'est précisément cet accélérateur qu'il s'agit aujourd'hui d'installer au Tandem d'Orsay.

C'est donc au vu de l'analyse des 2 courbes suivantes qu'on peut affirmer que l'optimum d'énergie des électrons incidents doit être de 40 à 50 MeV, énergies pour lesquelles le taux de fission sature.



Section efficace de fission en fonction de l'énergie des photons γ . Points rouges: le nombre normalisé de photons γ produits par Bremsstrahlungs en fonction de leur énergie pour chaque valeur de l'énergie des électrons incidents.

La convolution des deux courbes de gauche donne le nombre de fissions par électron incident en fonction de l'énergie de l'électron indiquée ci-dessus.

L'intensité du faisceau doit quant à elle, pour des raisons de radio protection, demeurer limitée à moins de 10 μ A pour ne pas rentrer dans les normes d'une Installation Nucléaire de Base (INB). En conséquence le recensement du parc d'accélérateurs d'électrons fait apparaître la quasi unicité de l'installation proposée (5 μ A/ 50MeV):

Au niveau national :

Installations inadaptées à la photo – fission :

SAPHIR, CEA Saclay, 30 MeV, pour la caractérisation des déchets radioactifs ;

LINAC de Saclay, CEA, 10 MeV, pour la radiolyse ;

ELYSE, Université Paris XI, Orsay, 3-9 MeV, pour la radiolyse ;

LINAC, CEA, Bruyère Le Châtel, pour les irradiations ;

Installations dédiées au rayonnement synchrotron, inutilisables pour la photo - fission :

LINAC de LURE, IN2P3-CNRS, Orsay, 30 MeV;

CLIO, Campus d'Orsay, 20/50 MeV (laser à électrons libres).

Au niveau international :

Le Pré injecteur du LEP(LIL), CERN, Suisse, arrêté et proposé à l'IPN d'Orsay ;

GILINA , Geel, Belgique, 150 MeV.

Le Microtron de DUBNA, Russie, 25 MeV /20 μ A ;

LINAC de Chalk River, USA, 30 MeV / 3.3 mA

LINAC de l'IENM, Canada, 5-35 MeV/<60 μ A, étalon de rayonnements ionisants.

8. Moyens de fonctionnement affectés à l'équipement (personnel, crédits...) :

L'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, Unité Mixte de Recherche (UMR) de l'Université Paris XI et du CNRS, via l'IN2P3 (son Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules), reçoit de ceux-ci la dotation budgétaire globale de fonctionnement et le personnel affecté.

On estime le nombre de personnels nécessaire à la réalisation du projet à quelques 25 hommes/an, dont 20 IPN et 5 LAL. Pour l'essentiel le personnel travaillera à temps partiel, mais l'effort principal sera à fournir dès le début de réalisation du projet pour tenir le délai très court imposé (2 ans).

L'implantation du projet sur le site même du Tandem a des conséquences importantes :

- *En terme de calendrier et de manutention, elle compliquera la phase de réalisation, compte tenu de l'inaccessibilité des lieux durant les périodes d'exploitation de la machine ;*
- *En terme d'utilisation et de conduite futures, l'environnement déjà existant, tant sur le plan technique (infrastructure – fluides, électricité, contrôle-commande...) qu'en personnels (conduite en 3 x 8, maintenance qualifiée...) permettra une intégration sans surcoût de fonctionnement important.*

Cette nouvelle installation devrait donc pouvoir fonctionner selon :

un coût de fonctionnement annuel de ~30 500 €

un coût de la maintenance annuel de ~30 500 €

9. Intérêt du projet sur les plans industriels, économique, social et au plan régional :

Irradiations de composants électroniques – durcissement

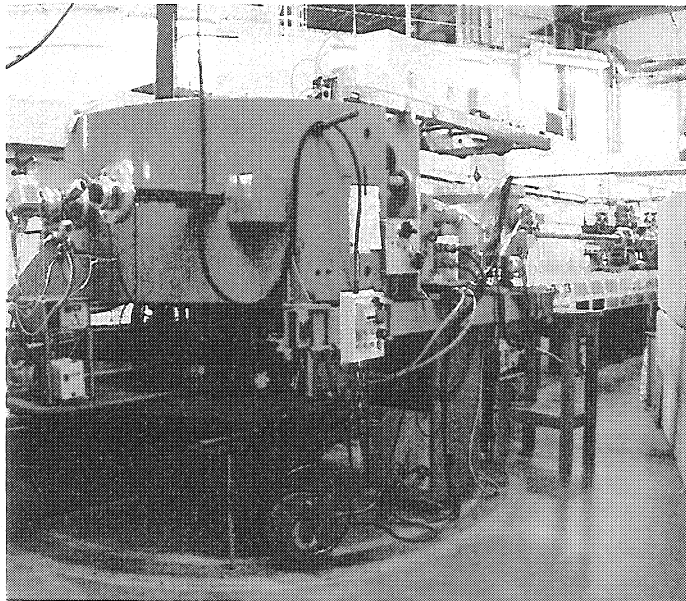
Les transports aériens et les systèmes de communication embarqués sur satellites sont dotés de circuits dont le nombre de composants au cm² (intégration) est de plus en plus poussé. Cette particularité les rend particulièrement vulnérables aux impacts de particules énergétiques résidant dans leur espace d'évolution (ceintures de Van Allen, rayonnement résultant des éruptions solaires). La connaissance des mécanismes de destruction et leur prévention sont au cœur des préoccupations des industries spatiales et de l'avionique.

Certains tests de composants électroniques embarqués sur les avions ou les satellites sont actuellement irradiés au Tandem d'Orsay dans le cadre de contrats industriels. La finalité de ces études

est de mieux cerner les mécanismes pouvant conduire à une « mal-fonction », voire une destruction des composants soumis au rayonnement des ceintures de radiations ou au flux de protons solaires¹³.

Un faisceau d'électrons intenses de haute énergie permet de créer par rayonnement de freinage dans un convertisseur des flux intenses et pulsés de rayonnement X ou gamma (flash gamma). Par rapport à des irradiations classiques par rayonnements en bombe cobalt ou césium, ces expériences pourraient bénéficier de flux instantanés plus intenses, d'une géométrie sous contrôle et d'une résolution temporelle à l'échelle de la μ s.

La production de neutrons par voie (γ , n) donnant un spectre de neutrons pulsés sur une large gamme d'énergie est un autre sous-produit de l'impact d'électrons énergétiques avec la matière. Les utilisations d'un tel type de faisceau sont nombreuses et feraient d'Orsay un centre mondial pour ce type d'étude. En plus des études relevant de l'impact neutronique sur les composants électroniques, des faisceaux de neutrons directs pourraient être utilisés pour compléter la mise au point des méthodes de détection de matières organiques utilisées par exemple pour le scanning des containers. La manipulation de faisceaux de neutrons est délicate et l'association d'un environnement adapté avec le savoir-faire acquis au laboratoire sur cet aspect en font un atout certain de succès pour ce type d'activité.



Station d'irradiation au Tandem d'Orsay

Ce sera notamment le cas des irradiations des composants électroniques et la vérification de leur conformité aux nouvelles normes ISO 2002 (tenue au rayonnement neutronique). Ce nouveau type de faisceau rentrera dans le cadre des contrats industriels négociés chaque année au niveau de l'Institut.

En ce qui concerne les industriels utilisant les faisceaux Tandem nous citerons :

ALCATEL ESPACE

ALTEN

CERT/ONERA

CNES

¹³ Thèse C. Inguibert « prédictions des événements singuliers induits par les protons » (1999) ENS Aéronautique et Espace- Toulouse.

