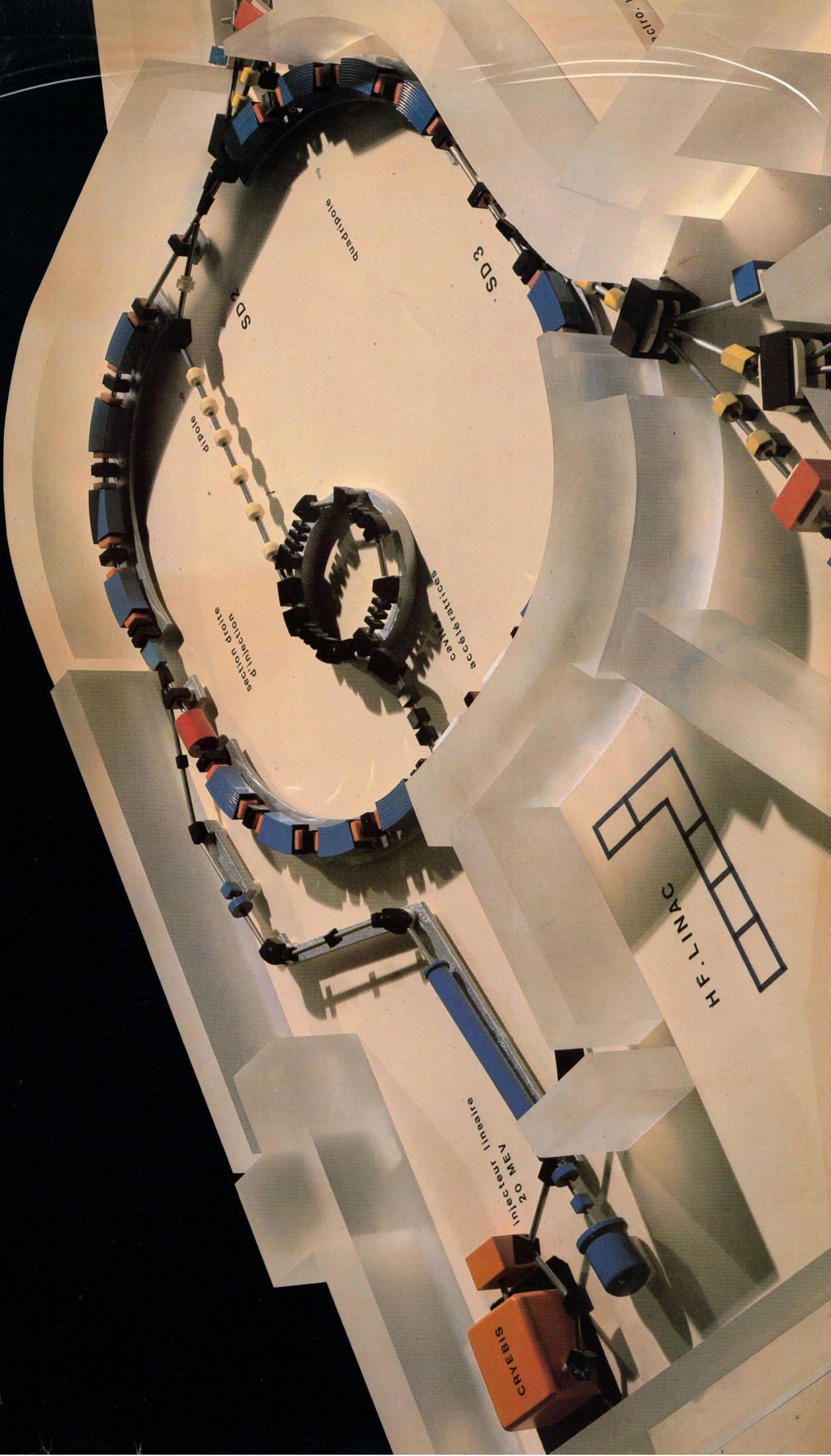
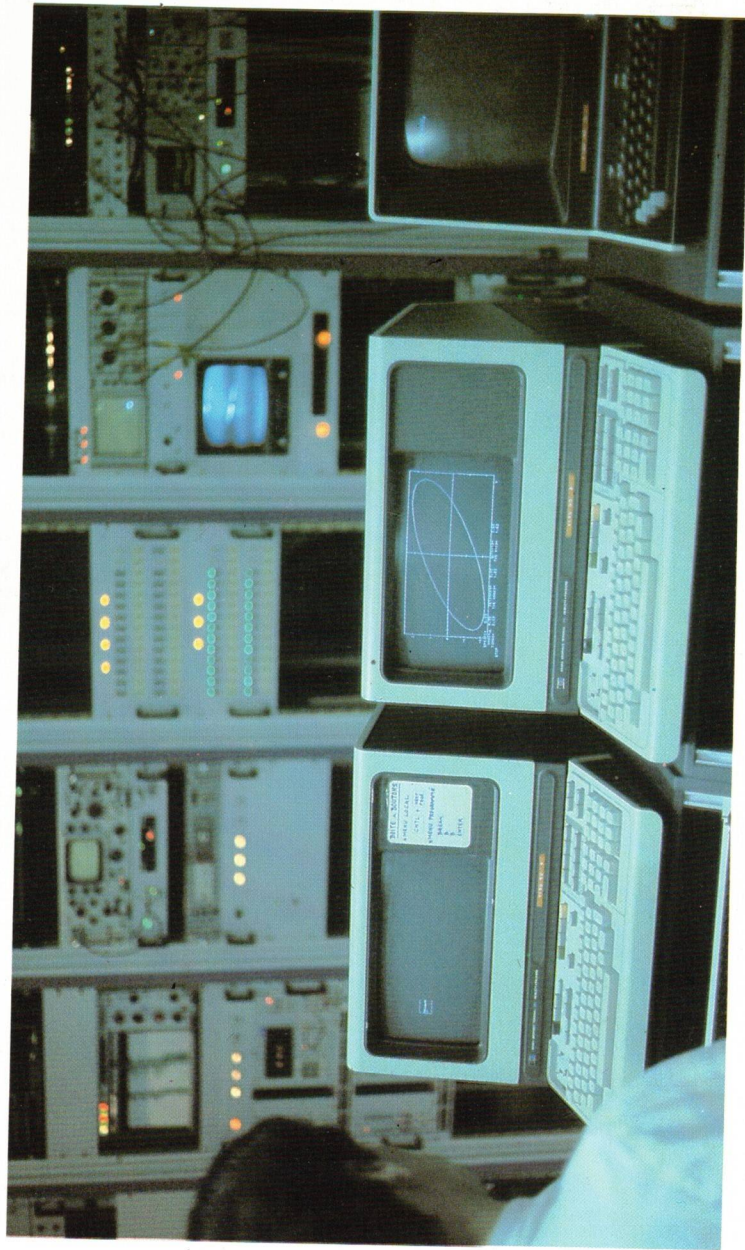


Laboratoire SATURNE

CEA I.N2.P3.





