



**ESRF:
Aspects du fonctionnement des accélérateurs au jour le jour**

Intervenant : Laurent HARDY, ESRF

*Cours donné dans le cadre de l'Ecole d'Accélérateurs IN2P3 – La Londe Les Maures – 14-18 Septembre 2009
révision II : juin 2009*

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	4
2	L'Histoire des accélérateurs jusqu'à ... l'ESRF !	5
2.1	Une brève histoire des accélérateurs	5
2.1.1	Historique	6
2.1.2	Le diagramme de Livingston	7
2.1.3	Les accélérateurs rectilignes ou linéaires	9
2.1.4	Les accélérateurs circulaires	11
2.1.5	Les machines à rayonnement synchrotron	12
2.2	L'Histoire de l'ESRF	15
2.2.1	La phase conceptuelle	15
2.2.2	La phase d'avant-projet	16
2.3	La Réalisation du Projet ESRF	17
3	L'ESRF AUJOURD'HUI	20
3.1	La mission de l'ESRF	20
3.2	La structure organisationnelle de l'ESRF	21
3.3	Les utilisateurs et la recherche à l'ESRF	23
3.3.1	Biologie	25
3.3.2	Sciences des matériaux	26
3.3.3	La Médecine	27
3.3.4	La Géophysique	28
3.3.5	L'imagerie	28
3.3.6	La spectroscopie par absorption de rayons X	29
3.3.7	Les applications industrielles	30
4	LES ACCELERATEURS DE L'ESRF	31
4.1	Le LINAC ou Accélérateur Linéaire	31
4.2	La ligne de transfert Linac vers Booster (dite TL1)	33
4.3	Le Synchrotron	33
4.4	ligne de transfert N° 2	37
4.5	L'anneau de stockage	38
4.5.1	Les aimants	38
4.5.2	Le système radio-fréquence	41
4.5.3	Les éléments d'Insertion	44
4.5.4	Les départs de ligne (ou « Front Ends »)	46
4.5.5	Le Diagnostic faisceau	48
4.5.6	Le système de vide	57
5	Le fonctionnement au jour le jour : approche globale	58
5.1	Définitions et faits	58

5.2	Éviter la panne.	61
5.2.1	La thermographie infra-rouge.	61
5.2.2	Les radio –gammagraphies	63
5.2.3	Étude post-accident.	66
5.2.4	Analyse mécanique en ligne.	70
5.2.5	Éviter les fausses pannes.	71
5.2.6	Se servir de ses yeux ...	72
5.2.7	Planifier des arrêts pour réparer/ maintenir.	73
5.2.8	Et ... Les échanges d'expérience avec des instituts similaires.	74
5.3	Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes . Error! Bookmark not defined.	
5.3.1	HQPS : un exemple de redondance active.	75
5.3.2	Une « simple » amélioration de conception est parfois suffisante.	77
5.3.3	Maintenance préventive.	78
5.4	Diminuer le temps moyen d'une panne	81
5.4.1	La redondance passive d'équipement.	82
5.4.2	Un plan d'intervention doit exister.	86
6	Le fonctionnement au jour le jour : l'approche quotidienne.	88
6.1	Les différents modes de faisceau en 2007.	88
6.1.1	Le mode uniforme.	88
6.1.2	Le mode $2 * 1/3$	89
6.1.3	Le mode « $7/8 + 1$ »	90
6.1.4	Le mode hybride $24 * 8 + 1$	90
6.1.5	Le 16 bunch.	91
6.1.6	Le $4 * 10$ mA	91
6.2	Les critères de qualité du faisceau	92
6.2.1	La pureté	92
6.2.2	Le temps de vie (lifetime) du faisceau.	93
6.2.3	La stabilité du faisceau.	98
7	CONCLUSIONS.	103
8	REMERCIEMENTS.	105

1 INTRODUCTION

Bien que le titre de ce cours soit intitulé « ESRF: Aspects du fonctionnement des accélérateurs au jour le jour », il me semble inconcevable d'expliquer le fonctionnement au quotidien si l'on ne connaît pas les tenants et les aboutissants de « l'Opération » à l'ESRF :

- Quels étaient les objectifs des concepteurs de l'ESRF ?
- Quels étaient les spécifications techniques du faisceau annoncé ?
- Quelles sont les spécifications techniques actuelles, c-à-d 15 ans plus tard ?
- Qui sont les utilisateurs et quelles sont leurs exigences ?
- Que doit-on faire de mieux par rapport aux sources de rayonnement existantes ?
- Combien d'heures de faisceau faut-il délivrer idéalement chaque année ? (autrement dit : quelle est la 'demande' en termes d'utilisateurs)

Ce sont les réponses à ces questions qui vont automatiquement déterminer comment doit fonctionner l'Opération à l'ESRF, tant en termes d'organisation structurelle qu'en termes purement techniques.

S'il appartient au groupe Opération de définir au mieux sa structure organisationnelle pour répondre aux besoins, nous verrons en revanche que « l'Opération » s'appuiera très souvent sur les compétences expertes des différents groupes qui gravitent autour de la physique / technique des accélérateurs (Radio-Fréquence, diagnostique, ultra-vide, etc).

Pour cette raison, j'ai décidé de commencer ce cours par un rappel de l'histoire des accélérateurs, suivi des grandes étapes de la création du Projet ESRF ainsi que les grandes phases de sa construction jusqu'au premier faisceau.

Cette introduction me permettra de définir ensuite les contraintes de l'Opération et son cadre de travail.

De ces contraintes, découleront les méthodes utilisées ce jour en salle de contrôle pour servir au mieux la Communauté scientifique utilisant le rayonnement synchrotron de l'ESRF.