CONAE
DELTA TECHNOLOGIES
INFODUC
MATRA MARCONI SPACE
MHS SA THERMIC
SODERN
THOMSON
TIMA/CNRS
TRAD

La plupart de ces entreprises sont localisées auprès des centres de recherche spatiaux et aéronautiques de la région sud-ouest. Les contacts de prospective montrent leur intérêt pour de futurs faisceaux d'électrons à haute énergie (production de gamma et surtout de neutrons).

10. Impact économique et social au niveau régional :

La réalisation d'un pôle francilien de recherche et d'enseignement supérieur à proximité du plateau de Saclay, entre Yvelines et Essonne, relève d'une volonté politique sans cesse réaffirmée depuis plusieurs décennies. Le développement des R&D des centres de recherche (CEA, CNRS, INRA...) en fait aujourd'hui un pôle technologique qui nourrit de solides interfaces avec les industries high tech qui se sont installées à proximité (zone de Courtaboeuf, de Buc et de Guyancourt). Désormais, les relations économiques entre Recherche et Industrie sont devenues plus complexes, les rapports producteurs-clients ne sont plus univoques : le Tandem fournit des heures d'irradiation aux industriels, la Division Accélérateurs de l'IPN conçoit et réalise des instruments pour les centres hospitaliers et les laboratoires biologiques. Ces interactions nouvelles donnent sens à cette concentration géographique, d'autant plus qu'elles imprègnent désormais l'ensemble de la vie de la Cité bien au delà des communes avoisinantes (de l'enseignement à l'habitat).

Maintenir et développer ces synergies, dans des domaines dynamisés par des évolutions techniques et scientifiques permanentes suppose :

- 1. se reposer sur des pôles de compétence structurés ;*
- 2. d'alimenter constamment le système en projets innovants.*

Le secteur public joue là un rôle décisif : propulseur d'innovation dont le marché se saisira plus tard, vigilant à répondre à la demande sociale, il est aussi formateur et manager de compétences. L'Institut de Physique Nucléaire participe de ces responsabilités publiques. C'est ce qui caractérise les trois précédents projets SESAME que l'Institut a développé avec la Région Ile de France, « Cryholab », « Auger », « bras isocentrique » : haute technologie, astrophysique, traitement du cancer...

Preuves s'il en fallait, qu'aujourd'hui, les travaux de recherche fondamentale en physique du noyau et ceux réalisés en R&D pour la mettre en œuvre, dégagent une plus-value insoupçonnée, dont, de l'imagerie médicale à l'incinération des déchets nucléaires, la Santé et l'Environnement peuvent bénéficier.

De façon immédiate, l'effet retour sur l'économie de la région, d'un projet comme celui que nous présentons est évident. L'essentiel des matériels et services nécessaires à sa réalisation sont, du fait même de cette concentration géographique, disponibles dans notre environnement industriel de proximité et pouvant de ce fait participer aux appels d'offre réglementaires selon les procédures légales en vigueur.

(voir les devis ci-joints).

11. Implication dans la formation par la recherche :

Le Tandem participe déjà de façon active aux actions de formation et de vulgarisation.

Chercheurs, ingénieurs ou techniciens du Tandem participent à l'encadrement de stages de formations universitaires ou professionnels. Les étudiants sont issus des DEA de l'école doctorale « Rayonnement et environnement », des maîtrises ou des IUT du campus d'Orsay. L'accélérateur utilise également des vacataires étudiants pour l'assistance aux opérateurs de conduite de la machine. Ces stages rémunérés sur des postes de soir ou de nuit leur permettent de participer à la vie scientifique de la machine et d'avoir un éclairage nouveau sur le métier de chercheur ou de technicien.

Le DEA « Modélisation et Instrumentation pour la Physique » (MIP) organise ses travaux pratiques sur l'accélérateur. Le travail réparti sur plusieurs semaines consiste à concevoir en équipe (une dizaine d'étudiants) un projet d'expérience, au montage expérimental, aux tests et calibration des détecteurs, et en final à la réalisation de l'expérience sur faisceau dans les conditions réelles du travail d'expérimentateur.

Le renforcement du potentiel accélérateur ne peut qu'étendre ces activités. La disposition d'un faisceau de neutrons bien contrôlé, dans des conditions de sécurité optimales, permettra l'organisation de travaux pratiques originaux et novateurs. Disposer d'un faisceau de neutrons pulsés piloté par un accélérateur est extrêmement rare et d'utilisation beaucoup plus facile que des irradiations auprès de réacteurs. Des contacts seront pris avec d'autres enseignements susceptibles d'être intéressés (INSTN Saclay par exemple).

Enfin, en aval de ces formations, ce sont les ingénieurs eux-mêmes qui pourraient bénéficier des bancs de tests établis sur le site dédié aux développements accélérateur (cf §5).

12. Coût total du projet

Le coût hors fonctionnement et hors missions de l'installation de cet accélérateur d'électrons de 50 MeV au Tandem est estimé à **5 000 000 € TTC** repose sur les cinq bases suivantes :

1. Dons en matériel du CERN comportant le canon, le système pré-groupeur/groupeur, la section avec son support et deux moniteurs de position de faisceau (voir Annexe 3: la donation du CERN);

Pour une valeur équivalente de **1 200 K€ TTC**

2. Mise à la disposition par le LAL d'équipements HF;

Pour une valeur équivalente de **600 K€ TTC**

3. Récupération des blocs de bétons du CEA (ex Saturne);

Pour une valeur équivalente de **200 K€ TTC**

4. Implantation en salles 210 et 310 du Tandem permettant une installation à moindre coût en terme de radioprotection, de sécurité, d'infrastructure et d'environnement (PAARNe, ligne d'analyse, spectromètre, informatique, contrôle commande...);

Pour une valeur équivalente de **1 600 K€ TTC**

5. Ingénierie assurée par l'IPN, maître-d'œuvre du projet.

Dans ces conditions l'investissement complémentaire est estimé à : 1 400 000 € TTC

13. Type de matériels à acquérir

<i>Les compléments du système HF</i>	<i>156 000 € TTC</i>
<i>Les compléments canon et sections</i>	<i>60 000 € TTC</i>
<i>Les éléments magnétiques</i>	<i>120 000 € TTC</i>
<i>Les alimentations de puissance</i>	<i>96 000 € TTC</i>
<i>Les diagnostics</i>	<i>74 000 € TTC</i>
<i>Le système contrôle - commande</i>	<i>150 000 € TTC</i>
<i>Le vide et les chambres</i>	<i>130 000 € TTC</i>
<i>Les interconnexions</i>	<i>48 000 € TTC</i>
<i>Le complément d'infrastructure</i>	<i>365 000 € TTC</i>
<i>Manutention et transport</i>	<i>48 000 € TTC</i>
<i>Sécurité et radioprotection</i>	<i>73 000 € TTC</i>
<i>Imprévu</i>	<i>66 000 € TTC</i>
Total	1 386 000 € TTC

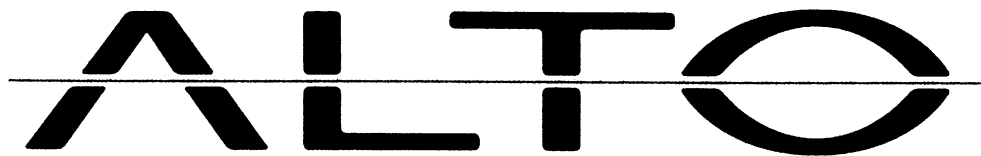
14. Plan de financement

(Demandes)