L'ACCELERATEUR DE PARTICULES ET LE LABORATOIRE NATIONAL SATURNE

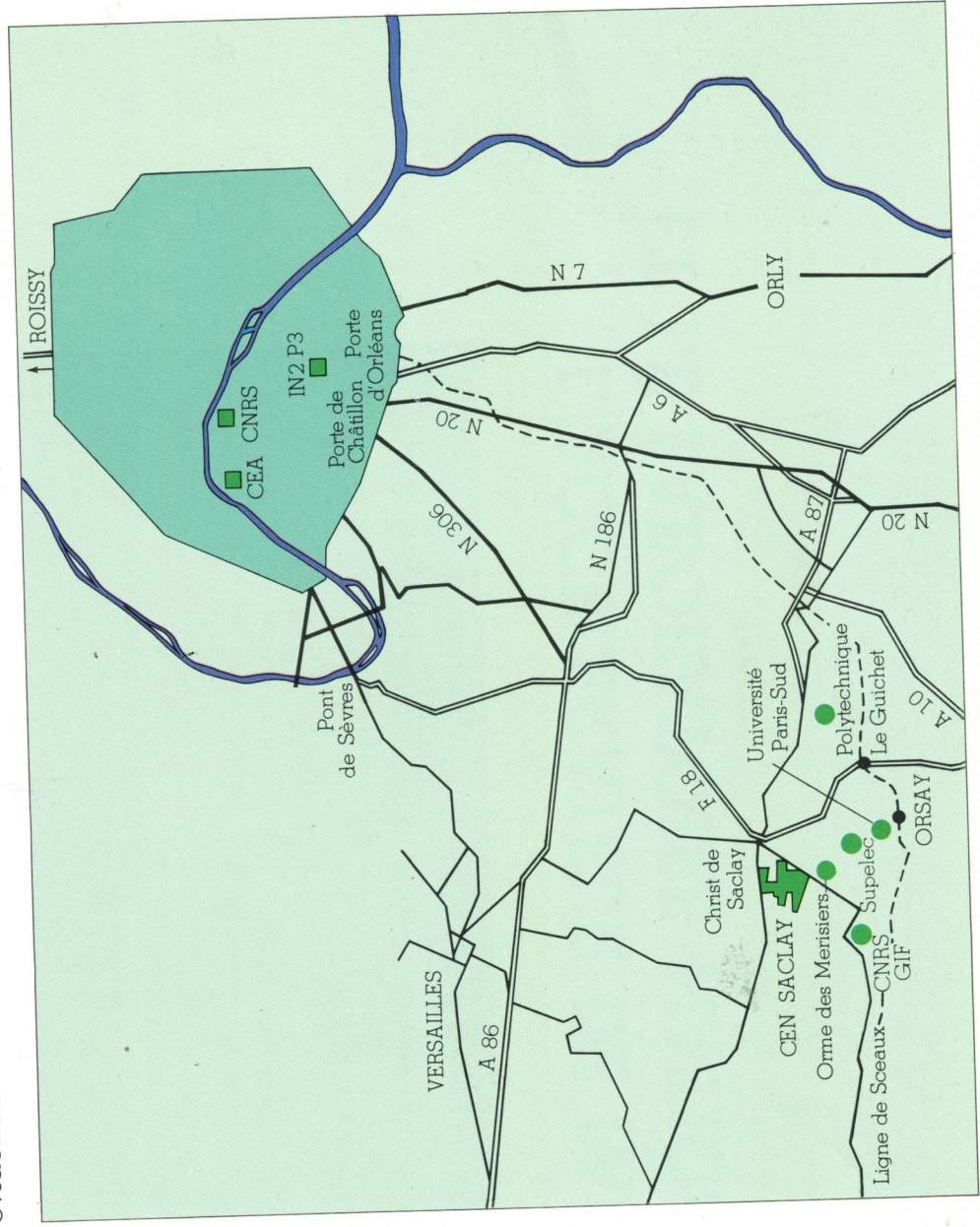
LE LABORATOIRE NATIONAL SATURNE

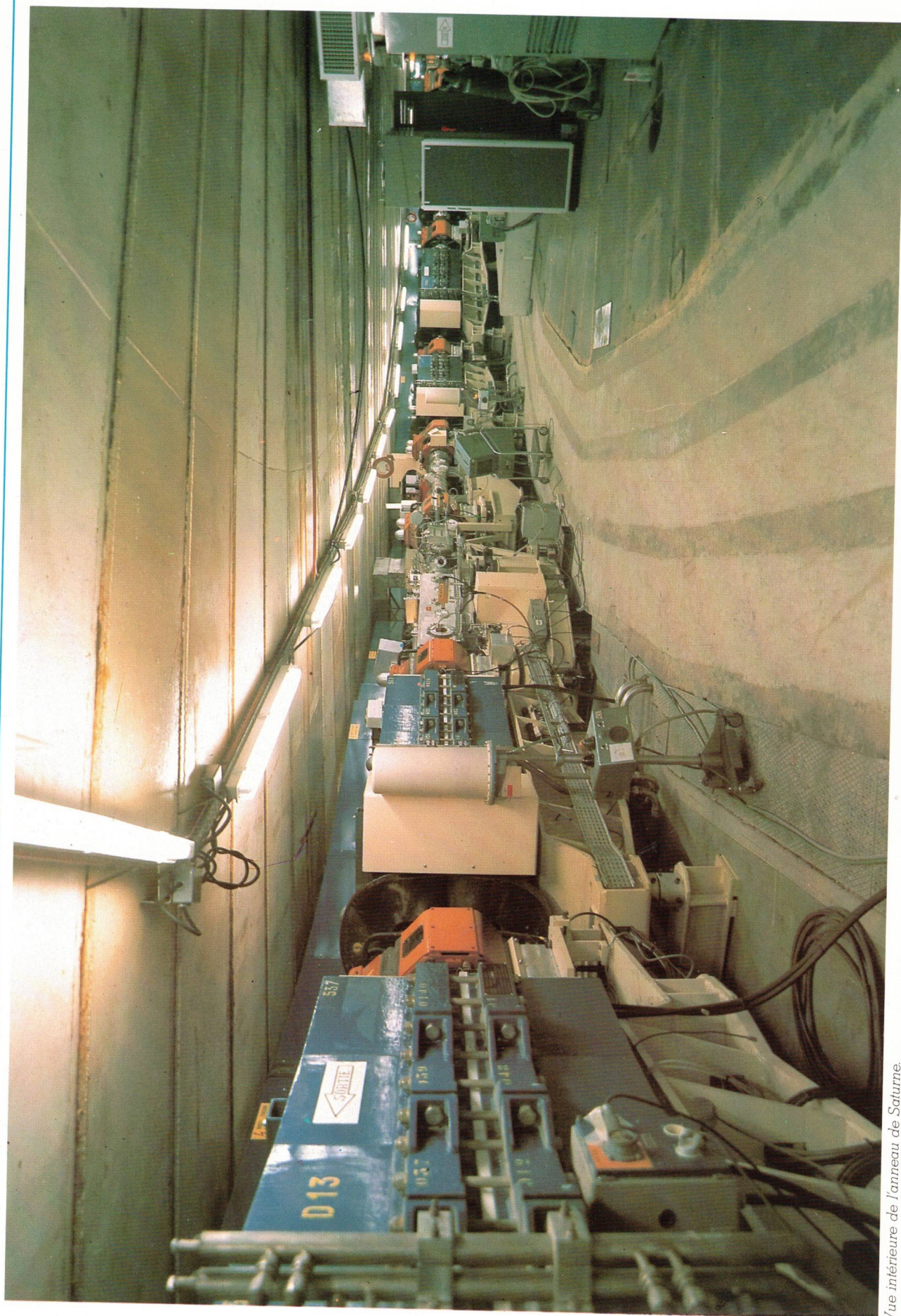
Le laboratoire national, constitué depuis janvier 1978 autour du nouvel accélérateur de particules Saturne et de ses installations annexes, est situé dans le Centre d'Études Nucléaires de Saclay, sur le plateau entre les vallées de la Bièvre et de l'Yvette, à 25 km de Paris. Il est géré conjointement par la Division de la Physique de l'Institut de Recherches Fondamentales du CEA et l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS. Le nouveau laboratoire est ouvert à tous les chercheurs, et en particulier aux physiciens nucléaires, qu'ils appartiennent au CEA, au CNRS ou aux Universités. C'est le premier laboratoire de ce type en France. Les utilisateurs proviennent de plus de 30 laboratoires ou centres de recherche français et étrangers.

A la place de l'ancien synchrotron utilisé essentiellement pour la physique des particules élémentaires de 1958 à 1977, le nouveau Saturne a été principalement construit pour la physique nucléaire des énergies intermédiaires, domaine privilégié pour l'étude de la structure des noyaux et des réactions nucléaires au moyen de différentes particules - projectiles ayant des vitesses voisines de celles de la lumière.

Dans ce domaine d'énergie, la longueur d'onde associée des particules-projectiles devient suffisamment petite pour explorer l'intérieur des noyaux et percevoir la structure de leurs constituants. Les

hautes énergies d'excitation qui peuvent être apportées aux noyaux permettent d'observer la matière nucléaire dans des conditions extrêmes. Nous sommes là à la charnière de la physique du noyau et de la physique des particules et de nouveaux processus peuvent être mis en évidence.





Vue intérieure de l'anneau de Saturne.

LE SYNCHROTRON SATURNE

Un synchrotron est un accélérateur à fonctionnement cyclique : un petit accélérateur linéaire injecte des particules à intervalles réguliers dans un anneau dans lequel on obtient l'essentiel de l'accélération ; le faisceau de particules est ensuite extrait vers les aires expérimentales.

L'accélérateur linéaire d'injection est précédé d'une source d'ions portée à un certain potentiel donnant une énergie de préaccélération. Saturne II possèdera trois sources d'ions : une source classique, Amalthee, pour les protons, deutons, noyaux d'hélium 3 et d'hélium 4, une source classique de polarisés et la source Cryebis, pour les ions lourds et les particules polarisées qui sera décrite plus loin.

Les éléments magnétiques entre la sortie de l'accélérateur linéaire et l'anneau du synchrotron constituent la ligne d'injection terminée par un "inflecteur" se raccordant à l'anneau (voir schéma p. 8 et 9).

La partie essentielle du synchrotron est constituée par l'anneau dans lequel les particules à accélérer tournent à rayon à peu près constant. Les particules sont maintenues sur une même orbite quasi-circulaire par une série d'aimants - les dipôles - et accélérées à chaque tour en passant dans des cavités haute fréquence ; comme elles vont ainsi à une vitesse de plus en plus grande, approchant peu à peu celle de la lumière, les cavités accélératrices doivent rester en phase et la haute fréquence correspondante

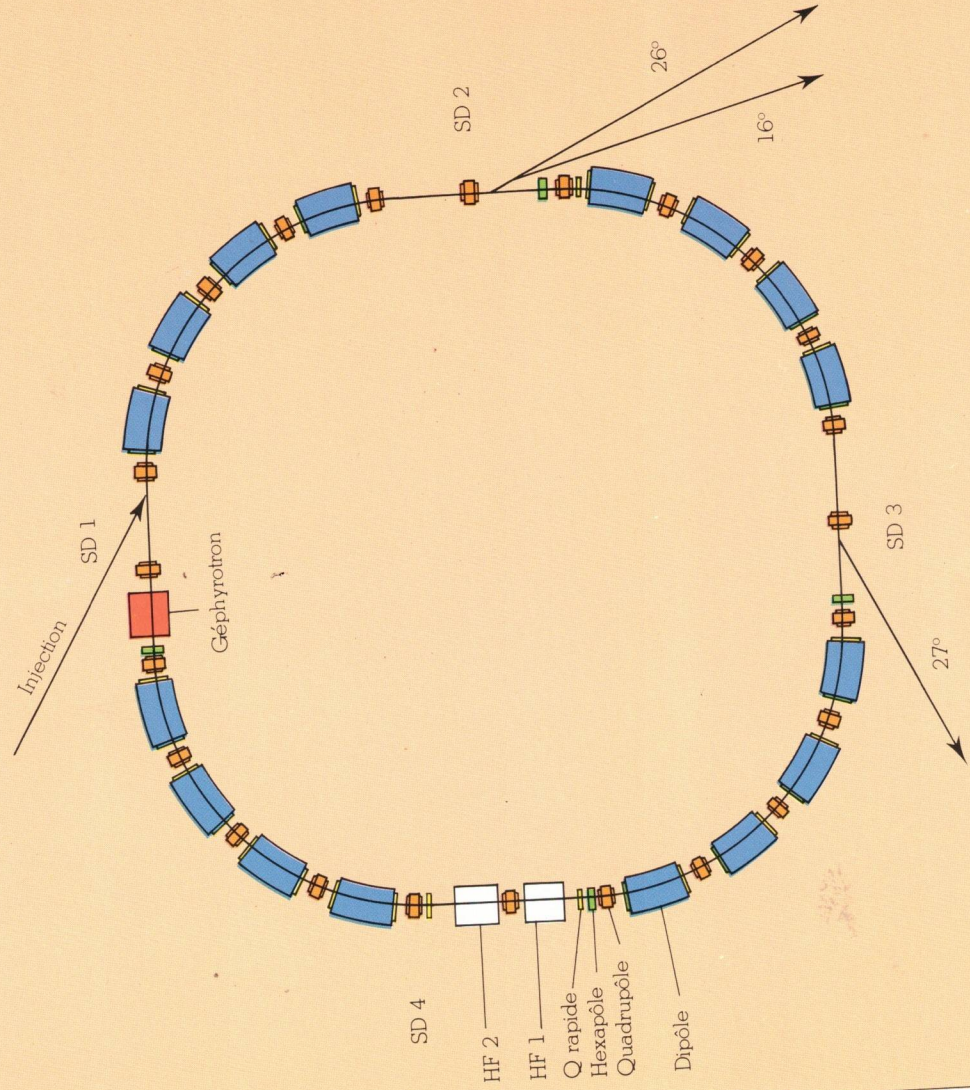


Schéma de l'anneau de SATURNE

Le champ magnétique doit augmenter aussi, au fur et à mesure, pour que le rayon de courbure des trajectoires demeure constant. Lorsque les particules ont acquis l'énergie désirée, on arrête l'accélération et le champ magnétique demeure à une valeur constante : c'est la période du déversement pendant laquelle on extrait les particules le plus régulièrement possible. On revient ensuite aux conditions initiales et à la phase