2 L'Histoire des accélérateurs jusqu'à ... l'ESRF !

2.1 Une brève histoire des accélérateurs

Les **accélérateurs de particules** sont des instruments qui utilisent des champs électriques et/ou magnétiques pour amener des particules chargées électriquement à des vitesses élevées.

On distingue deux grandes catégories : les **accélérateurs linéaires** et les **accélérateurs circulaires**.

Dans chacune de ces deux catégories, on trouvera des accélérateurs spécialement conçus pour l'accélération d'électrons ou de protons ou d'ions lourds.

L'énergie des particules ainsi accélérées se mesure en électron-volts (eV) mais les unités sont souvent le million ($1\text{Mev}=10^6$ eV), le milliard d'électronvolts ($1\text{Gev}=10^9$ eV). *La physique des hautes énergies* (ou subnucléaire ou des particules élémentaires) se définit à partir du GeV et au-delà.

Le tableau suivant donne quelques exemples de projets ou d'applications pour ces 2 catégories et pour chaque type de particules :

	Accélérateurs linéaires	Accélérateurs circulaires
électrons	Préinjecteur de source de rayons X	Ex : Rhodotron (stérilisation d'aliments – IBA)
protons	Physique fondamentale (SLAC – Stanford –USA)	Ex : cyclotrons pour la production de radio-isotope ou pour la protonthérapie
Ions lourds	Ex : Projet Spiral II à Ganil	Hadronthérapie (Himac-Japon). Projet Etoile à Lyon.

Tableau 1: exemples d'applications ou de projets pour différents types d'accélérateurs et de particules.

Il y a actuellement environ 15000 accélérateurs dans le monde. Une centaine seulement sont de très grosses installations. Les machines électrostatiques de type industriel composent plus de 80 % du parc mondial des accélérateurs industriels d'électrons.

Le site de l'ESRF étant composé d'un accélérateur linéaire (200 MeV), d'un synchrotron (200 MeV à 6 GeV) et d'un anneau de stockage (6 GeV), il m'a semblé

utile de rappeler comment sont apparus ces différents types d'accélérateurs au fil du temps.

2.1.1 Historique

En 1919, le physicien Ernest Rutherford (1871-1937) transforma des atomes d'azote en isotopes d'atome d'oxygène en les bombardant avec des particules alpha engendrées par un isotope radioactif. Mais l'étude de l'atome et surtout de son noyau nécessite de très hautes énergies. Les particules provenant des radioéléments naturels sont trop peu nombreuses et peu énergétiques pour pénétrer la barrière de potentiel du noyau des éléments les plus lourds. Le potentiel à la surface nucléaire croît d'un million de volts pour l'hydrogène ordinaire à 16 millions pour l'uranium. Dans les années 1920, il apparaît évident qu'une étude plus approfondie de la structure de la matière allait nécessiter des faisceaux plus énergétiques de particules. Les particules chargées pouvaient être obtenues par différents moyens. Les décharges dans les gaz produisent des ions, alors que pour les électrons, on pouvait utiliser l'émission par un fil chauffé ou d'autres systèmes. L'énergie (E) d'une particule dans un champ électrique correspond au produit de sa charge (q) multiplié par la tension (U) du champ : $E = q.U$. Ainsi, une première solution possible était essentiellement d'accélérer les particules dans un tube à vide soumis à une très haute tension. La course au million de volts avait commencé. Plusieurs systèmes furent proposés.

Le générateur Cockcroft-Walton était un multiplicateur de tension fait de condensateurs et de redresseurs. C'était un élément d'un accélérateur. Il fût construit en 1937 par Philips à Eindhoven et il est actuellement exposé au Musée des sciences de Londres



En Angleterre John Cockcroft et Ernest Walton, qui, en 1932, accomplirent la première désintégration réussie du noyau par des particules électriquement accélérées, utilisèrent un multiplicateur de tension à l'aide d'un montage Greinacher (1919). Sans aucun doute, l'une des meilleures idées fut développée par Robert Jamison Van de Graaff, qui choisit de développer une machine à partir de l'antique électrostatique. Les autres (tels que Ernest Orlando Lawrence avec son cyclotron) choisirent une voie complètement différente, renonçant à obtenir d'un coup les 10 ou 20 MeV nécessaires pour pénétrer tous les noyaux. Ernest Orlando Lawrence pensa atteindre ces énergies par des impulsions électriques alternatives successives. Des impulsions périodiques supposent le maintien d'un certain synchronisme avec la particule accélérée qui décrit naturellement une ligne droite à une très grande vitesse. En employant un puissant électro-

aimant dans l'entrefer duquel les particules sont confinées par le champ magnétique lui-même, E.O. Lawrence a résolu simultanément les deux problèmes.

Les principaux ingrédients nécessaires pour accélérer les particules sont les champs électriques et magnétiques et un vide de bonne qualité

La classification des accélérateurs de particules peut suivre l'historique des technologies employées : par exemple, l'accélérateur électrostatique, les machines « tandem », les accélérateurs linéaires à hyperfréquences, les cyclotrons (dont le cyclotron isochrone et le bêtatron), les synchrotrons (dont le synchrocyclotron, les synchrotrons à protons, à électrons), les anneaux des collisions (anneaux électron-positron, anneaux de collision à protons). Bien sûr, chaque machine peut être associée aux découvertes historiques qu'elle a permise.

Classification par l'énergie :

Basses énergies de 10-100 MeV.

Énergie moyenne de 100-1000 MeV.

Hautes énergies plus de 1 GeV et au delà du TeV (Tera électronvolt= 10^{12} eV).

D'autres classifications sont possibles selon les applications de l'accélérateur : industrie, médecine, recherche fondamentale, exploration et compréhension des composants élémentaires de la matière, de l'énergie et de l'espace et du temps.