<i>IN2P3/CNRS</i>	<i>530 000 € TTC</i>
<i>Université Paris XI</i>	<i>60 000 € TTC</i>
<i>Subvention Région Ile de France</i>	<i>480 000 € TTC</i>
<i>Subvention Conseil Général de l'Essonne</i>	<i>320 000 € TTC</i>

PROJET TECHNIQUE

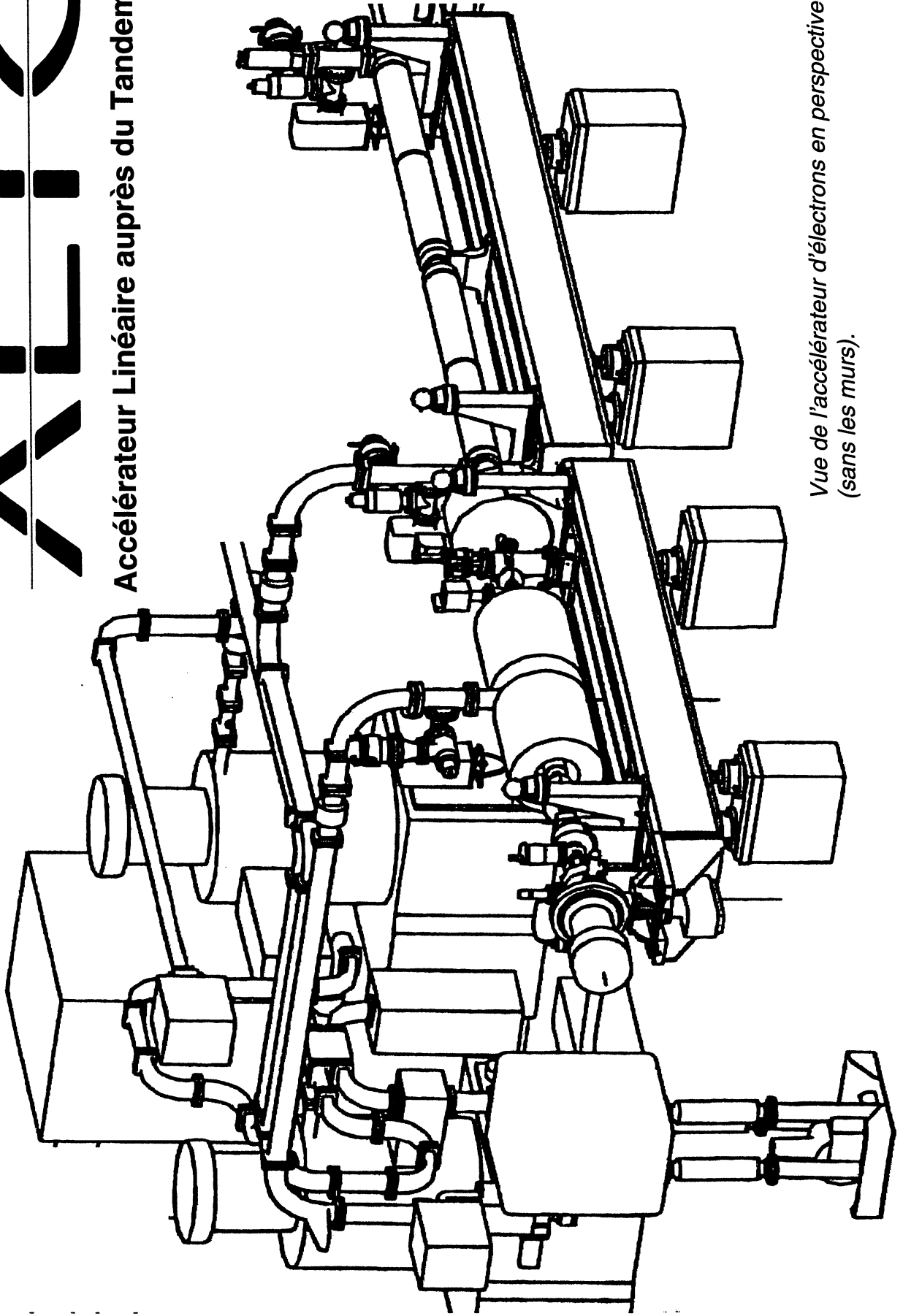
<i>Perspective axométrique de l'accélérateur</i>	.....	<i>page 2</i>
<i>Schéma synoptique du projet</i>	.....	<i>page 3</i>
<i>1. Description générale de l'accélérateur</i>	.....	<i>page 4</i>
<i>2. Les principaux sous systèmes</i>	.....	<i>page 6</i>
<i>3. Système HF</i>	.....	<i>page 7</i>
<i>4. Infrastructure</i>	.....	<i>page 8</i>
<i>5. Blindage de l'accélérateur et de la cible PARRNe</i>	.....	<i>page 10</i>
<i>6. Ligne de transport du faisceau</i>	.....	<i>page 11</i>
<i>7. Système du vide</i>	.....	<i>page 12</i>
<i>8. Contrôle & commande</i>	.....	<i>page 12</i>
<i>9. Planning prévisionnel</i>	.....	<i>page 13</i>



Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay

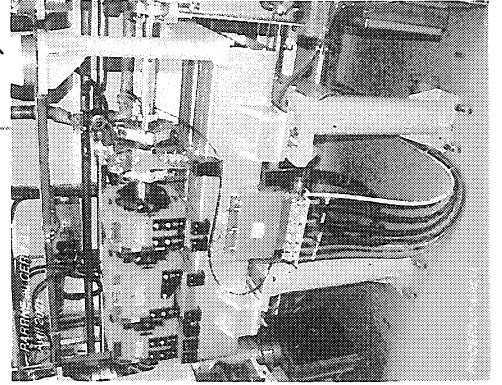
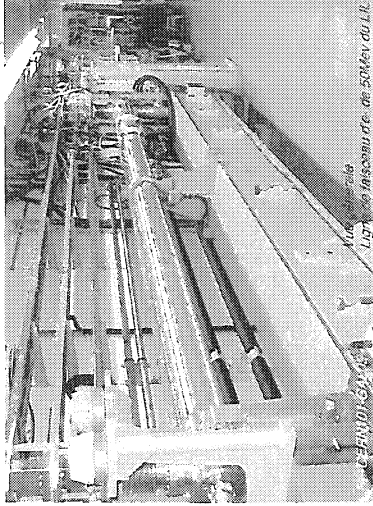
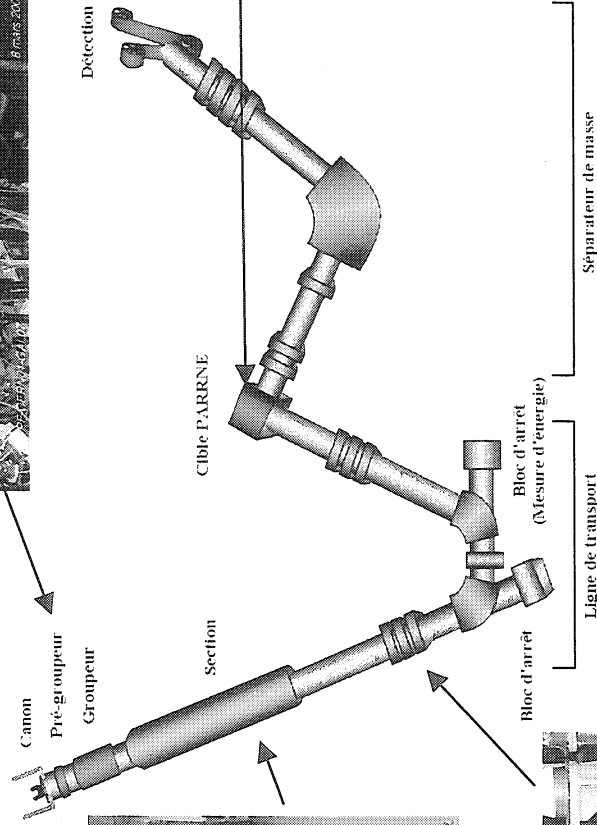
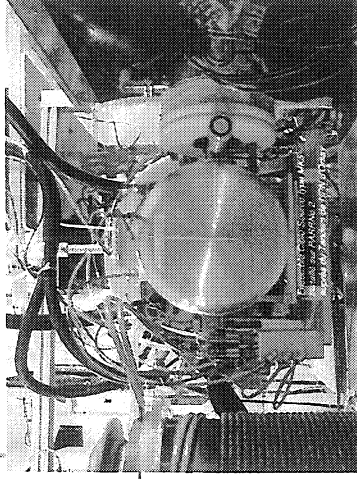
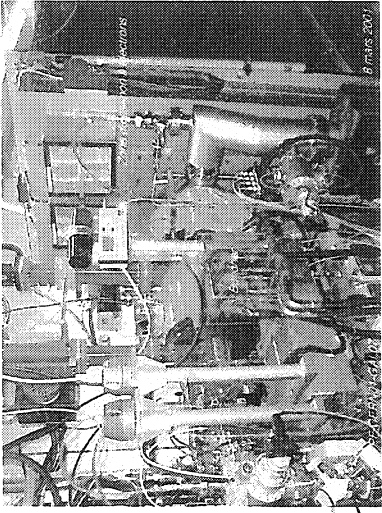
ALTO

Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay



*Vue de l'accélérateur d'électrons en perspective axométrique
(sans les murs).*

J-C. Le Scornet



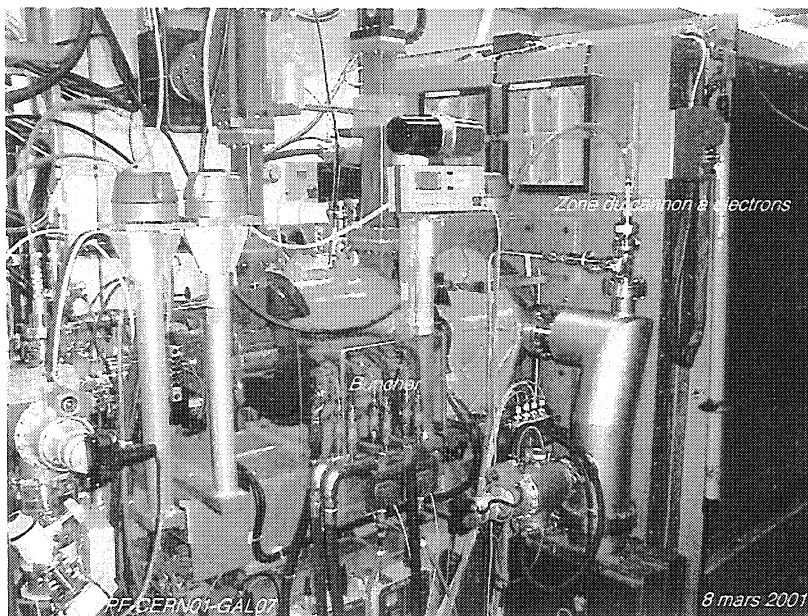
ALTEO

Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay

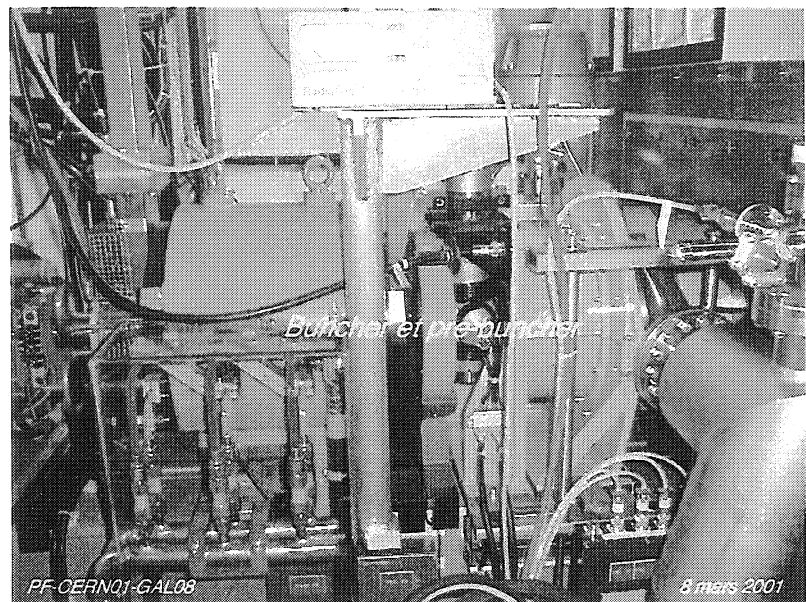
1. Description générale de l'accélérateur d'électrons de 50 MeV

Les principales composantes sont:

- 1) **Le canon** est une source thermoionique portée à 90 kV produisant des pulses d'électrons de $\sim 2 \mu\text{sec}$ à une fréquence opérationnelle de 100 Hz. Le courant crête à la sortie du canon est de 50 mA.
- 2) **Le pré-groupeur** est une cavité HF travaillant en ondes stationnaires à 3 GHz. Pour une meilleure focalisation du faisceau, trois solénoïdes sont installés à l'entrée pré-groupeur.
- 3) **Le groupeur** est une cavité HF tri-périodique fonctionnant en ondes stationnaires à 3 GHz. La structure de la cavité est entourée d'un solénoïde produisant un champ magnétique de l'ordre de 0.2 T. En sortie du groupeur les électrons ont une énergie de 4 MeV.