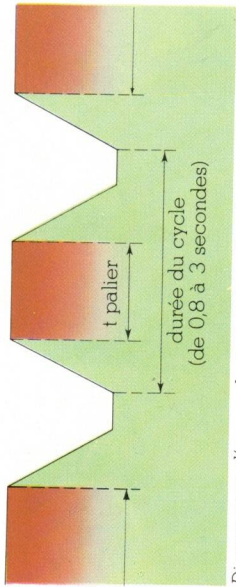


Diagramme d'un cycle à simple palier (extraction simple)

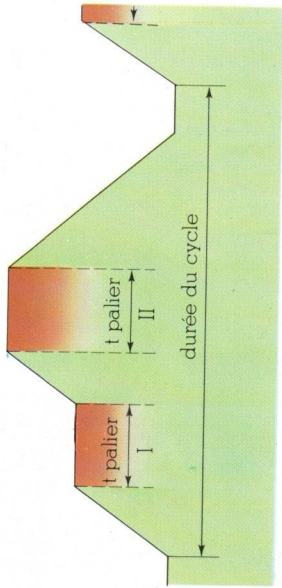
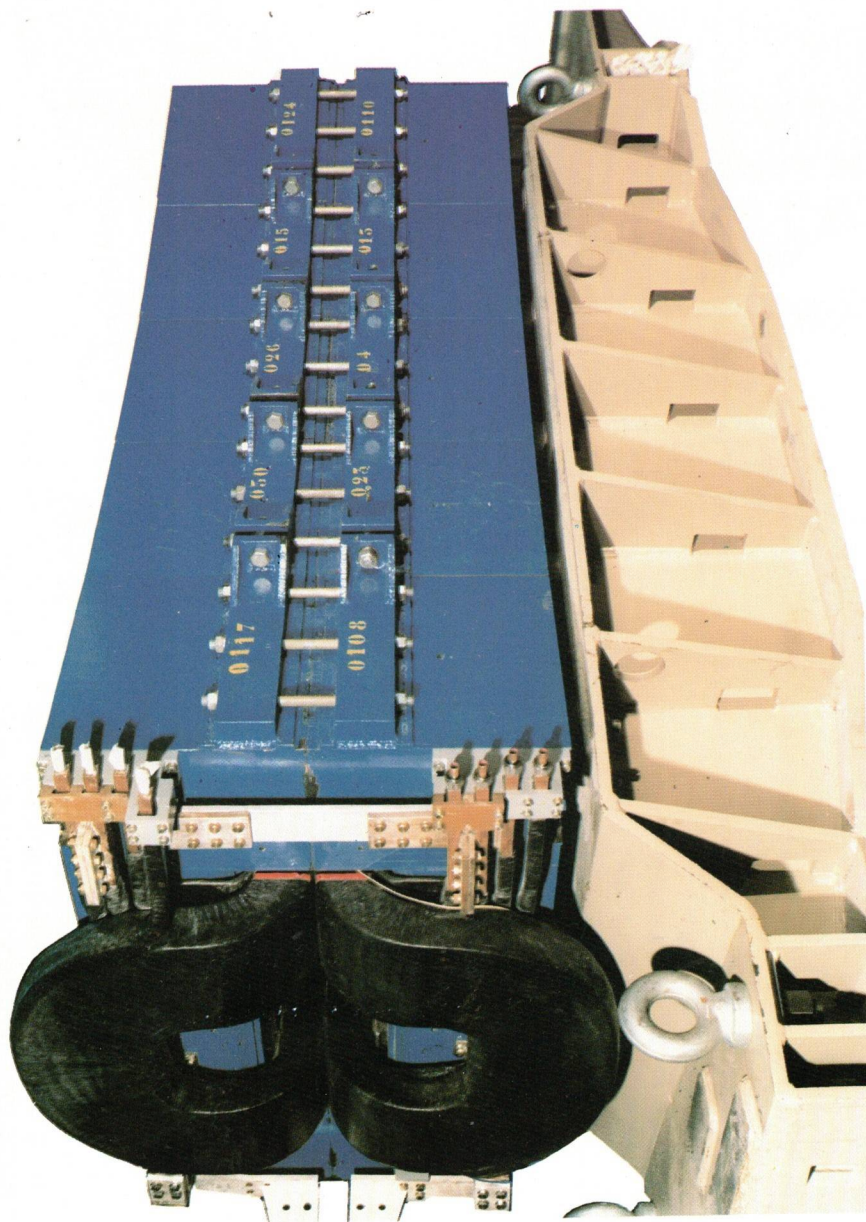


Diagramme d'un cycle à double palier (double extraction à deux énergies différentes)

d'injection. Un synchrotron peut être ainsi caractérisé par son cycle de fonctionnement (voir diagrammes ci-contre); on a en général intérêt à augmenter la fréquence de ces cycles pour gagner en intensité et à allonger la durée du palier pour obtenir un cycle utile plus élevé (le cycle utile est le rapport de la durée du déversement à la durée totale d'un cycle).

CARACTERISTIQUES DU SYNCHROTRON SATURNE	
Tension de préaccélération :	750 kV
Source Amalthee, protons	375 kV
Source Cryebis, ions lourds	188 kV
Cryebis, protons polarisés	
Energie d'injection protons (sortie linéaire)	20 MeV
Energie d'injection deutons, ³ He, alphas et ions lourds	5 MeV par nucléon
Rayon physique de l'anneau	16,8 m
Nombre de dipôles	16
Longueur de fer d'un dipôle	2,47 m
Entrefers des dipôles	0,14 m
Induction magnétique des dipôles	de 0,1 à 1,986 Tesla
Rayon de courbure magnétique	6,34 m
Nombre de quadrupôles	24
Nombre de sections droites	4
Longueur d'une section droite	8 m
Energie maximale protons	2,95 GeV
Energie maximale deutons	2,34 GeV
Energie maximale ³ He	5,24 GeV
Energie maximale alphas	4,7 GeV
Energie maximale ions lourds (de ⁶ Li ³⁺ à ¹⁰ A ¹⁸⁺)	1,15 GeV par nucléon (pour Z/A = 0,5)
Intensité contractuelle maximale interne à 1 GeV	2.10 ¹² protons/seconde
Taux d'extraction	environ 70 %
Dispersion en impulsion du faisceau extrait	± 3.5.10 ⁻⁴
Stabilité	meilleure que 10 ⁻⁴
Taux de répétition des cycles	de 1,2 par seconde à basse énergie à 0,3 par seconde à énergie maximale
Emission horizontale du faisceau extrait	8π mm. mrad
Emission verticale du faisceau extrait	de 10π mm. mrad à 25π mm. mrad
Cycle utile	40 % à 1 GeV 15 % à 2,7 GeV



Aimant dipôle.

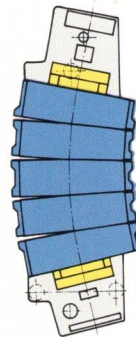
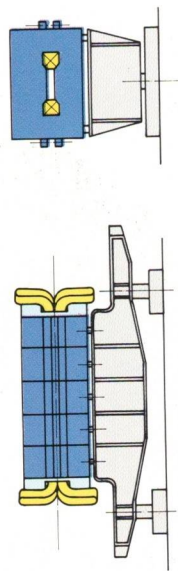
Il faut d'autre part que les particules, au cours de leur mouvement, s'écartent le moins possible de leur trajectoire d'équilibre afin notamment que la chambre à vide reste de section relativement petite et les aimants d'entrefer modeste. Pour parvenir à ce

résultat on utilise à Saturne une série de quadrupôles régulièrement espacés le long de l'anneau, alternativement focalisants et défocalisants (aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical). Saturne est ainsi un synchrotron à focalisation forte et à