Plus simplement, ces très grandes machines des XXe et XXIe siècles peuvent être classées selon la géométrie des trajectoires de l'accélération : linéaire ou circulaire. Le caractère fondamental de nombreux accélérateurs modernes est la présence d'un champ magnétique enroulant les trajectoires sous forme de cercles ou de spirales. On peut les appeler «circulaires ». D'autres accélèrent en ligne droite, on les appelle «rectilignes ou linéaires ».

2.1.2 Le diagramme de Livingston

Stanley Livingston, physicien spécialiste des accélérateurs de particules, a établi ce diagramme dans les années 1960. Il montre la croissance exponentielle de l'énergie des faisceaux accélérés. Les valeurs de référence de ce diagramme ont été modifiées : l'axe horizontal a été étendu aux années 2010. L'axe vertical a été étendu à 100000 TeV. Pour comparer les différents accélérateurs, l'énergie des collisionneurs, qui s'exprime dans le centre de masse, a été recalculée comme si l'énergie des particules observées était le résultat d'une collision avec un proton au repos.

Plus précisément, l'échelle en énergie est donnée par : $(E_{cdm})^2 / 2 * m_p c^2$

Le coût par eV d'énergie du faisceau est réduit d'un facteur 1000 par période de 7 ans.

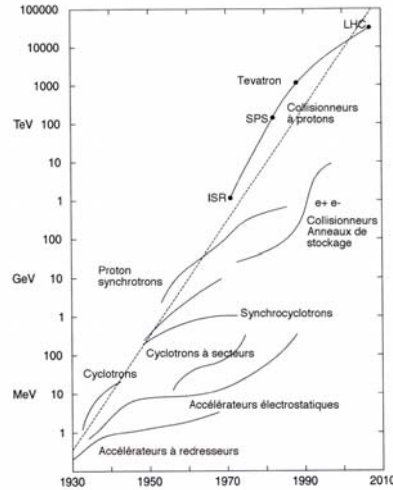


Figure 1 Diagramme de Livingston

Applications

Les accélérateurs ont des applications aussi variées que :

- La production de rayons X.
- la physique nucléaire (production de neutrons), pour la recherche fondamentale sur les particules élémentaires
- le domaine médical, pour le traitement des cancers par radiothérapie
- le domaine militaire, en particulier pour la simulation des armes nucléaires.

En physique fondamentale, ils servent à accélérer des faisceaux de particules chargées (électrons, positrons, protons, antiprotons, ions...) pour les faire entrer en collision et étudier les particules élémentaires générées au cours de cette collision.

Applications générales des accélérateurs de particules

Domaine	Méthodes	Buts recherchés
Recherche en physique	Faisceaux énergétiques de particules	Exploration de la matière (voir tableau suivant)
Médecine	Production de radioisotopes	Imagerie, scintigraphies, traceurs
Médecine	Irradiations : rayons X, Gamma , protons, électrons, ions lourds	Radiothérapie anti tumorale
Electronique	Faisceaux d'électrons	Gravure des circuits intégrés
Sécurité alimentaire	Irradiation des aliments	Stérilisation des germes
Archéologie	Spectrométrie de masse par accélérateur	Datation

Applications des accélérateurs pour la recherche

Recherche	Méthodes	Accélérateurs
Physique des particules	Collisions	Synchrotrons, collisionneurs à protons ou électrons
Physique nucléaire	Collisions noyau-noyau	Accélérateurs d'ions lourds : synchrotron, cyclotron, Tandem, Linac
Physique atomique	Collisions atomiques	Accélérateurs d'ions lourds : synchrotron, cyclotron, Tandem, Linac
Matière condensée	Diffraction de rayons X	Synchrotrons électrons
Matière condensée	Diffusion de neutrons	Linac proton
Biologie ,chimie	Cristallographie des protéines, des virus, activation	Synchrotrons électrons
Physique des matériaux	Analyse par activation, spectrométrie de masse	Van de Graaff Tandem

2.1.3 Les accélérateurs rectilignes ou linéaires

Ils sont constitués de plusieurs sous-ensembles successifs, remplissant diverses fonctions, de la *source* à la *cible* et dans un vide poussé:

- Production et émission des particules chargées (par exemple grâce à une cathode): ions ou électrons en général.
- l'injection dans le tube cylindrique vide d'air où les particules seront accélérées.
- l'accélération proprement dite (éventuellement par plusieurs sections successives), utilisant des procédés techniques divers : champs électriques continus ou alternatifs à haute fréquence.

- la focalisation du faisceau pour empêcher sa divergence (lentilles magnétiques).
- enfin la préparation du faisceau de particules à son utilisation :
 - déflecteurs qui déplacent le faisceau dans la direction voulue.
 - système de collimation (également pour les applications médicales).
 - détecteurs des particules.
 - *cible* (épaisse ou mince) métallique destinée à produire des rayons X de haute énergie (notamment pour les applications médicales)
 - raccordement à un accélérateur circulaire (recherche en physique des particules).