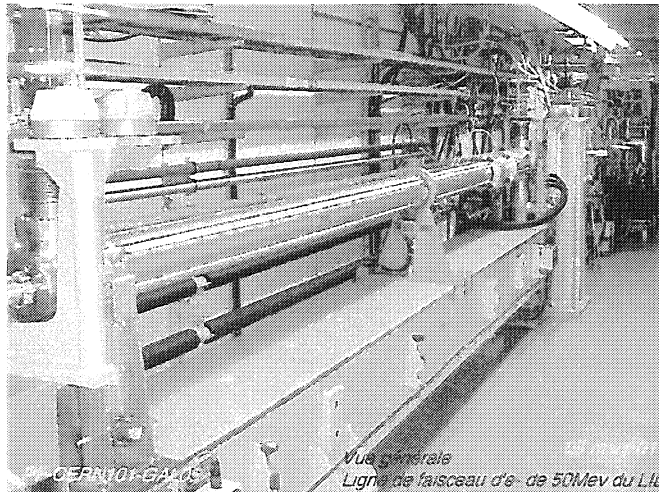
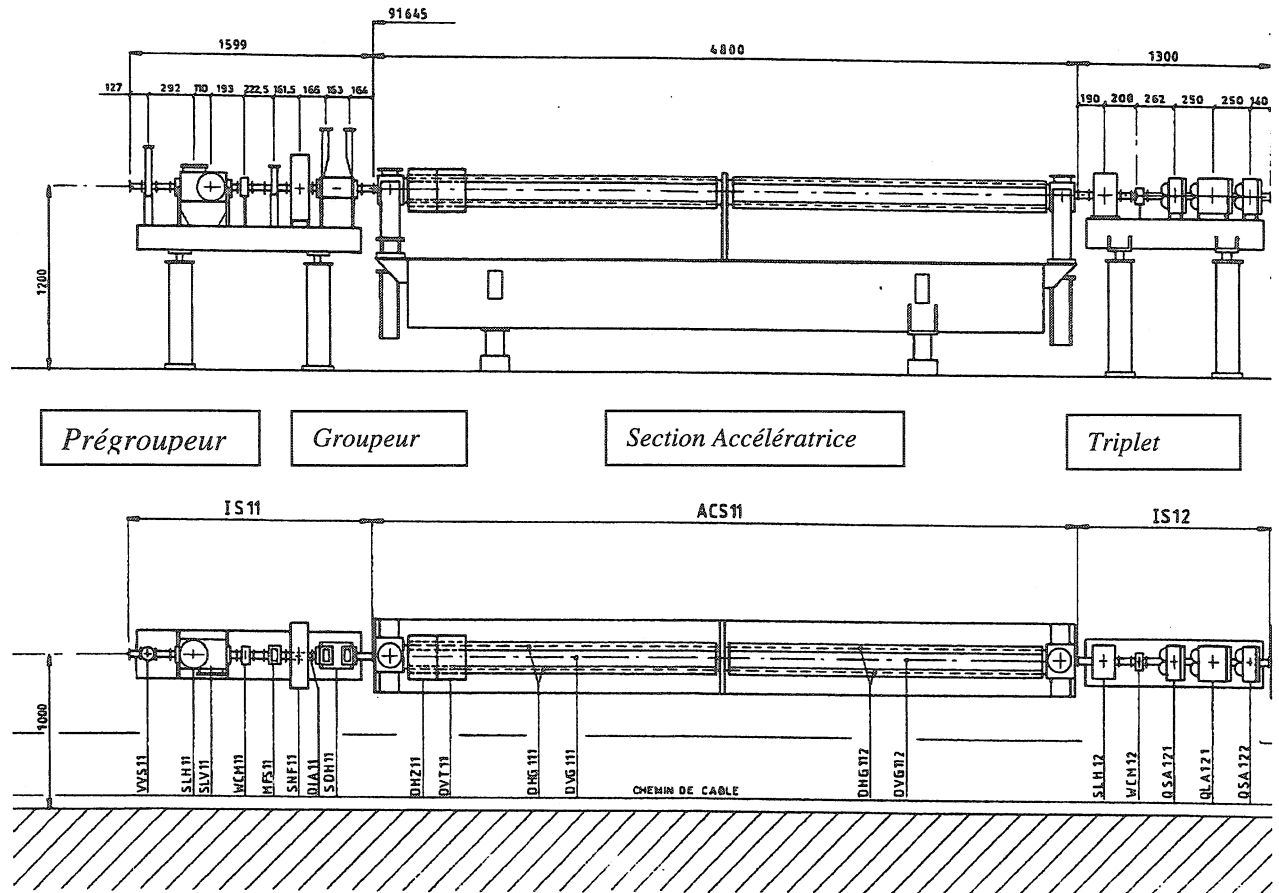


Vue partielle :
Le canon ;
Le pré-groupeur
Le groupeur (buncher).



Vue partielle :
Le pré-groupeur
Le groupeur (buncher).

- 4) *La section accélératrice est une cavité à ondes progressives, opérant à 3 GHz. Elle a une longueur de 4.5 m et donne 46 MeV en gain d'énergie. Une optique d'adaptation de faisceau composée d'un solénoïde et d'un triplet de quadrupôles est placée entre le groupeur et la section accélératrice.*

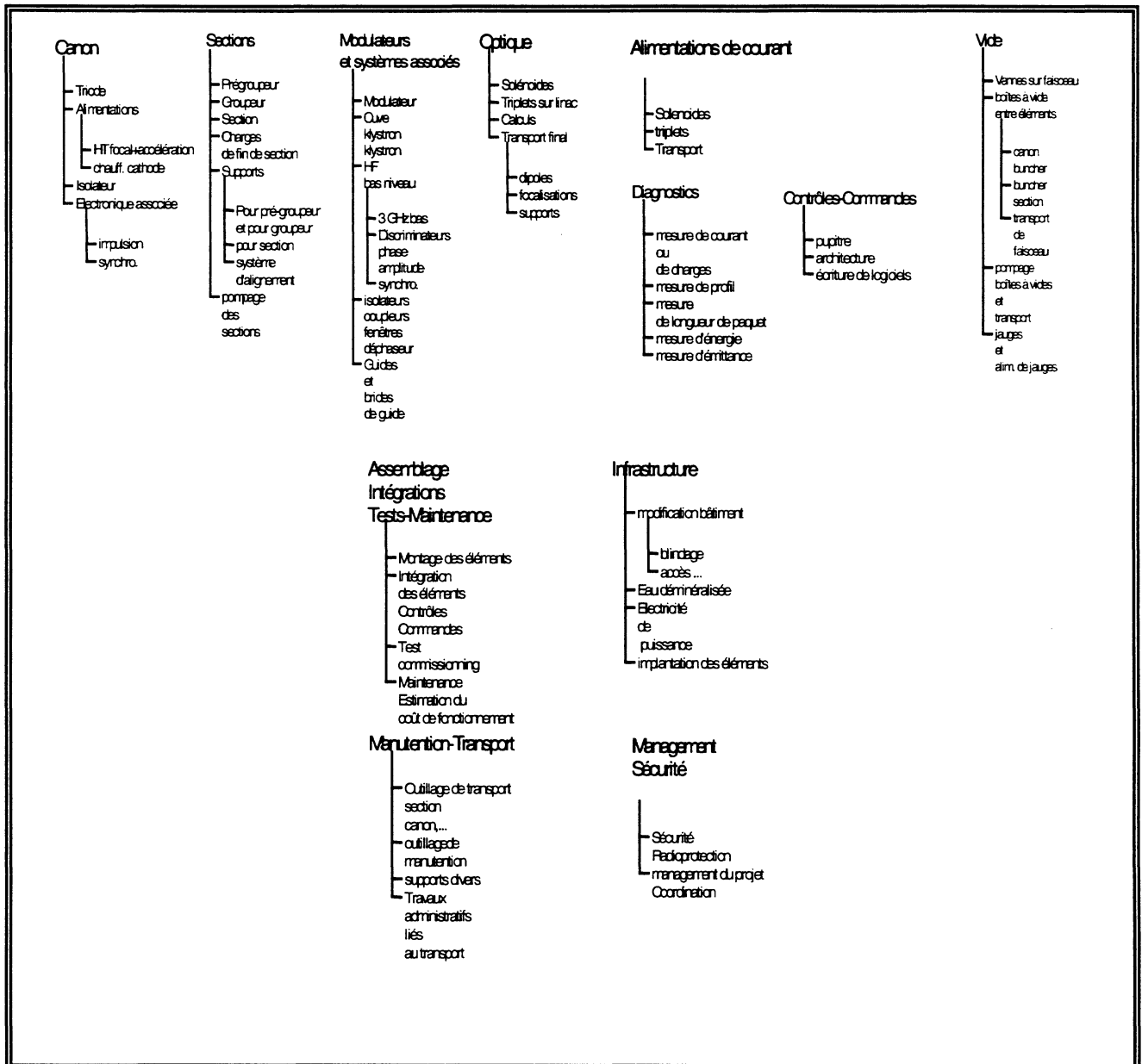


*Vue partielle :
La section accélératrice*

- 5) *La ligne de transport de faisceau est équipée d'instruments pour les diagnostics comportant la mesure de courant, de la position de faisceau, de l'énergie et de la dispersion en énergie. Cette ligne sera décrite en détail au paragraphe 3.5.*