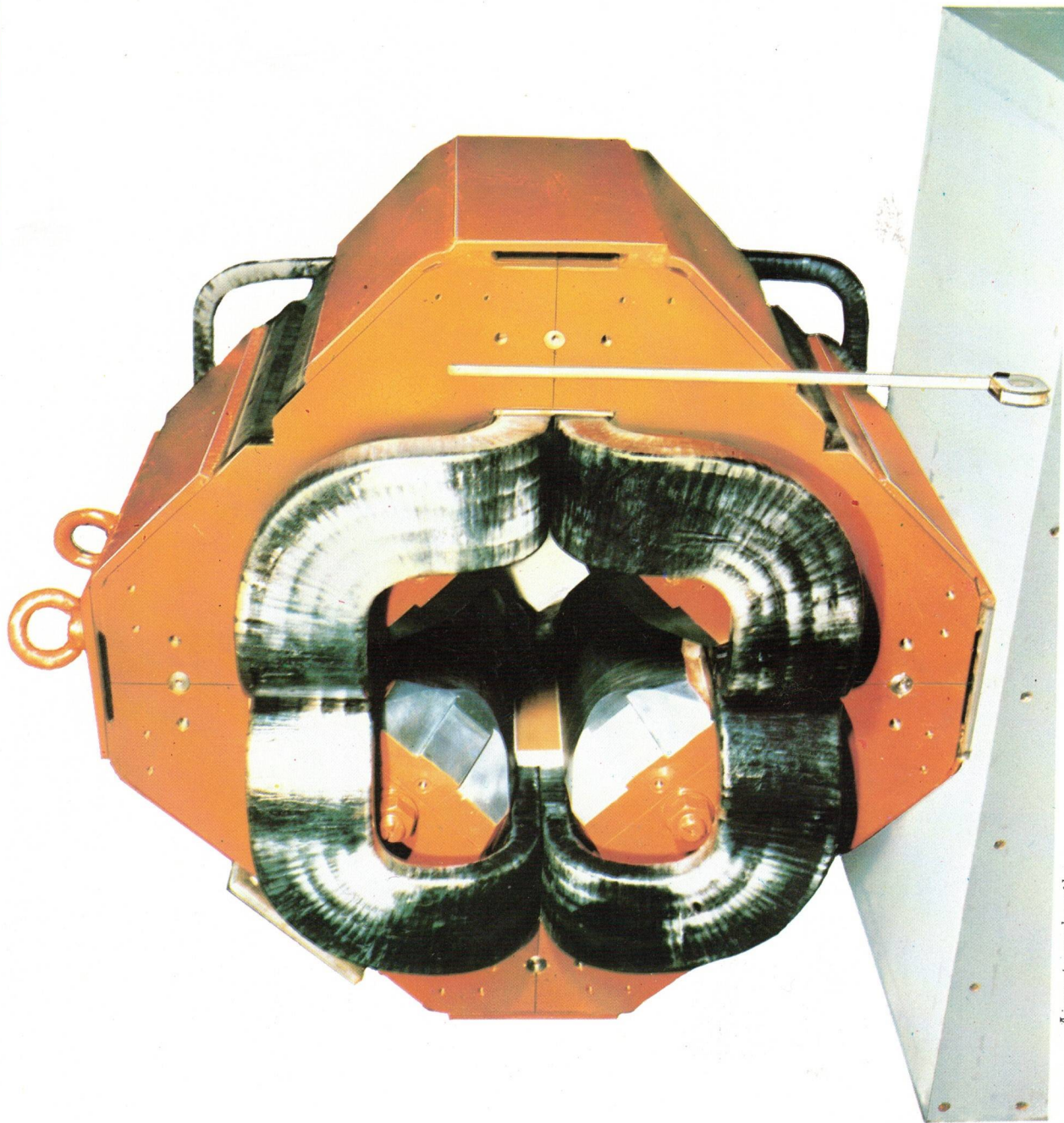
fonctions séparées, car les fonctions guidage (courbure) et focalisation sont assurées par des éléments magnétiques distincts: 16 aimants-dipôles (dont la section selon le rayon de l'anneau a une forme en H) et 24 aimants quadrupôles respectivement. Quatre longues sections droites sont insérées dans la maille: l'une comporte les 2 cavités accélératrices, une autre sert à l'injection dans l'anneau, enfin les deux autres sont utilisées pour l'extraction.

Le gain d'énergie par tour sur Saturne est de 2,8 keV; il faut donc un peu plus de 1 million de tours pour amener les protons à l'énergie maximale de la machine, soit environ 3 GeV.

L'extraction à Saturne est réalisée, après arrêt des cavités accélératrices HF en début de palier, par trois



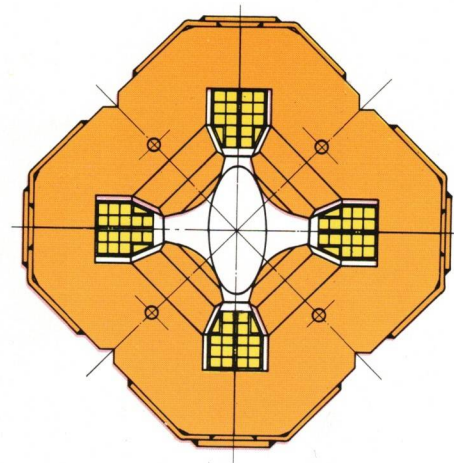
Élévation, coupe et plan d'un dipôle.



Aimant quadrupôle

opérations: - déformation de l'orbite et mise en oscillation des particules au voisinage d'une résonance au moyen d'aimants hexapolaires, - accélération (ou décélération) lente grâce à un dispositif particulier (analogue à un transformateur) appelé Géphyrotron - enfin, extraction de l'anneau en séparant les particules qui suivent une trajectoire perturbée instable de celles continuant à parcourir une orbite fermée, à l'aide de deux aimants à septum. De plus ce procédé d'extraction améliore la résolution en énergie du faisceau.

Il sera possible à Saturne d'extraire des particules à deux énergies différentes au cours d'un même cycle au moyen d'un double palier (voir diagramme p. 5), en utilisant alors simultanément les deux canaux d'extraction. Les différents paramètres de la machine sont contrôlés par informatique.



Coupe d'un quadrupôle.

LES AIRES EXPERIMENTALES DE SATURNE

Les aires expérimentales couvrent plusieurs milliers de m² de grands hangars et sont desservies par plusieurs ponts roulants. Elles comportent un certain nombre de lignes de faisceau et de casemates expérimentales organisées autour des deux extractions sud et est (voir figure). Chaque ligne de faisceau est constituée d'un certain nombre d'aimants dipôles de déviation et de quadrupôles pour focaliser le faisceau. Une grille de commutation permet de relier les alimentations disponibles (groupes tournants et alimentations statiques) aux différents éléments magnétiques; leur gestion est informatisée. Lignes et casemates sont entourées de blocs de béton pour assurer une protection biologique convenable contre les rayonnements et réduire le bruit de fond des expériences.

De petites chambres à fils permettent de mesurer en différents points les profils horizontal et vertical des faisceaux. Dans chaque cas, après traversée de la cible d'expérimentation (constituée par exemple par l'élément chimique dont on veut étudier les noyaux), le faisceau aboutit dans un "piège" de fer ou de plomb entouré de béton.

Sur les 7 casemates expérimentales actuellement prévues, 4 contiennent de l'équipement lourd: quatre spectromètres magnétiques, qui seront décrits plus loin, et un ensemble - destiné aux expériences nucléon-nucléon - constitué par une cible gelée

de protons polarisés (protons dont le spin, correspondant à une rotation autour d'un axe moyen, a une orientation bien définie) et un solénoïde permettant de faire tourner les spins des particules polarisées du faisceau incident. Les trois spectromètres SPES I, SPES II et SPES III peuvent tourner autour des cibles qui leur sont associées; SPES II et SPES III peuvent être utilisés en coïncidence sur une même cible. Le quatrième spectromètre, SPES IV, est fixe: dans ce cas c'est l'angle d'incidence du faisceau sur la cible qui peut être modifié dans certaines limites.

Deux expériences peuvent avoir lieu simultanément dans deux casemates situées respectivement sur les deux extractions; en même temps, certains tests (préparations d'expériences ou essais de certains instruments) peuvent être faits dans d'autres casemates sur des faisceaux parasites constitués à cet effet. Un des faisceaux parasites, aboutissant à la casemate dite de basse énergie, à l'est, peut être utilisé en permanence.

Il sera également possible de disposer, dans la casemate qui abritera SPES II et SPES III, d'un faisceau de π^+ d'énergie bien définie, comprise entre 300 MeV et 1 GeV, obtenu sur une cible d'hydrogène - ou hydrogénée - au moyen de la réaction: $p + p \rightarrow d + \pi^+$. Par ailleurs, on peut réaliser des faisceaux de neutrons par cassure de deutons; un tel faisceau est utilisé dans les expériences nucléon-nucléon.

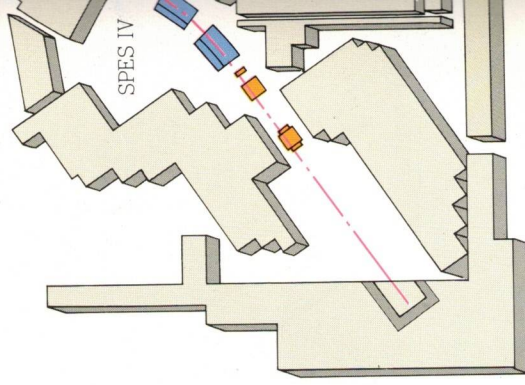
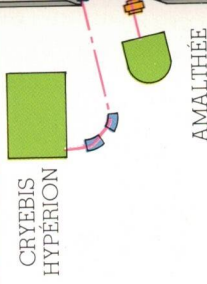
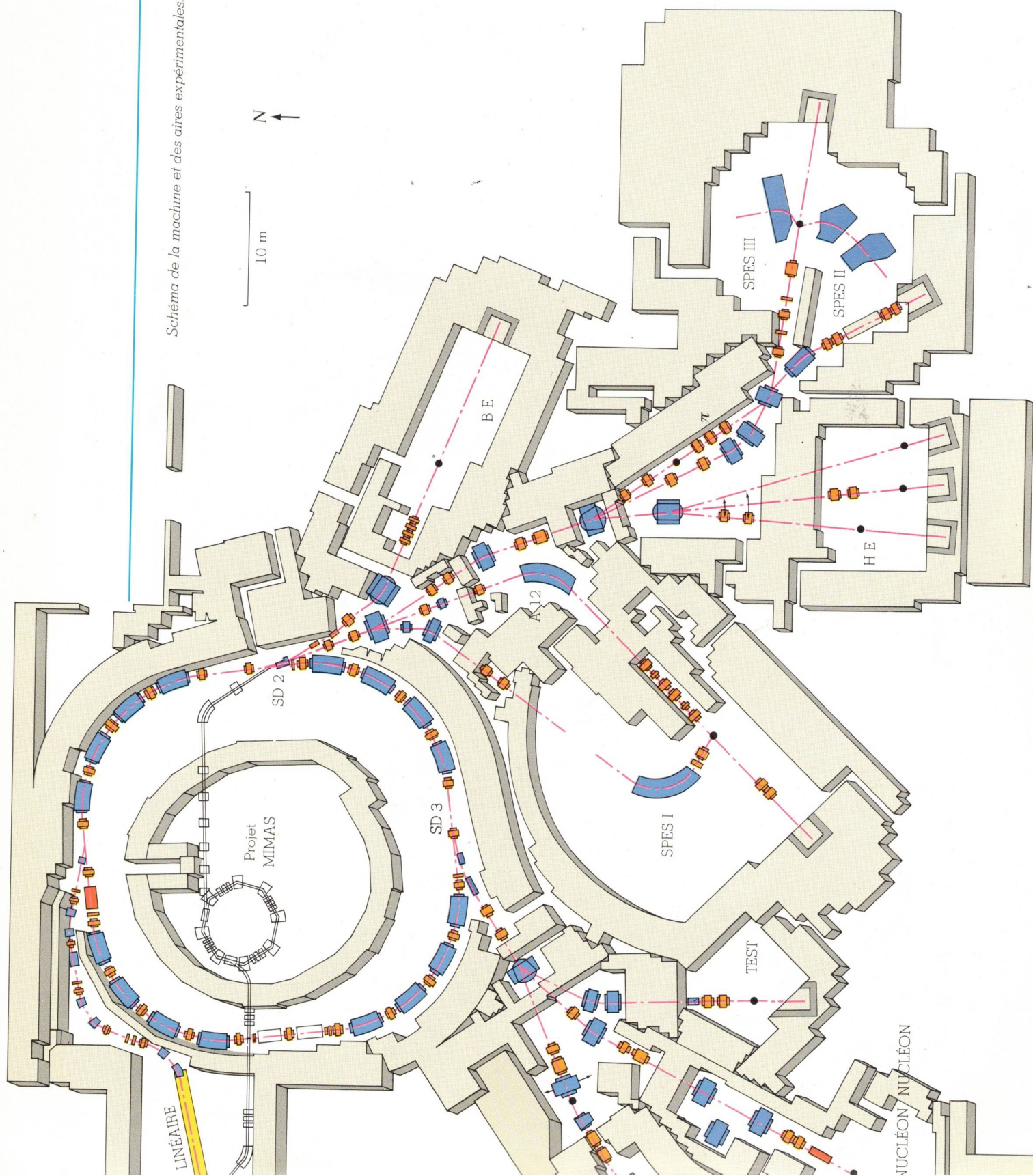