On trouve plusieurs techniques d'accélération, par exemple :

- **les accélérateurs électrostatiques:** Une haute tension statique est appliquée entre 2 électrodes produisant ainsi *un champ électrique statique* :
 - Les multiplicateurs de tension (combinaison en cascade de condensateurs et de redresseurs) de type Greinacher ou Cockcroft et Walton permettent d'obtenir des hautes tensions qui ont les caractéristiques des machines proprement électrostatiques. L'énergie acquise par les particules est égale, en électronvolts, à la différence de potentiel.
 - Le générateur électrostatique le plus typique est le générateur de Van de Graaff : la différence de potentiel est de quelques MeV (20 MeV pour les accélérateurs-tandem de type Vivitron ou Laddertron ou Pelletron). Pour accroître l'énergie à tension constante, on ne peut qu'augmenter la charge électrique. Mais les sources d'ions multichargés sont, en général, complexes, et il est peu commode de les intégrer dans une électrode haute tension. L'accélérateur électrostatique tandem (1958) apporte une solution à ce problème. Les ions produits par la source sont accélérés jusqu'au milieu du tube (potentiel +V). Ils traversent un éplucheur d'électrons ('*stripper*'), en passant à travers une faible quantité de matière (petite section de gaz ou feuille de métal ou de carbone très mince). Les ions positifs ainsi formés sont accélérés par la tension V. L'énergie finale vaut alors $(n+1)eV$ si n est le nombre de charge de l'ion fourni. La source d'ions et la cible sont toutes deux à la masse (ou sol). Pour des protons, l'énergie finale est le double de celle possible par une machine classique. Les ions les plus lourds peuvent atteindre des énergies finales de plusieurs centaines de MeV.
- **les accélérateurs linéaires à radiofréquences** de type *Wideroë (1928)* ou *Alvarez (1947)*. Couramment appelés LINAC : la trajectoire des particules est toujours rectiligne, mais le *champ électrique est de haute fréquence*. Les sources Haute Fréquence utilisées sont presque toujours des klystrons (tubes amplificateurs hyperfréquences) dont la puissance de crête peut atteindre 60 MW. Les particules sont accélérées par impulsions successives convenablement synchronisées sans avoir à isoler des différences de potentiel équivalentes à l'énergie finale. Le faisceau en passant dans une suite de cavités où règne un champ électrique alternatif va pouvoir atteindre une énergie de

quelques centaines de MeV. On distingue encore deux types selon qu'il s'agit d'accélérateurs d'ions (basses énergies) ou d'électrons (hautes énergies). Les accélérateurs linéaires sont plus anciens que les accélérateurs circulaires; ils sont apparus dès 1931 avec l'accélérateur linéaire de Wideroë, repris par Sloan et Lawrence aux États-Unis. En France, en 1960, a été créé le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL) où fut construit un accélérateur linéaire d'électrons de l'ordre de 1 GeV couplé à un petit anneau de collision nommé ACO. Les accélérateurs linéaires ne permettaient pas, initialement, de produire des faisceaux d'aussi grande énergie que les accélérateurs circulaires. En revanche ils ont de nombreux avantages. En effet, la géométrie est «ouverte», c'est-à-dire que l'on peut envoyer ou extraire le faisceau facilement et un faisceau de flux élevé pourra être transporté avec les technologies actuelles. Ils sont souvent utilisés comme injecteurs de faisceaux dans les grandes structures (collisionneurs circulaires), et maintenant développés comme éléments de grands collisionneurs linéaires. Actuellement, le plus grand accélérateur linéaire au monde est celui de Stanford aux États-Unis. Longueur 3050 mètres, nombre de Klystrons 244. Puissance de crête par klystron : 30 MW . Energies maxima 24 GeV (33, 4 GeV avec cavités Haute Fréquence de stockage). Courant de crête : 80 mA. La puissance énorme transportée par le faisceau (1 MW continu) pose des problèmes technologiques.

2.1.4 Les accélérateurs circulaires

Ce sont les accélérateurs circulaires qui détiennent le record d'énergie et la raison est simple : l'énergie reçue par mètre de trajectoire, c'est-à-dire l'intensité du champ électrique accélérateur, est limitée par des facteurs physiques et techniques. En «enroulant» la trajectoire, on obtient l'équivalent d'un accélérateur rectiligne ayant, non pas des kilomètres, mais des milliers de kilomètres de longueur.

Parmi les «circulaires» on distingue d'abord ceux qui emploient *un champ magnétique fixe*, (et un aimant massif) et où, par suite, les trajectoires sont des spirales : ce sont le cyclotron (E. Lawrence ,1929) et le synchrocyclotron (conçu à Berkeley en 1946). Au contraire, dans les «synchrotrons», *le champ magnétique varie* pendant l'accélération, de telle sorte que celle-ci a lieu sur un trajectoire invariable.

On distingue ainsi deux types d'accélérateurs circulaires :

- les **cyclotrons** dans lesquels les trajectoires des particules sont des spirales, sont constitués d'un seul aimant de courbure dont le diamètre peut atteindre plusieurs mètres. Historiquement, le cyclotron a permis la découverte de plusieurs particules fondamentales. Ils peuvent accélérer des particules chargées, des ions lourds mais pas les électrons. En France, le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) situé à Caen est

constitué de deux cyclotrons isochrones, c-à-d que le système accélérateur proprement dit travaille à fréquence fixe. Cela sous-entend que le champ magnétique doit varier pour assurer l'isochronisme et les focalisations horizontale et verticale du faisceau



Figure 2: L'électroaimant du synchrocyclotron au centre de protonthérapie d'Orsay

- les **synchrotrons** : contrairement au cyclotron, le champ magnétique n'est pas appliqué sur toute la surface circulaire, mais uniquement sur la circonférence. Dans ce type d'accélérateur, les particules circulent sur la même trajectoire presque circulaire à l'intérieur d'une série d'aimants de courbure. L'accélération est réalisée par un champ électrique résonnant. Le courant alternatif est appliqué seulement sur l'intervalle et non sur tout le parcours des particules. La caractéristique du synchrotron est que l'intensité du champ magnétique de l'anneau est maintenue adaptée de façon *synchrone* à l'énergie du faisceau de particules, afin de les maintenir sur une trajectoire fixe. Ces machines ont permis de découvrir de nombreuses particules élémentaires. Un des premiers synchrotrons, le Bévatron (Berkeley, 1954) servit à démontrer l'existence de l'antiproton. Les synchrotrons ont permis d'obtenir des preuves expérimentales d'éléments fondamentaux comme les quarks. Ils sont utilisés dans les collisionneurs actuels. Il y a ceux qui accélèrent les électrons (comme le LEP) et ceux qui accélèrent les protons (comme le SPS). Aujourd'hui un synchrotron (même de 3^{ème} génération) est un très grand instrument banalisé, partagé, accessible, formateur et pluridisciplinaire. Une variante du synchrotron est l'**anneau de stockage**. Son rôle est de stocker des particules à énergie constante, sur un rayon constant. Le champ magnétique d'un tel anneau est donc constant. Quant à la présence des cavités « accélératrices », leur rôle n'est plus d'accélérer mais de redonner aux particules circulant, l'énergie qu'elles perdent sous forme de rayonnement synchrotron (voir paragraphe suivant). L'anneau de stockage est donc une version « simplifiée » d'un synchrotron.