2. Les principaux sous-systèmes

Les sous-systèmes composant l'accélérateur d'électron sont définis sur l'organigramme suivant:



3. Système HF

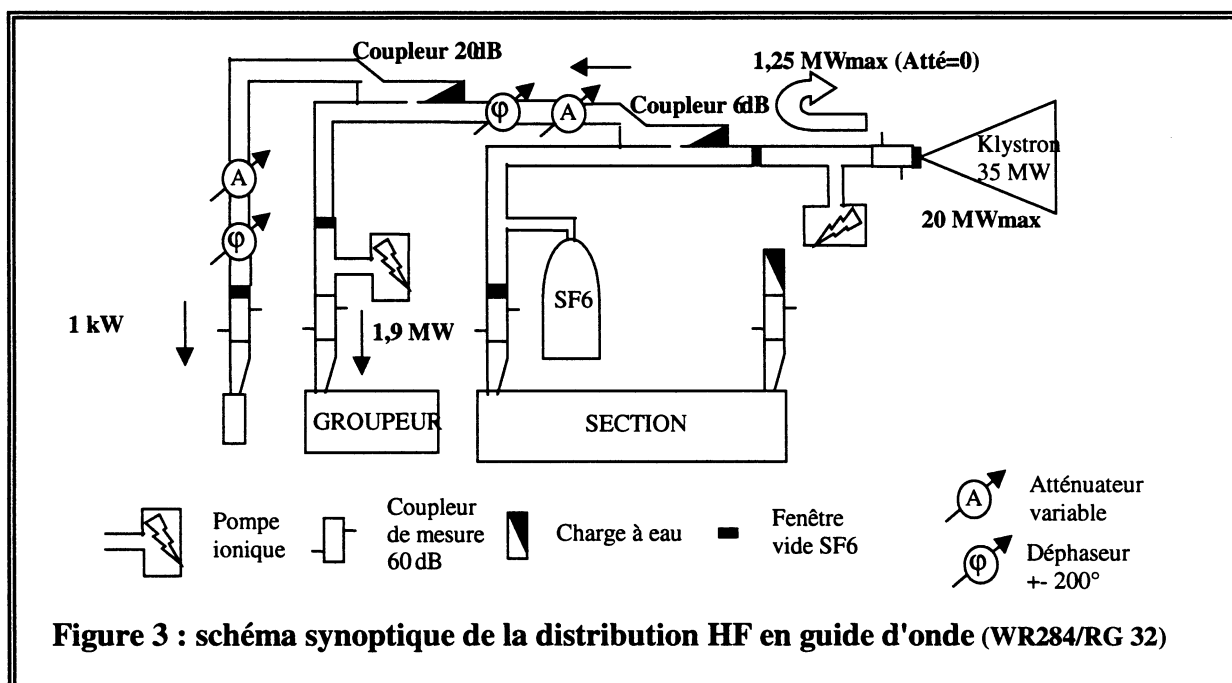
La figure 3 montre le schéma synoptique du système HF. Toute la structure HF (pré-groupeur, groupeur et section accélératrice) est alimentée par un seul klystron de type

TH 2100 de 35 MW. Les caractéristiques du klystron sont les suivantes :

Fréquence	2998.55 MHz	Puissance moyenne	17.5 kW
Puissance crête	35 MW	Tension	273 kV
Durée max. Impulsion HF	4.5 μ s	Courant crête	285 A
Le rendement minimum	45 %		

La puissance est répartie dans le réseau HF selon le tableau suivant :

Energie (MeV)	Puissance klystron	Puissance section	Puissance groupeur
$E_{max} = 60$	20.5 MW	15.3 MW	1.9 MW
$E_{optimale} = 50$	14.3 MW	10.7 MW	1.9 MW



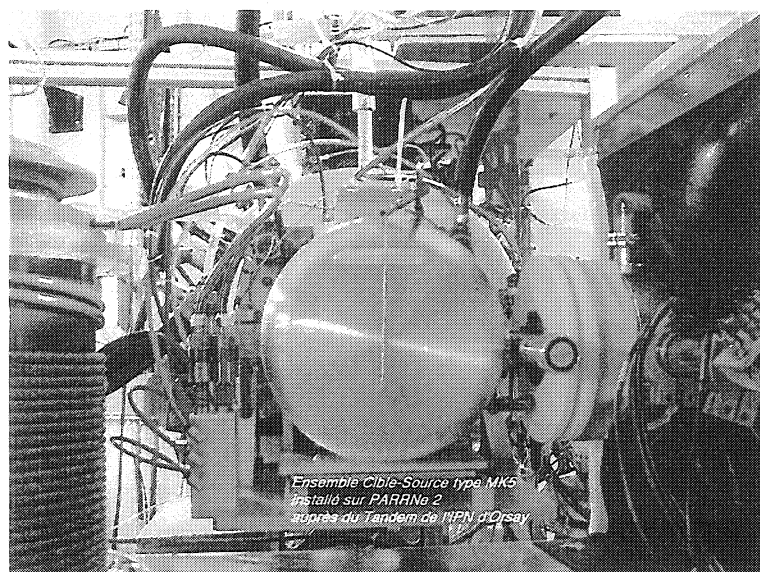
4. Infrastructure

Pour irradier la cible PARRNe avec des deutons ou avec des électrons, l'emplacement de l'accélérateur doit être à proximité de la cible et dans une zone blindée. L'implantation de l'accélérateur a été définie selon certains critères, on peut en citer ici les principaux:

- exigences des utilisateurs IPN et LAL
- géométrie de l'accélérateur et encombrement lié au transport de faisceau
- contraintes architecturales (architecture existante, proximité d'autres sites expérimentaux...) et techniques (charge au sol, hauteur sous le pont roulant, charge maximale du pont roulant...)
- contraintes liées à l'encombrement et au poids du matériel tels que le klystron et le modulateur
- la ligne optique retenue.

Le site (figure 4) qui répond le mieux à ces critères, correspond aux deux salles 210 (cible PARRNe) et 310 (Accélérateur). Néanmoins, cette proposition exige quelques modifications comme la suppression du mur existant entre les salles 210 et 310. L'accélérateur de 12 m de long est placé à l'intérieur d'un tunnel de 3 m de haut et à peu près 3 m de large dans la salle 310. La ligne de transport est pratiquement localisée dans la salle 210. Le klystron est placé à proximité du canon à l'intérieur du tunnel. Le modulateur est installé hors de l'espace bétonné au dessus de la ligne 410 du Tandem.