Schéma de la machine et des aires expérimentales.

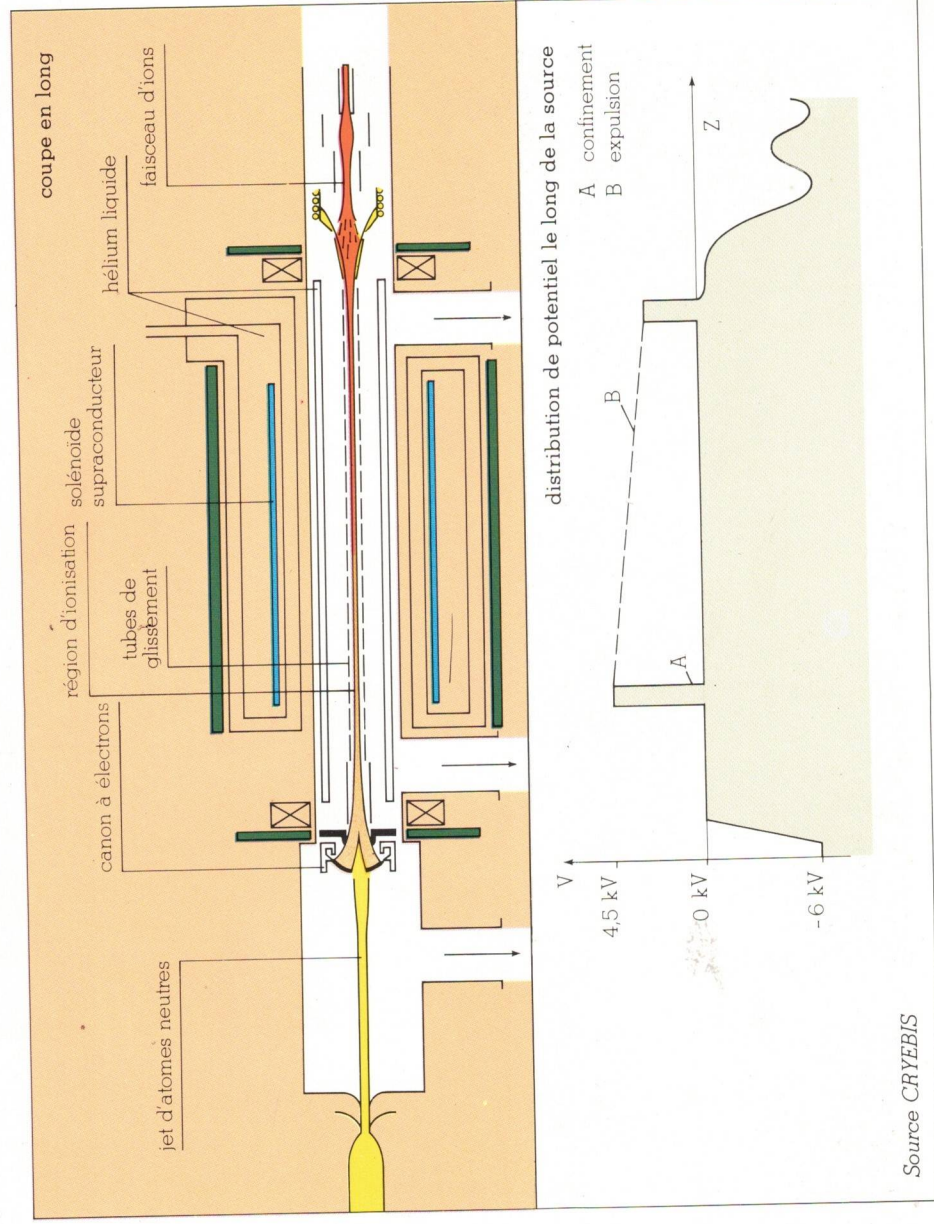


PRINCIPAUX EQUIPEMENTS

LA SOURCE D'IONS CRYEBIS

Cryebis est une nouvelle source d'ions à confinement électronique construite spécialement pour Saturne par un groupe d'ingénieurs et de techniciens d'Orsay d'après une idée originale de E.D. Donetz de Dubna. Elle est constituée par un solénoïde supraconducteur travaillant à la température de l'hélium liquide et créant, dans une zone cylindrique centrale d'environ 1,50 mètre de longueur, un fort champ magnétique de 3 Teslas. Des électrodes cylindriques sont placées tout le long de la structure dans une enceinte ultra-vide. Une baignoire de potentiel est peu à peu remplie d'ions, épluchés pas à pas de tous leurs électrons par un fort courant d'électrons qui traverse la structure selon son axe (voir schéma). Ce faisceau d'électrons a également pour effet de "piéger" les ions dans le puits de potentiel de charge d'espace. La baignoire remplie d'ions complètement épluchés est vidée d'un seul coup par le relèvement rapide de son fond. L'ensemble de la source est placé sur une plate-forme haute-tension (375 kV pour les ions lourds et 187 kV pour les protons polarisés) qui assure une certaine énergie de départ aux ions extraits périodiquement de la source pour être injectés dans l'accélérateur linéaire.

Pour produire des protons ou des deutons polarisés, des atomes neutres polarisés sont injectés dans Cryebis où ils sont épluchés de leurs électrons avec un rendement très important. Une source classique de particules polarisées peut être également utilisée parallèlement à Cryebis, sur la même plate-forme. L'ensemble a été baptisé Hypérion.



Source CRYEBIS

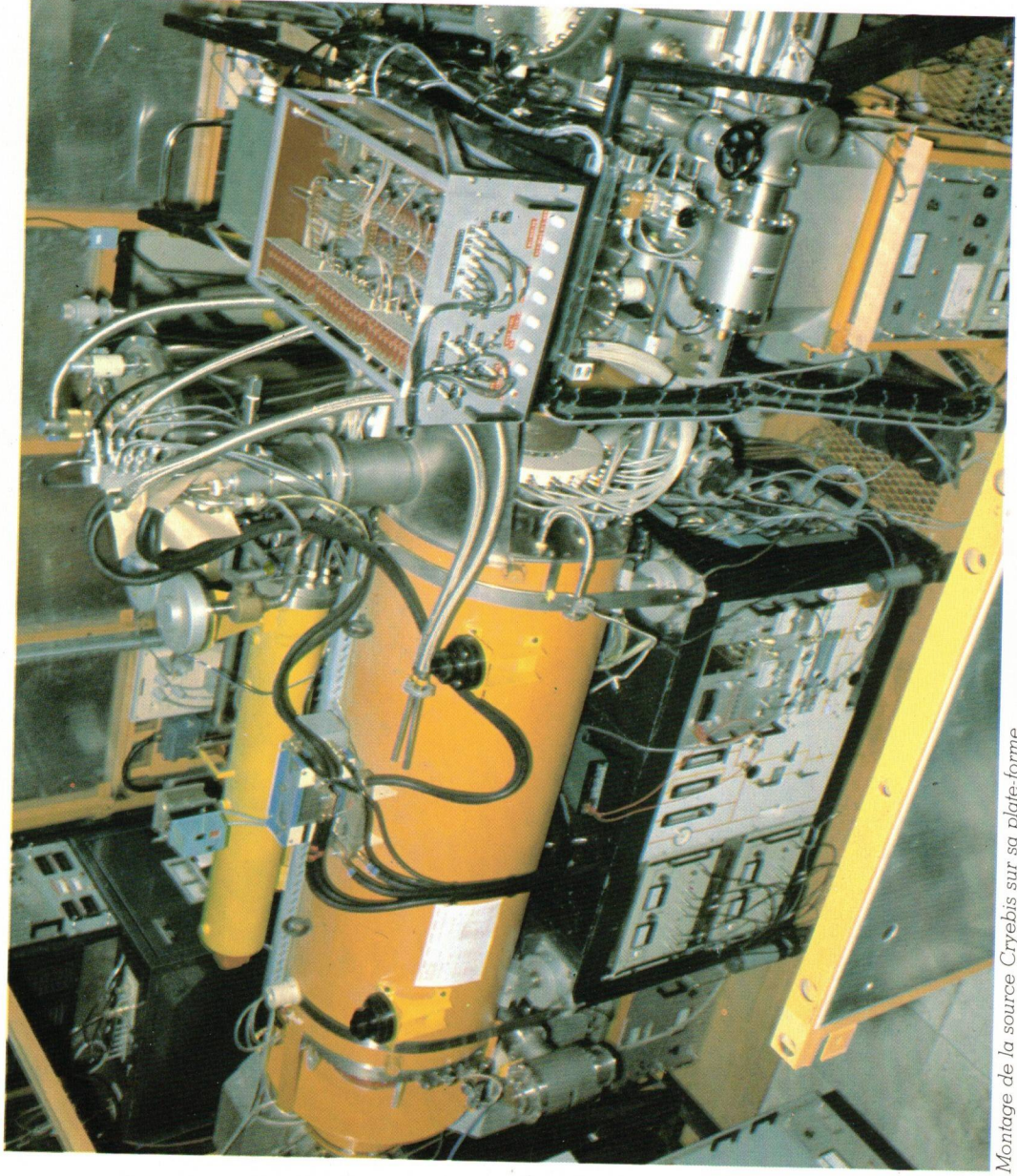
On voit que Cryebis fonctionne par impulsions; un tel mode est bien adapté à un synchrotron. Des ions Ne^{10+} et Ar^{18+} (c'est-à-dire complètement épluchés) peuvent être obtenus en moins de 10 ms. Compte tenu du rendement total

entre source et faisceau extrait, on pense pouvoir utiliser sur les cibles des expériences quelques 10^8 noyaux de Ne^{10+} par exemple ou de l'ordre de quelques 10^9 protons polarisés par impulsion.