2.1.5 Les machines à rayonnement synchrotron

C'est en 1947 que le rayonnement synchrotron a été observé pour la première fois. À cette époque, dans la ville de Schenectady, aux États-Unis, des chercheurs de General Electric faisaient circuler des électrons à grande vitesse dans un anneau de deux mètres de diamètre... , en s'arrachant les cheveux car

les particules qu'ils étudiaient se comportaient d'une façon imprévue: elles perdaient une partie de leur énergie sous forme d'un rayonnement alors inconnu.

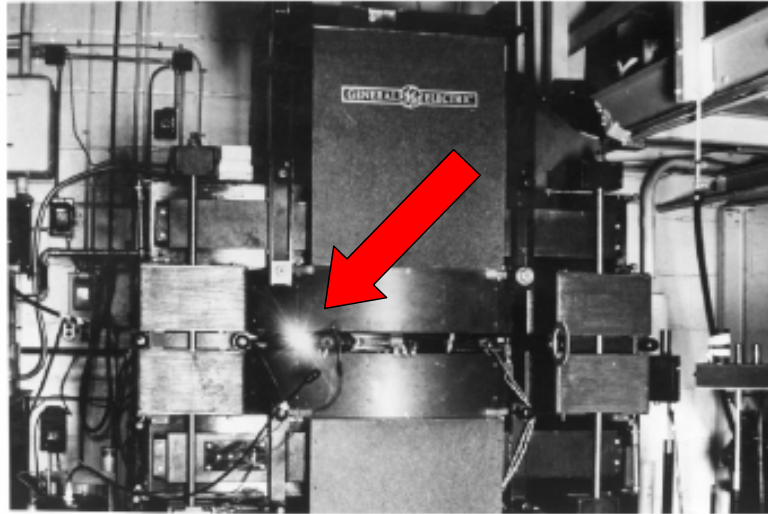


Figure 2.1 : Observation du rayonnement synchrotron sur le synchrotron de General Electric.

De rayonnement photonique *parasitaire*, la lumière synchrotron est devenue *recherchée*. Des dispositifs scientifiques (onduleurs placés sur des anneaux de stockage d'électrons) ont été construits pour utiliser ce rayonnement, dont l'intensité, le spectre (lumière visible, ultra violet du vide, rayon X, rayons gamma) permettent une exploitation en physique, en chimie, en micro-lithographie des circuits intégrés, dans l'étude de la matière vivante, etc.

Les synchrotrons produisent des rayonnements sur une large gamme de longueurs d'onde, utilisées par un nombre important de méthodes d'analyse de la lumière. Ces machines sont constituées d'une part d'un injecteur et d'un anneau de stockage d'une circonférence de cent à plusieurs centaines de mètres, dans lequel les électrons tournent à une vitesse proche de celle de la lumière, et, d'autre part, de lignes de lumière et de postes expérimentaux périphériques utilisant la lumière émise par les électrons lors du passage dans des aimants de courbure ou des *chicanes* magnétiques (*wigglers* et onduleurs) placés sur leur trajectoire, lumière dénommée rayonnement synchrotron. Le rayonnement des synchrotrons de 3^{ème} génération est mille milliard de fois plus brillant que les rayons émis par des équipements de laboratoire comme les tubes à rayons X.

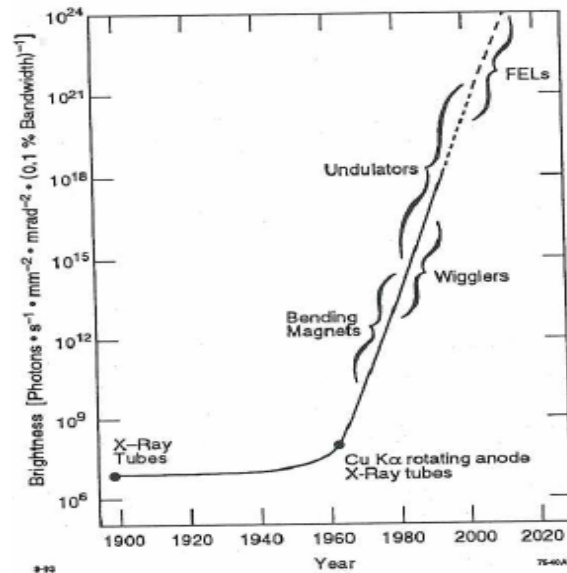


Figure 3: from Winick. Evolution de la brillance spectrale des sources de rayons X dans le temps

Les 3 plus grands synchrotrons générateurs de lumière synchrotron sont : SPRING8 (8 GeV) à Hyogo , Japon, APS (Advanced Photon Source, 7 GeV), à Argonne , USA et l'ESRF European synchrotron radiation facility, 6 GeV, à Grenoble, France .