La grande partie du blindage est assurée par des blocs de béton qui seront récupérés du CEA (ex Saturne). Il est envisagé d'alimenter cette nouvelle installation en puissance (250 kVA) en mettant en place une armoire de distribution et de protection à partir d'un transformateur existant au Tandem. Une ligne existante d'eau déminéralisée à haut débit pourrait suffire aux besoins en refroidissement. Cet environnement permet de disposer d'espaces expérimentaux pour le LAL : en amont du canon à électrons, en bout de la section accélératrice et au niveau du bloc d'arrêt en sortie du second aimant de déviation. Un espace supplémentaire est réservé, parallèlement à la section accélératrice, pour un éventuel test d'une autre section. Par ailleurs, nous avons réservé une zone au dessus du tunnel pour laisser la possibilité d'installer un laser pour le développement d'un canon déclenché par laser (photo-injecteur). Ce développement intéresse potentiellement le groupe LAL.



Vue partielle :
Ensemble cible-source PARRNe2

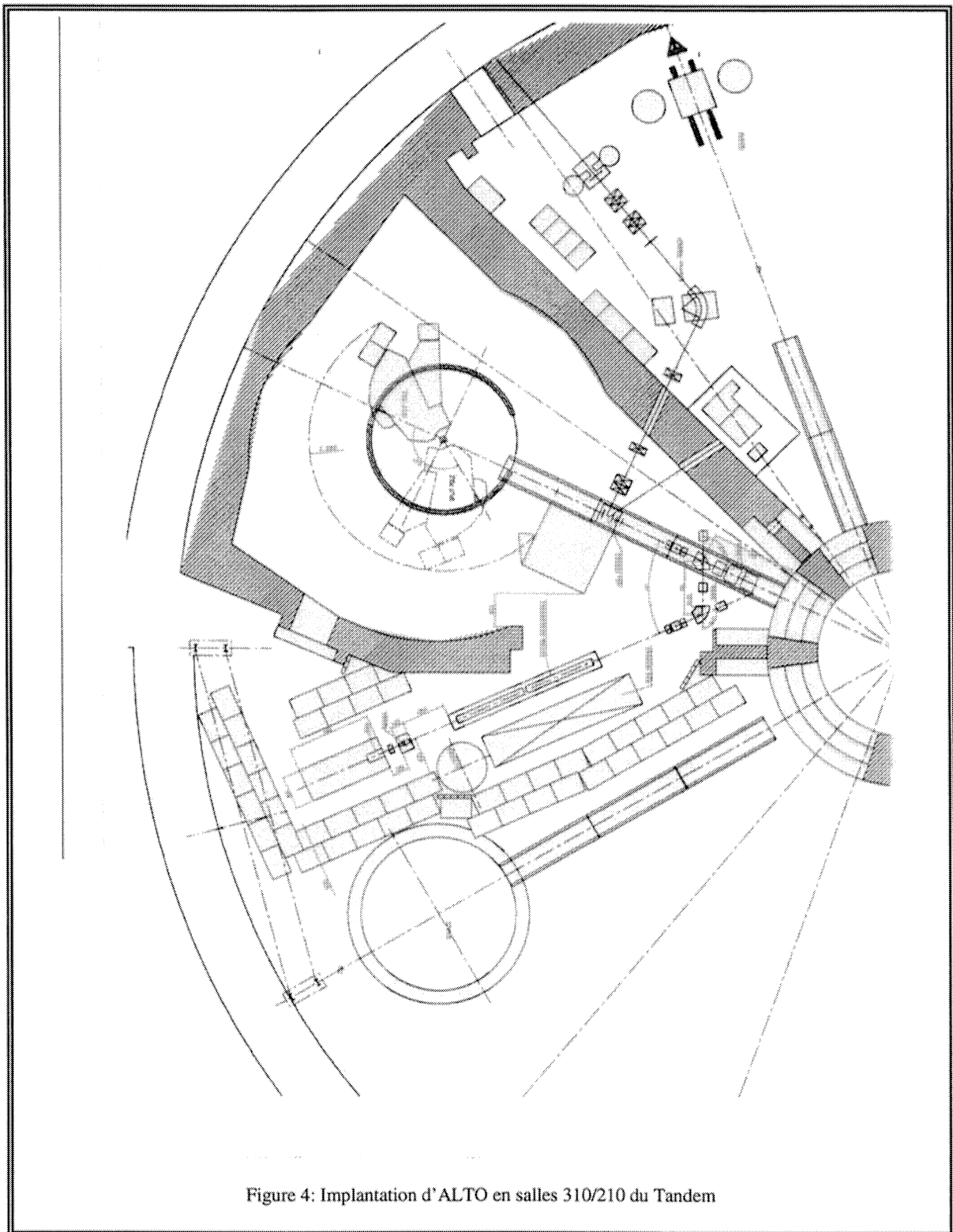


Figure 4: Implantation d'ALTO en salles 310/210 du Tandem

5. Blindage de l'accélérateur et de la cible PARRNe

Les normes de la radioprotection en vigueur prises en compte pour estimer le blindage sont les suivantes :

0.5 μ Sv/h en zone publique

3 μ Sv/h en zone surveillée

10 μ Sv/h en zone contrôlée

Au dessus des toits abritant l'accélérateur, on tient compte de 100 fois la dose publique autorisée. Ces limites ont été choisies après consultation du ORPI sur les applications des nouvelles recommandations européennes pour un temps de fonctionnement de 2000 h/an.

La configuration envisagée est celle qui consiste à enfermer le LINAC dans un tunnel en béton dans la salle 310. Etant donné que la ligne de transport du faisceau et la cible PARRNe se trouvent dans la salle 210, un blindage local en plomb paraît plus avantageux malgré son coût onéreux. En effet, cette solution permet, d'une part de gagner de la place (l'épaisseur est réduite d'un facteur 10 en remplaçant le béton par du plomb) et d'autre part d'éviter la photo-production de l'ozone dans l'air.

Blindage au niveau du groupeur (4 MeV)

Dans le calcul, on considère l'hypothèse d'une perte au niveau du groupeur d'un courant moyen de 20 μ A à 4 MeV. Compte tenu de la disponibilité de blocs de béton existant, il est décidé que l'épaisseur totale des murs comme du plafond sera de 1.20 m.

Blindage au niveau de la cible et des arrêts faisceau (50 MeV)

Le calcul a été effectué pour le transport de faisceau ayant un courant moyen maximum de 10 μ A. Il faut donc prévoir un blindage local avec du Pb de 40 cm d'épaisseur.

6. Ligne de transport du faisceau

Du point de vue de l'optique, la ligne proposée est composée de deux dipôles ($R=0.4$ m, aimant secteur sans indice) donnant une déviation totale de 130 degrés (2 fois 65 degrés) et de sept quadrupôles distribués de la façon suivante :

- un triplet placé entre l'accélérateur et le premier dipôle de la déviation pour contrôler l'enveloppe du faisceau en sortie de l'accélérateur,
- une quadrupôle placé entre les deux dipôles assurant l'achromatisme de la déviation,
- un triplet en sortie de la déviation pour ajuster les dimensions du faisceau sur la cible PARRNe.
- Les enveloppes du faisceau sont représentées sur les figures 5. Une sortie après le premier dipôle de la déviation permet d'analyser le spectre en énergie du faisceau. Des solutions satisfaisantes ont été trouvées et montrent qu'une résolution en énergie inférieure à 5/1000 est possible.
- La possibilité de conduire le faisceau de la sortie de l'accélérateur en un autre point de la salle a été étudiée:
- une optique courte composée d'un triplet en sortie de l'accélérateur puis d'un dipôle donnant une déviation de 65 degrés et d'un doublet final permettrait d'amener le faisceau jusqu'à un dispositif en salle 210 pour une utilisation autre que PARRNe.