LE PROJET MIMAS

On peut faire mieux grâce aux possibilités de cyclage rapide de Cryebis, en utilisant plusieurs impulsions de Cryebis pour chaque impulsion de Saturne.

A cette fin a été élaboré le projet Mimas (satellite le plus proche de la planète Saturne, ou encore: "Machine à Intensité Maximale par Accélération et Stockage"). Mimas est un petit synchrotron de 5,4 mètres de rayon, placé au milieu du grand anneau; les impulsions de Cryebis sont injectées, stockées puis pré-accelérées dans Mimas avant d'être introduites dans Saturne, sans passer par l'accélérateur linéaire d'injection classique. L'objectif du projet Mimas est triple: a) gagner un facteur d'environ 100 sur l'intensité des particules polarisées, b) gagner un facteur d'environ 50 sur l'intensité des ions lourds "légers", c) permettre l'accélération d'ions plus lourds - sans doute jusqu'au xénon - en s'affranchissant des limitations de transmission du linéaire qui ne peut pas accélérer des ions de rapport charge sur masse inférieur à 0,43.



Montage de la source Cryebis sur sa plate-forme

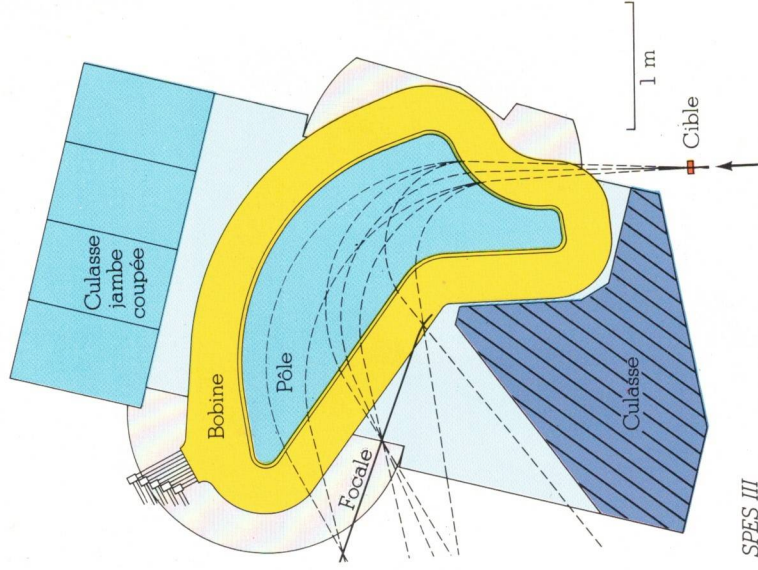
LES SPECTROMETRES

Les quatre spectromètres magnétiques - baptisés SPES - constituent une des originalités du laboratoire Saturne. Leur emplacement est indiqué sur le plan des aires.

Un spectromètre permet de déterminer avec une grande précision l'impulsion d'une particule émise à un angle donné par rapport au faisceau incident. Un ensemble de détection est situé dans la région du plan focal du spectromètre à l'abri du bruit de fond dû au faisceau primaire. L'énergie de la particule est déduite de son impulsion quand son identité est connue. Les caractéristiques essentielles d'un spectromètre sont sa dispersion (analogue à celle d'un prisme en

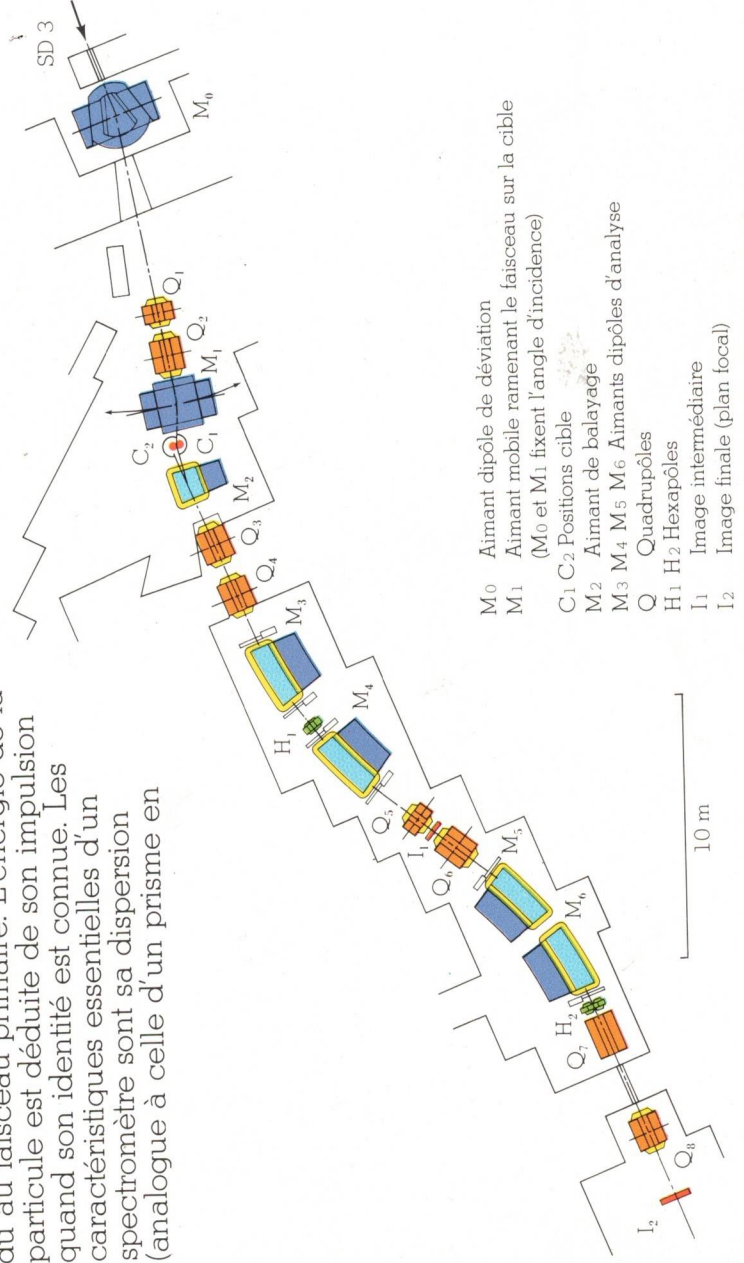
optique), sa résolution en énergie, la bande en impulsion qu'il permet d'analyser en une fois, l'impulsion maximum qu'il permet d'atteindre, l'angle solide qu'il permet de couvrir (autour de l'angle moyen considéré) et le domaine angulaire dans lequel il peut être utilisé.

Les deux premiers spectromètres ont déjà été utilisés auprès de Saturne I. Le premier construit, SPES I, possède une résolution en énergie particulièrement bonne, meilleure que 100 keV pour 1 GeV. SPES II et SPES III allient un



SPES III

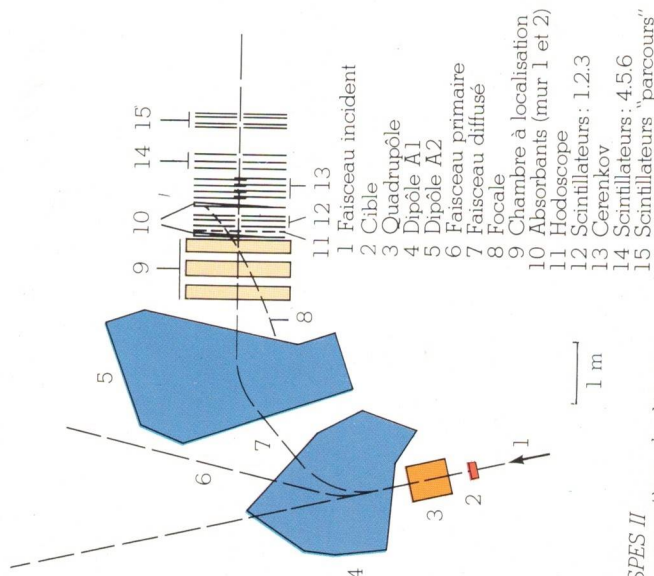
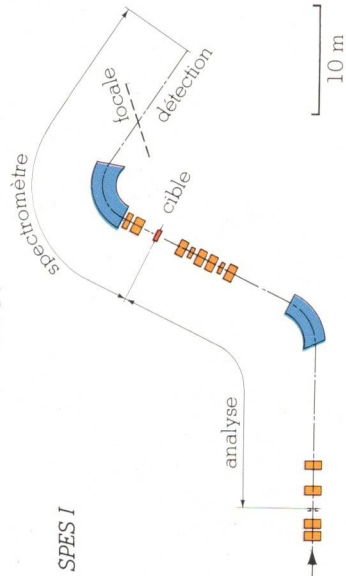
grand angle solide (grande ouverture angulaire) et la possibilité d'analyser simultanément un large spectre en impulsion ; plusieurs particules peuvent être détectées en même temps dans le plan focal de ces spectromètres. SPES II a été prêt pour des expériences au CERN à Genève pendant la période de construction du nouveau Saturne. SPES III, dont la construction doit être achevée fin 1980 est réalisé à partir de la culasse du vieux cyclotron de Saclay. SPES IV, quant à lui, permet de faire des mesures jusqu'à l'impulsion maximum de



SPES IV

l'accélérateur, soit environ 3,8 GeV/c; il est constitué d'une succession d'éléments magnétiques dont les dipôles proviennent de l'ancien Saturne.