Le Synchrotron SOLEIL (Source optimisée de Lumière d'énergie intermédiaire du Lure) est un synchrotron de 3 ème génération situé sur le plateau de Saclay, Essonne. Il est composé de 2 accélérateurs (un accélérateur linéaire et un accélérateur circulaire *booster*) et d'un anneau de stockage, polygone de 354 m de périmètre.

La demande de temps d'accès de la *lumière synchrotron* est en forte augmentation dans tous les pays du monde, en particulier en France.

	ESRF	SOLEIL
Energie (GeV)	6	2.75
Circonférence (mètres)	844	354
Emittance horizontale	4	3.7
Nbre sections droites pour éléments d'insertion	28	20
Intensité (mA)	200	300
Temps de vie (heures)	80	20

Tableau 2: Les paramètres principaux ESRF / Soleil

2.2 L'Histoire de l'ESRF

En Résumé ...

Le rayonnement synchrotron, qui consiste en un rayonnement électromagnétique émis pendant l'accélération d'une particule chargée de haute énergie est utilisé depuis longtemps. Cela a d'abord été généré dans les aimants de courbure des accélérateurs construits pour la recherche en physique des particules. Ces accélérateurs se sont rapidement révélés inadéquats pour satisfaire les demandes spécifiques de la communauté scientifique souhaitant exploiter ce rayonnement.

Des anneaux de stockage dédiés (ainsi qu'une instrumentation spécifique) avec des performances très nettement améliorées ont alors vu le jour en Europe, aux USA et en Asie. Pendant cette période, il s'est avéré que la brillance d'une source pouvait être considérablement augmentée en introduisant des éléments d'insertion dans l'anneau de stockage (les onduleurs et les wigglers). Pour les rayons X 'mous' et la gamme UV, une énergie inférieure à 3 GeV est suffisante et ils peuvent donc être construits à l'échelle nationale. Par contre, pour obtenir des longueurs d'onde de l'ordre de quelques dixièmes d'Angströms indispensables pour certaines recherches en physique, biologie, chimie, etc, de plus hautes énergies sont nécessaires.

De hautes énergies (> 6 GeV) vont automatiquement impliquer des larges circonférences d'anneaux de stockage (> 800 mètres), lesquelles vont également permettre de placer plusieurs dizaines de stations expérimentales. Les budgets de réalisation et ensuite d'exploitation de tels laboratoires deviennent rapidement prohibitifs à l'échelle nationale.

Trois sites capables de délivrer de tels rayons X, dits 'durs' ont été construits et sont maintenant en opération : SPRING 8 (Japon - 8 GeV), APS (USA - 7 GeV), ESRF (Grenoble/France - 6 GeV)

Dans le cas de l'ESRF, une coopération européenne était nécessaire pour la construction d'un tel institut, étant donné la complexité, le coût et le large potentiel de recherche expérimentale.

2.2.1 La phase conceptuelle

1975: H. MAIER-LEIBNITZ préside un groupe de travail établi par la "European Science Foundation (ESF)" pour étudier la faisabilité d'un accélérateur capable de générer des rayons X pour des longueurs d'ondes allant jusqu'à 0.1 Å. Un tel accélérateur requiert une énergie de 5 à 7 GeV.

1977: L'ESF édite un rapport -"Synchrotron Radiation. A perspective view for Europe" (*Black Book*)- indiquant les plus-values d'un tel complexe scientifique. Ce livre donne les bases des paramètres techniques souhaités, le coût et le planning de la construction d'un tel accélérateur.

1978-1979: Un comité est créé et dirigé par Y. FARGE. Deux sous-groupes sont établis, l'un dédié aux accélérateurs (dirigé par D.J. Thompson) et l'autre dédié à l'instrumentation (dirigé par B. Buras). Beaucoup de consultations ont lieu dans le monde scientifique. Ce travail aboutit à la publication du "European Synchrotron Radiation Facility . The Feasibility Study" (un document en 4 volumes appelé *Blue Book*), qui décrit les principales caractéristiques de la future Source de Rayonnement synchrotron Européen : l'ESRF.

2.2.2 La phase d'avant-projet

1980-1982: Un comité Intergouvernemental de suivi de projet est formé et sera dirigé par P. LEVAUX. Entre-temps, les travaux menés par les deux sous-groupes continuent dans le but d'incorporer les nouveaux développements technologiques ainsi que l'expérience acquise par les utilisateurs de rayonnement synchrotron. Une mise à jour appelée "A case for a European Synchrotron Radiation Facility" (*Yellow Book*, ed. J. Als-Nielsen et al.) fut présentée au comité de suivi, indiquant les spécifications de l'Installation, tenant compte des dernières avancées technologiques, notamment les ... **éléments d'insertion** !

1983-1984: Un groupe de Projet "European Synchrotron Radiation Project" fut créé sous la Direction de B. BURAS et S. TAZZARI et situé au CERN. Ses conclusions sont données dans "European Synchrotron Radiation Facility - Report of the ESRP" (*Green Book*) qui décrit les objectifs du projet (incluant les applications industrielles), la source de rayonnement, l'équipement expérimental, le planning, le coût et les conditions générales de constructions.

1985: La France et la République Fédérale d'Allemagne proposent l'implantation du projet en France et acceptent de financer la majeure partie du projet. Ils invitent d'autres pays à les rejoindre.

1986-1987: La phase de Fondation commence le 10 décembre 1985 avec la signature du "Memorandum of Understanding (MoU)" par la France, la République Fédérale d'Allemagne, l'Italie, la Grande-Bretagne et l'Espagne. Le Conseil provisoire de l'ESRF ainsi que plusieurs sous-comités sont formés. Le Conseil forme l'équipe de projet de construction à Grenoble, dirigé par R. HAENSEL, Directeur Général. Jean-Louis Laclare sera nommé Chef de projet et le mènera à son terme. Le projet comptera 55 personnes fin 1987. L'objectif de cette équipe étant de préciser les détails techniques concernant l'accélérateur, préparer les dessins de construction, tester différents sites à Grenoble, mettre à jour le programme expérimental et finaliser les coûts de construction et d'opération. Toutes ces données techniques, scientifiques et financières sont consignées dans le "Red Book", entériné par le Conseil de l'ESRF en 1987 comme document central de référence ! Dans ce même temps, un groupe de travail prépare les textes de la Convention d'Entreprise permettant d'établir les bases légales de l'ESRF.