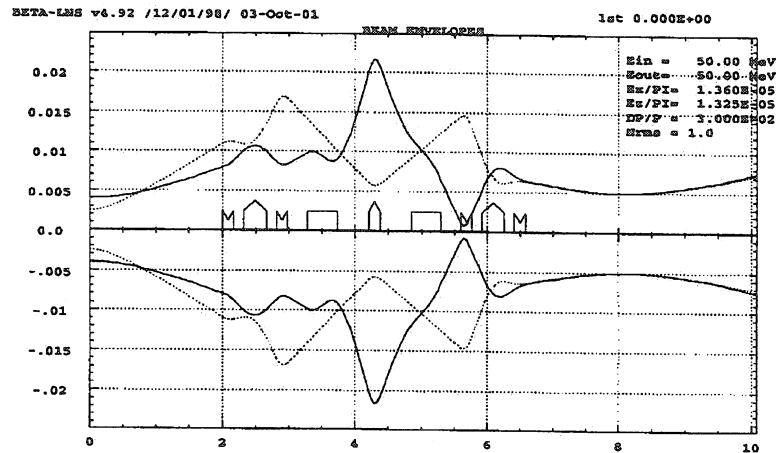
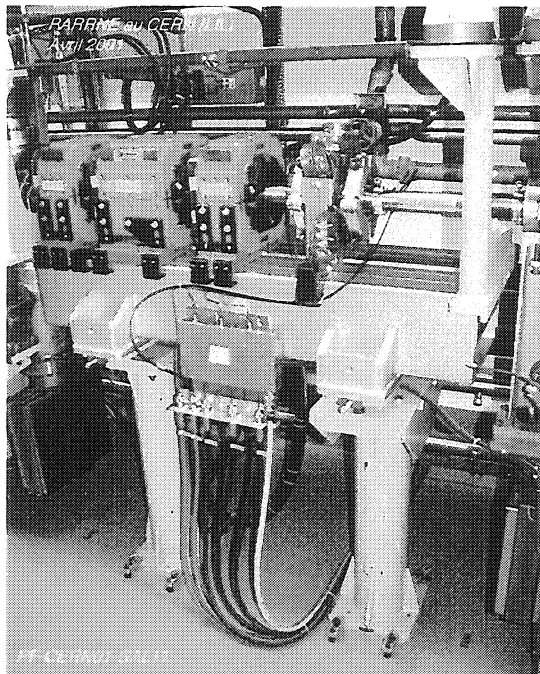


Fig.5 : Enveloppes du faisceau pour le cas : aimant secteur sans indice.



Vue partielle :
Le triplet en sortie de section accélératrice

7. Système du vide

La machine est équipée en ultravide avec des brides CF. Le pompage est de type ionique. Le système du vide s'étend depuis le canon jusqu'à la cible PARRNe mais incluant également le réseau de distribution HF.

Les sections principales qui sont séparées par des vannes sont les suivantes :

<i>Section</i>	<i>Pression (Torr)</i>	<i>pompage</i>
<i>le canon</i>	$< 2 \times 10^{-8}$	<i>1 x pompe ionique 240 l/s</i>
<i>Pré-groupeur et groupeur</i>	$< 10^{-7}$	<i>1 x pompe ionique 240 l/s</i>
<i>Réseau de distribution HF</i>	$< 10^{-7}$	<i>2 x pompe ionique 70 l/s</i>
<i>la section accélératrice</i>	$< 10^{-7}$	<i>2 x pompe ionique 240 l/s</i>
<i>La ligne de transport</i>	10^{-7}	<i>2 x pompe ionique 240 l/s</i>

On prévoit également un groupe de prévidage mobile, composé d'une pompe turbomoléculaire et d'un pompage sec. Les mesures de vide sont assurées par 8 ensembles de jauges (Pi+Pg+alim).

8. Contrôle & Commande

Le contrôle-commande général de l'accélérateur sera situé au pupitre du Tandem. Il sera indépendant du contrôle et commande Tandem. Les programmes seront développés sous le logiciel Labview et le logiciel Step7 pour les automates.

9. Planning prévisionnel

Nombre de mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Etude de l'infrastructure														
Appel d'offre/Commande														
Travaux de bâtiment/Aménagement des salles 310 et 210														
Canon														
Tests dans l'état actuel au LAL														
Modifications														
Tests après modifications														
Installation au Tandem														
Tests														
Sections														
Tests au LAL du prégroupes/groupeur														
Transport section ACS 11 du CERN au LAL														
Tests de la section au LAL														
Installation de l'ensemble des sections au Tandem														
Tests de l'ensemble														
Modulateur														
Etude des modifications														
Réalisation des modifications														
Approvisionnement														
Démontage/Remontage au Tandem														
Tests HF														
HF bas niveau														
Etude des besoins														
Réalisation des boîtes HF et pilote														
Test au LAL														
HF de puissance														
Etude														
Appel d'offre														
approvisionnement														
Test bas niveau														
Test de puissance														
Etude électronique de commande														
Réalisation électronique de commande														
Optique														
Calcul du transport														
Specifications techniques des aimants														
Commande et approvisionnement des aimants, triplets et singulet														
Tests chez le fabricant														
Etude et réalisation des déviateurs														
Etude des supports														
Réalisation des supports														
Reconditionnement ligne PARRNe														
Montage de la ligne d'optique														
Alimentations														
Etude des besoins														
Appel d'offre														
Réalisation														
Installation et tests														
Vide														
Etude des besoins														
Approvisionnement														
Etude de la machine et des chambre à vide														
Réalisations														
Montages et tests														
Baie de commandes et mesures														
Instrumentation														
Etude des besoins														
Approvisionnement														
Réalisations														
Tests														
Contrôle-Commande														
Etude														
Choix des systèmes et définition des paramètres														
Commande de matériels														
Réalisation des logiciels														
Tests														
Tests sur machine														
Installation salle de contrôle														
Interconnexions et sécurités														
Etude des sécurités														
Etudes des interconnexions														
Approvisionnement														
Réalisations														

Nombre de mois		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Canon	LAL/IPN												
Installation au Tandem													
Tests après modifications													
Sections	LAL/IPN												
Installation de l'ensemble des sections au Tandem													
Tests de l'ensemble au Tandem													
HF de puissance	LAL/IPN												
Approvisionnement													
Tests bas niveau													
Tests de puissance													
Etude de l'électronique de commandes													
Réalisation des commandes													
Optique	IPN												
Fabrication													
Tests chez le fabricant													
Reconditionnement ligne PARRNe													
Montage de la ligne d'optique													
Alimentations	IPN												
Réalisations													
Tests													
Installation et tests													
Instrumentation	IPN/LAL												
Tests													
Comande-Contrôle	IPN/TANDEM												
Réalisation des logiciels													
Tests													
Tests sur machine													
Installation salle de contrôle													
Interconnexions et sécurités	IPN												
Approvisionnement													
Réalisations													
Démarrage et Tests faisceau	IPN/LAL												

Pour respecter le planning général, en particulier celui des travaux liés à l'infrastructure qui est critique, il faudra tenir compte des trois considérations suivantes :

- Les délais administratifs pour passer un marché sont de six mois.
- Le planning d'utilisation du Tandem doit être respecté, en conséquence la durée des travaux d'infrastructure s'étalera sur une période d'un an. Les interventions sur le réseau électrique et sur le circuit d'eau désionisée seront programmées durant les arrêts du Tandem (deux semaines toutes les six semaines et pendant le mois d'août).
- Il s'avère ainsi indispensable de lancer les études d'infrastructure au plus tôt.
- Ce planning conduit à un engagement financier d'environ 60 % du coût total sur la première année.