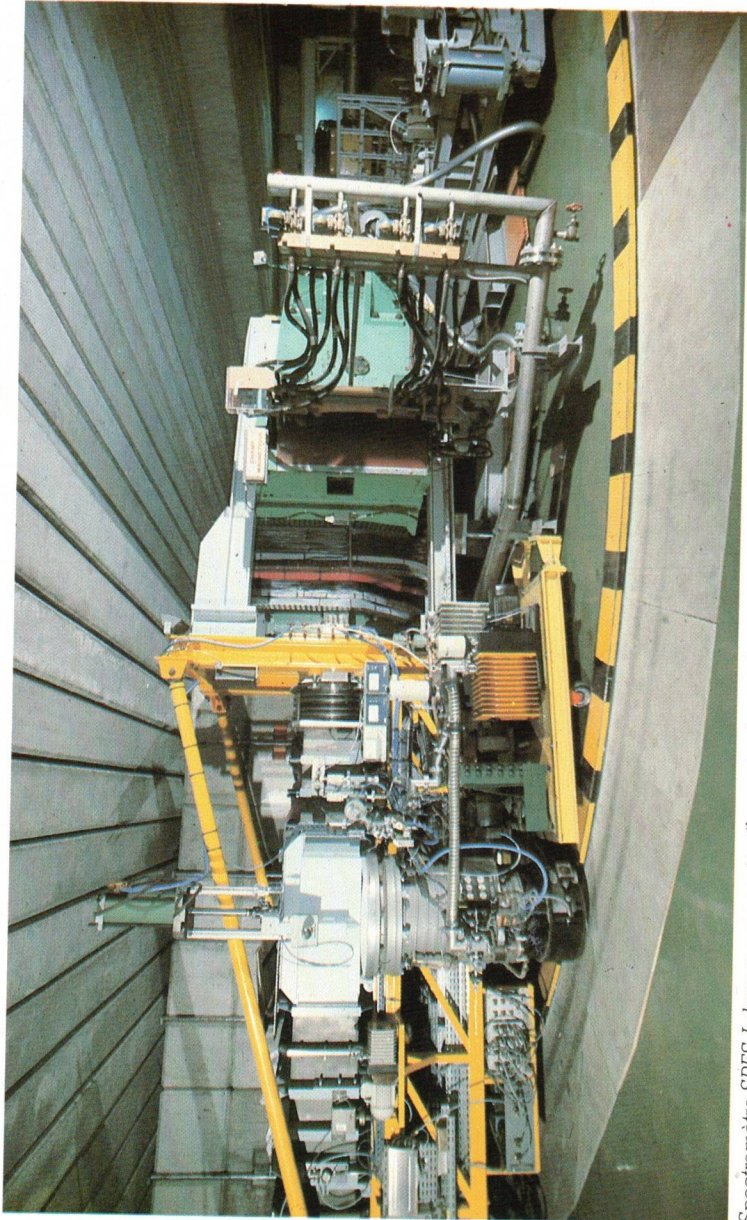
Les caractéristiques principales des quatre spectromètres sont données dans le tableau ci-contre:



CARACTERISTIQUES DES SPECTROMETRES

	Domaine angulaire	Angle solide	Résolution en impulsion	Impulsion maximale	Bande en impulsion analysée $\Delta p/p$	Dispersion pour $\Delta p/p=1\%$
SPES I	0° à 80°	$3 \cdot 10^{-3}$ sr	$0,7 \cdot 10^{-4}$	2 GeV/c	4 %	15 cm
SPES II	0° à 60°	$2 \cdot 10^{-2}$ sr	$3 \cdot 10^{-4}$	0,75 GeV/c	34 %	3 cm
SPES III	-5° à +80°	10^{-2} sr	$5 \cdot 10^{-4}$	1,4 GeV/c (champ fixe)	0,6 à 1,4 GeV/c	~ 1,4 cm
SPES IV	-9° à +17° -0,5° à +39°*	$\left\{ \begin{array}{l} 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ sr} \\ 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ sr} \end{array} \right.$	$3 \cdot 10^{-4}$ 10^{-3}	3,8 GeV/c	1 % 8 %	~ 8,0 cm ~ 7,0 cm

(*) Selon la position de la cible et l'impulsion du faisceau incident



Spectromètre SPES I dans sa casemate. (les particules analysées arrivent de la droite).

PRINCIPALES ORIENTATIONS DES RECHERCHES AUPRES DE SATURNE

Les recherches en physique nucléaire à Saturne suivent quatre directions principales :

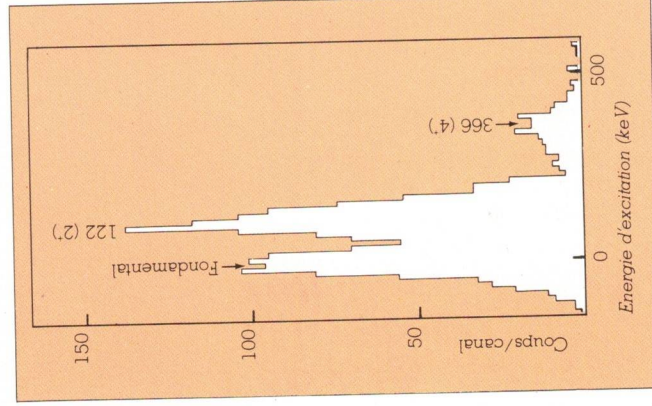
a - L'étude des forces entre nucléons, en particulier proton-proton et neutron-proton. Ces forces ne sont pas bien connues au dessus de 700 MeV et pourtant leur connaissance est essentielle pour comprendre l'échange de mésons π (pions) et de résonances mésoniques entre nucléons, pour déterminer la partie répulsive à courte distance de l'interaction forte et préciser l'interaction nucléon-nucléon fondamentale pour tous les calculs de physique nucléaire.

b - L'interaction nucléon-nucléon étant très forte, il est souvent difficile en physique nucléaire de séparer dans un phénomène observé ce qui est dû au mécanisme de la réaction nucléaire et ce qui correspond à la structure des noyaux. On pense y parvenir plus aisément à grande énergie, dans le domaine couvert par Saturne. La longueur d'onde associée des projectiles étant plus courte on peut explorer des dimensions plus petites et on atteint également des impulsions relatives plus grandes. Plusieurs expériences auprès de Saturne visent l'étude précise de la distribution spatiale de la matière nucléaire

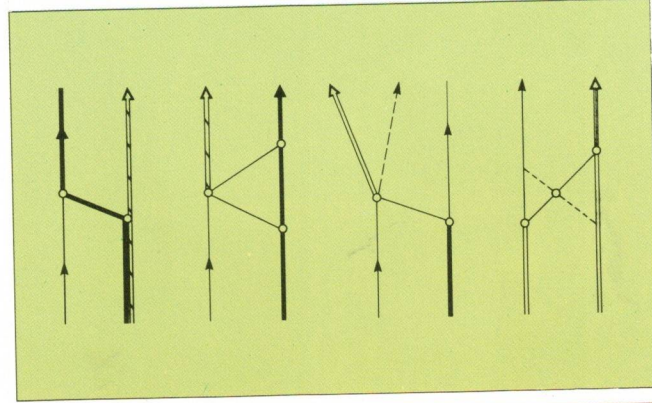
dans les noyaux, les corrélations à courte portée, les grandes impulsions.

c - Protons et neutrons en interagissant échangent des pions et différentes résonances; les nucléons dans le noyau peuvent se trouver pendant une certaine fraction de temps sous forme de nucléons excités (résonances nucléoniques, baptisées Δ et N^* , capables de se désintégrer en nucléons et pions). Lorsque l'énergie est suffisante ces différentes résonances virtuelles peuvent devenir réelles et on peut alors les observer directement. Les expérimentateurs se proposent de remonter à la probabilité de présence de ces résonances dans les noyaux et d'étudier leur production et leurs interactions; leur vie est tellement brève qu'elles ne peuvent interagir que dans le noyau même où elles ont été créées. D'autres particules éphémères telles que les particules étranges (mésons κ et hypérons Λ) peuvent également être produites dans les noyaux aux énergies accessibles à Saturne.

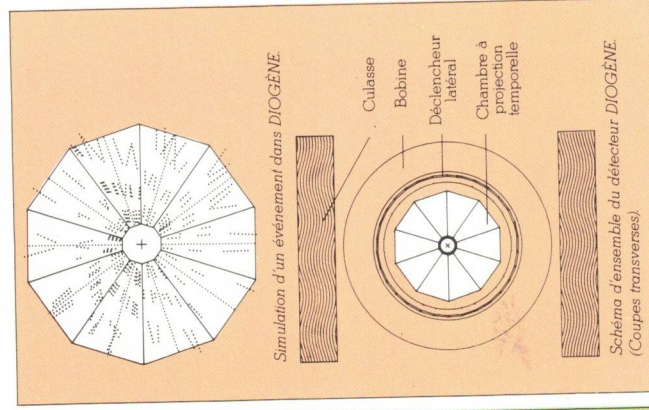
d - Avec des ions lourds relativistes, c'est-à-dire avec des projectiles plus lourds que les noyaux d'hélium, de quelques centaines de MeV à 1 GeV par nucléon, il semble possible d'obtenir de la matière nucléaire dans des conditions physiques extrêmes: matière nucléaire très chaude, très excitée, et matière nucléaire de densité supérieure à la normale; on s'attend éventuellement dans ce domaine à l'apparition de processus d'un type nouveau: condensés de pions, nouvelles formes de matière nucléaire,



Spectre de diffusion élastique et inélastique à 10° $1/4$ de protons de 1,04 GeV par le samarium 152.



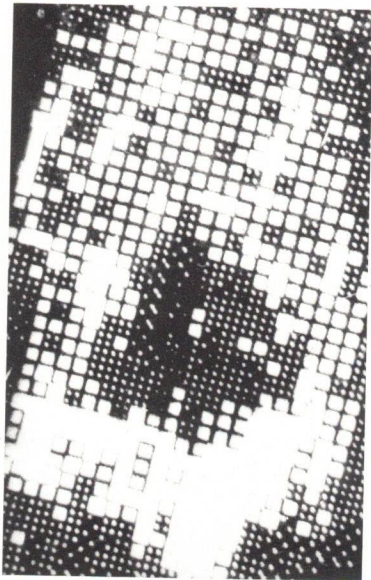
Diagrammes de quelques réactions étudiées à Saturne.