Durant les premières années de construction, l'équipe de projet se trouve sur le site de l'Institut Laue Langevin (ILL) et reçoit le support de cet Institut, notamment pour les Services Administratifs.

1988: La phase de Fondation se termine avec la signature d'un protocole le 22 Décembre 1987 par les 5 pays mentionnés ci-dessus, plus la Suisse et 4 pays nordiques, le Danemark, la Finlande, la Norvège et la Suède.

Ce protocole annonce le lancement de la période de construction qui démarre le 1 janvier 1988 et approuve un budget total pour 1988 de 16.4 millions d'euros de paiements plus 14 millions euros de développement. L'équipe de construction continue en collaboration avec d'autres laboratoires, à étudier les différentes parties de la machine ainsi que des outils d'expérimentation et attribue les premiers contrats de grande envergure (pré injecteur, architecte industriel).

Les autorités locales (la ville de Grenoble, le département de l'Isère et la région Rhône Alpes) fournissent un support logistique de grande ampleur de manière à rendre le terrain nécessaire à l'ESRF disponible en novembre 1988. Le centre de recherche nucléaire du CEA à Grenoble (Centre d'Études Nucléaires de Grenoble) et les principaux instituts scientifiques locaux permettent l'achèvement de ce travail en transmettant leurs connaissances respectives. En complément de locaux temporaires, l'ESRF réquisitionne des bureaux ainsi qu'un laboratoire appartenant au CENG, ce terrain étant ajouté au site de l'ESRF / ILL.

Le Conseil, sous la présidence de J HOROWITZ conduit à la fois les négociations préparant la version finale de la Convention et les Statuts intergouvernementaux de l'ESRF et permettant à la Belgique de joindre l'organisation. Le 16 décembre 1988, les accords de l'ESRF sont signés à Paris par les ministres de la recherche des onze pays suivants : la Belgique, la France, l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne, la Suisse, le Royaume Uni, le Danemark, la Finlande, la Norvège et la Suède. Plusieurs pays formeront des consortiums: c'est le cas du BENESYNC, alliant la Belgique et les Pays-Bas ainsi que NORDSYNC, alliant le Danemark, la Suède, la Finlande et la Norvège. Ces consortiums ont pour but d'avoir un intervenant unique pour un groupe de plusieurs pays mais aussi de rassembler les budgets nécessaires pour que ces pays puissent participer au projet ESRF.

2.3 La Réalisation du Projet ESRF

1989 : L'entreprise ESRF (société civile) est constituée le 12 janvier 1989. Le contrat de construction A (terrassement, drainage et égouts) est exécuté entre février et septembre. Le contrat de construction B (bâtiments machine, anneau de stockage, hall d'expérimentation, bâtiments techniques) est signé le 1 décembre 1989. Une réorganisation interne de l'ESRF conduit à la structure actuelle des cinq divisions : Administration, Expérimentation, Machine, Services Informatiques, Services Techniques.

1990: En avril la construction des bâtiments démarre sur le site alors que 60 % de l'équipement avait déjà été commandé. L'installation du synchrotron commence en novembre. Le contrat de construction C (laboratoires et bureaux du bâtiment central, bâtiment conjoint ILL /ESRF, aménagement extérieur) est signé en décembre. Le

complément en personnel de l'ESRF étant déterminé par les besoins ultérieurs de l'opération a fait que beaucoup des tâches de construction ont été sous traitées. Afin de pouvoir répondre aux besoins en personnel qualifié supplémentaire pendant la phase de construction, le Conseil a permis le recrutement temporaire de main d'œuvre (peakload), c'est-à-dire le transfert de personnel supplémentaire des instituts des pays membres sur une période déterminée.

1991: Le pré injecteur (accélérateur linéaire) est livré au début de l'année 1991, le premier faisceau d'électron y est accéléré en mai. En août / septembre la mise en service du synchrotron commence avec un premier faisceau autour de la machine le premier jour et une accélération jusqu'à 3 GeV deux jours plus tard. Le 12 novembre l'injecteur de l'ESRF atteint son énergie opérationnelle de 6 GeV pour la première fois.

À la fin de l'année 1991 tous les bâtiments techniques sont terminés. Le programme de construction initial fait référence à une installation de 30 lignes de faisceau, basée essentiellement sur des éléments d'insertion en tant que sources de rayonnement. Cependant, l'anneau de stockage a le potentiel pour fournir d'autres lignes de lumière construites sur des aimants de courbure (dipole). Le Conseil autorisera que des groupes venant d'instituts de recherche basés dans les pays fondateurs, puissent utiliser cette radiation d'aimants de courbure et adoptera les 'Conditions générales pour les lignes de faisceau établies à l'ESRF par les Groupes de Recherche 'Collaborants' (CRGs). Peu après, les contrats pour la construction des quatre lignes de faisceau CRG ainsi qu'une expérience spéciale de physique à haute énergie sont conclus.