Dioène : dispositif à grand angle solide capable de détecter en coïncidence un grand nombre de particules chargées.



Coupe horizontale de la colonne vertébrale obtenue par rayons X

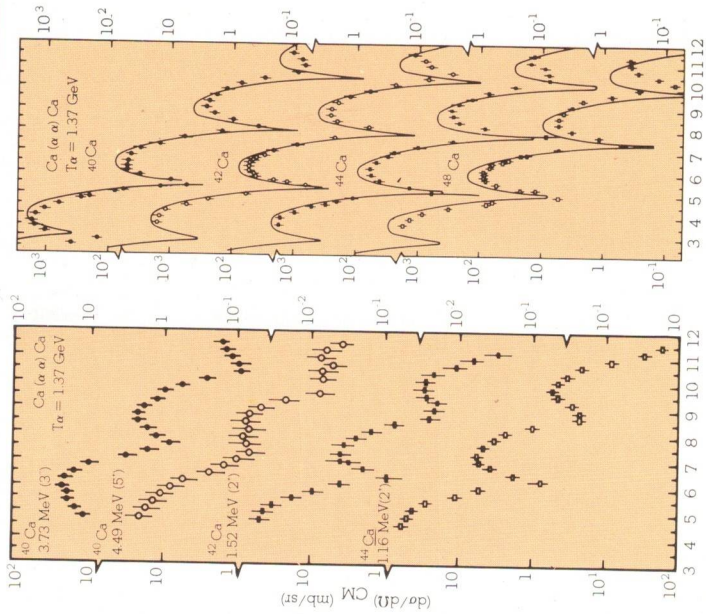


Coupe horizontale de la colonne vertébrale obtenue par diffusion de protons.

recombinaisons de quarks. Dans la nature, des conditions de ce genre sont peut-être atteintes dans certaines étoiles.

Indiquons également quelques sujets dans des domaines autres que la physique nucléaire, abordés à Saturne :

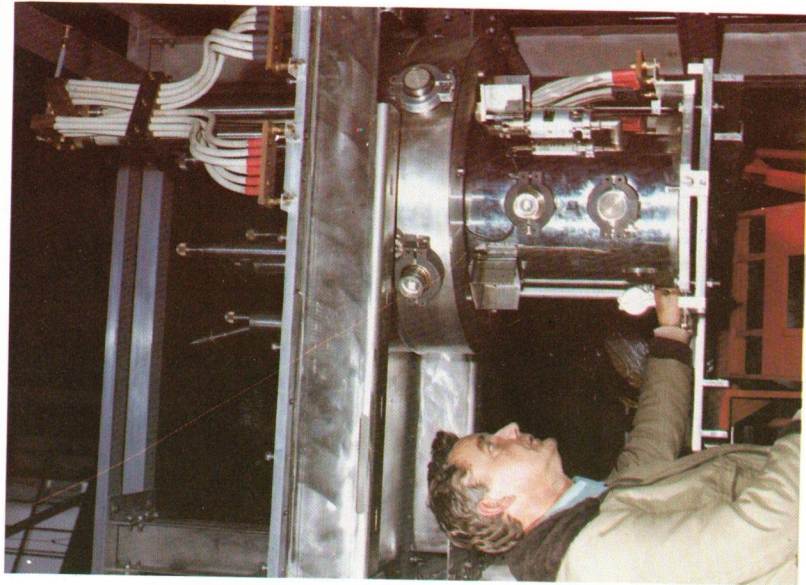
- Tests d'appareillages construits pour



Distributions angulaires de la diffusion de particules alpha de 1,37 GeV par des noyaux de différents isotopes du calcium.

la physique des particules auprès d'autres accélérateurs.

- Mise au point et étalonnage de détecteurs de particules du rayonnement cosmique pour la physique spatiale, qui seront embarqués à bord de sondes spatiales.
- Etudes de réactions nucléaires intéressantes pour l'astrophysique.
- Radiobiologie et radiographie au moyen de protons et d'autres projectiles fournis par Saturne : ainsi des coupes radiographiques ont pu être obtenues, montrant en particulier la distribution des molécules hydrogénées dans les tissus.



Mise en place du solénoïde de polarisation de la cible gelée des expériences nucléon - nucléon.

COMMENT SE DEROULE UNE EXPERIENCE

Une idée d'expérience apparaît au sein d'une équipe déjà constituée ou donne lieu à la formation d'une collaboration nouvelle. En général elle surgit à la suite d'une expérience antérieure - faite souvent dans un autre laboratoire - à la suite d'une discussion ou d'une proposition théorique. L'idée est précisée, les objectifs à atteindre et les motivations sont définis. La méthode expérimentale et l'instrumentation sont choisies.

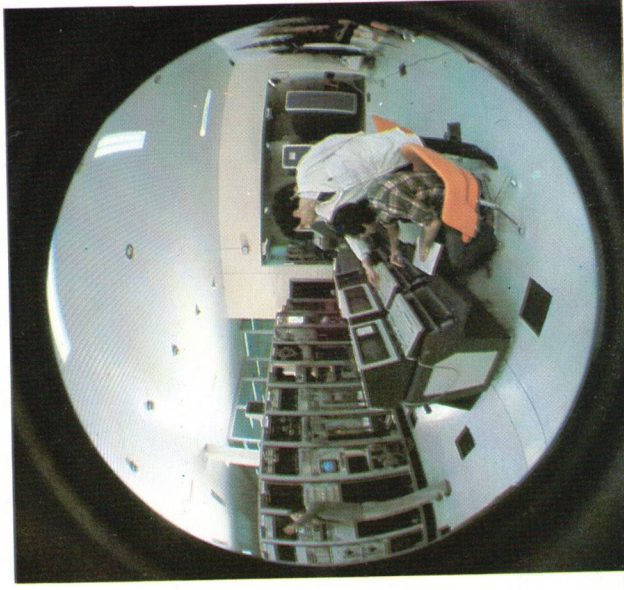
L'équipe de physiciens s'efforcera alors d'obtenir le financement, les moyens matériels et l'aide technique qui lui sont nécessaires.

Elle soumettra une proposition d'expérience au Comité des

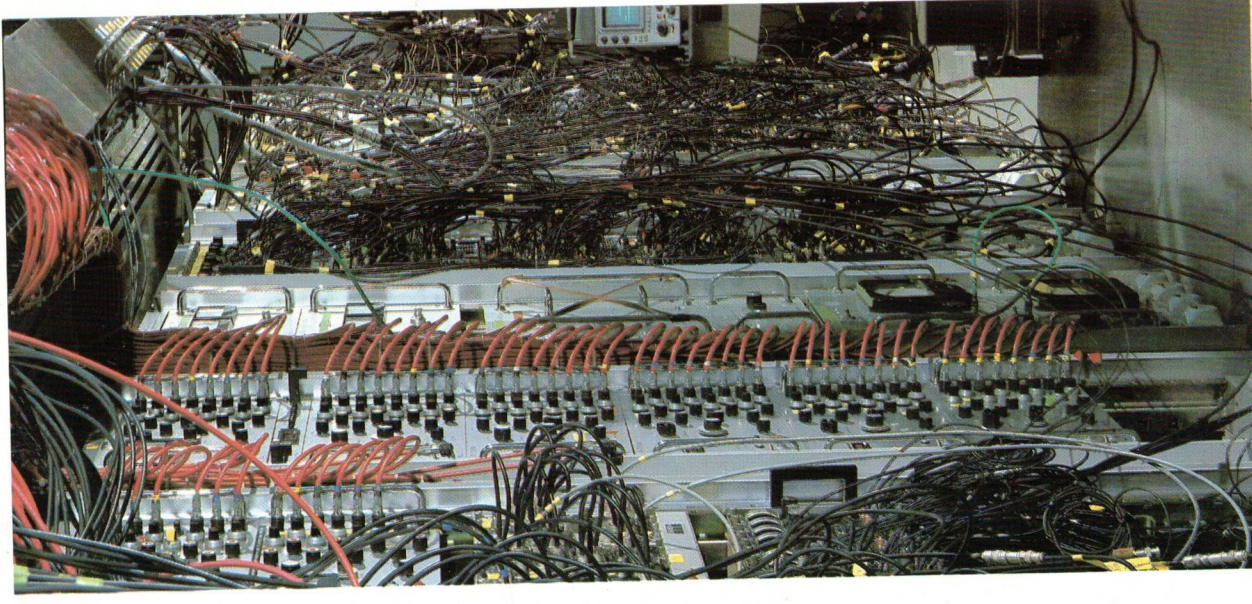
Expériences; en cas d'avis favorable elle se verra attribuer un certain temps de faisceau, pour des essais d'abord, puis pour l'expérience complète.

Après avoir construit, rassemblé, mis au point et essayé leur appareillage, les physiciens réaliseront les mesures nécessaires à leur expérience - les "prises de données" - au cours d'un certain nombre de "runs". Chaque run correspond à un certain nombre de jours et de nuits consécutifs que les physiciens utiliseront au mieux en se relayant les uns les autres, en 3 fois 8 heures par exemple, sur le site, dans la cabane d'électronique près de la casemate d'expérience. C'est la période décisive qui doit être soigneusement préparée.

Les données accumulées - en général sur support d'informatique - seront ensuite dépouillées et analysées; ce travail dure le plus souvent plusieurs mois. Viendront ensuite l'interprétation des résultats et leur comparaison avec des prédictions théoriques, puis leur discussion dans des séminaires ou des colloques. Enfin leur publication dans une revue scientifique spécialisée rendra les résultats accessibles à la communauté des physiciens nucléaires de par le monde, ce qui pourra donner naissance à de nouvelles expériences ou à de nouvelles interprétations théoriques ailleurs. Deux années ou parfois plus se seront peut-être écoulées depuis l'idée de départ.



Pupitre de contrôle principal de Saturne.



Montage électronique et câbles de liaison d'une expérience.

Achevé d'imprimer

février 1980

L'Édition Artistique - Paris - Printed in France

Document édité par le Laboratoire National Saturne
avec la collaboration du Département des Relations Publiques du CEA
Photos: P. Jahan, Doc. CEA