1992: Les électrons sont injectés dans l'anneau de stockage pour la première fois le 17 février. Onze jours plus tard, l'équipe machine réussit à stocker les électrons sur un grand nombre de tours. En juin l'objectif de 100 mA pour le courant du faisceau stocké est atteint. Les premiers essais onduleurs en juillet confirment la grande stabilité du faisceau et une luminosité record. En novembre tous les objectifs de l'anneau de stockage (durée de vie, brillance et stabilité) sont atteints ou surpassés. Au niveau des trois premières lignes de faisceau, installées durant l'automne 1992, des composants sont testés avec les rayons-X. Comme les dalles du sol du hall d'expérimentation n'avaient pas atteint le cahier des charges en termes de vibrations, des études et des tests sont réalisés durant l'année de manière à trouver une méthode permettant d'assurer la stabilité nécessaire du sol.

1993 : Le 1 janvier Y PETROFF est nommé Directeur Général. L'anneau de stockage est complété avec de nouveaux éléments d'insertion, les départs de ligne (Front Ends) et la qualité de fonctionnement de la machine ainsi que la performance de celle-ci continue d'augmenter pendant toute l'année. Le Conseil approuve l'installation d'une alimentation électrique de haute qualité (HQPS) de manière à éviter la perte de faisceau due à des baisses de tension du courant principal (fréquentes durant les orages). Par ailleurs, l'option de faire fonctionner l'anneau de stockage avec des positrons (à la place d'électrons) est abandonnée dans la mesure où la crainte initiale de problèmes de durée de vie du faisceau souffrant des ions positifs dans la chambre à vide ne fut pas matérialisée. Le sol du hall d'expérimentation est réparé par injection de mortier dans le sous-sol sous les dalles, une méthode qui avait déjà prouvé une meilleure stabilité des dalles. Ce problème résolu permet l'installation continue des lignes de lumière de telle

sorte qu'à la fin de l'année 1993, six lignes de l'ESRF (et quatre CRG lignes de faisceaux) sont mises en service avec faisceau pendant que cinq autres sont assemblées. Plusieurs équipements innovants pour les optiques rayons-X (plaques de quart ondes, Si monochromateurs refroidis par azote liquide, fins cristaux unique de diamant comme monochromateur, lentilles Bragg-Fresnel) sont aussi testés avec succès. En accord avec la politique de répartition de temps du faisceau adopté par le Conseil, six comités d'évaluation sont établis. Le Directeur Général et les syndicats signent l'Accord Collectif et les règles pour le travail posté.

1994: Grâce à l'équipe machine, les performances de la source sont bien au-delà des objectifs initiaux assurant un très haut niveau de fiabilité durant l'opération du service utilisateur, la mise en service du premier jeu de lignes de faisceau entre dans sa phase finale. Un bâtiment satellite pour la première ligne de faisceau longue (Topographie) se termine et la construction d'un hébergement pour visiteurs et le bâtiment abritant HQPS débute. Les expériences confirment les extraordinaires progrès rendus possible par l'ESRF dans un grand nombre de domaines de recherche y compris dans des domaines qui n'avaient pas été présentés initialement dans les atouts scientifiques que pouvait représenter l'ESRF (par exemple la radiation cohérente avec flux suffisant, très haute pression sur matériaux légers, dispersion inélastique avec très haute résolution, dispersion magnétique de surface, mise au point jusqu'à moins d'1 μm). La procédure de répartition du temps du faisceau instauré par le Conseil de l'ESRF est revue pour la première fois pour la période septembre – décembre 1994. Dès juin 1994 le programme scientifique pour les 26 (parmi 30) lignes de faisceaux de l'ESRF a été déterminé, 7 lignes de faisceaux CRG (ainsi qu'une expérience spéciale de physique haute énergie) ont été approuvées et des applications pour deux autres sont en cours d'étude. En sept 1994 la cérémonie d'inauguration de l'ESRF a lieu en présence des ministres de la recherche et des représentants des douze pays fondateurs.

1994 – jusqu'à aujourd'hui: Parallèlement à la construction de nouveaux faisceaux, l'opération régulière des utilisateurs a lieu sur ces lignes de faisceau déjà terminées. En 1995, 4752 heures en mode USM sont planifiées et livrées avec une disponibilité moyenne de 92.9%. En 2008 les valeurs correspondantes étaient de 5480 heures et 98.4 % de disponibilité pour un Mean Time Between Failures de 65 heures. À la fin de 2008, le nombre de lignes de faisceaux en service était passé à 36 pour l'ESRF plus 11 pour les CRG.

3 L'ESRF AUJOURD'HUI

Introduction

De manière générale, le rayonnement synchrotron peut être utilisé pour étudier la matière telle qu'elle existe 'dans la vie de tous les jours' : le monde animal, végétal, minéral, sous différentes conditions de pression / température, etc. Nous classons les objets en fonction de leurs propriétés **macroscopiques** ; chaud/ froid, rigide/élastique, la couleur, fragile ou non, etc. Ces propriétés macroscopiques sont détectées grâce à la lumière visible et sont palpables à l'échelle humaine.

Les rayons X, mais aussi les neutrons et les électrons, peuvent nous dévoiler l'arrangement atomique et moléculaire et peuvent également mesurer la force entre atomes et molécules. Petit à petit, des théories ont été établies et nous permettent de comprendre les propriétés macroscopiques en termes de réseaux atomiques et/ou moléculaires et les forces exercées entre eux.

Cette compréhension permet alors de concevoir rationnellement de nouveaux matériaux avec des propriétés connues et contrôlées, à la base de la technologie moderne.

En particulier, le rayonnement synchrotron n'est rien d'autre que du rayonnement X de très haute qualité, spatialement très bien localisé et très intense.

3.1 La mission de l'ESRF

L'ESRF a pour mission de délivrer du rayon X (rayonnement synchrotron) de haute énergie (c-à-d, courte longueur d'onde). Grâce aux éléments d'insertion (voir 3.5.3), la gamme d'énergie de ces rayons X peut varier dans une large bande de longueur d'ondes différentes.

Ce faisceau devra être aussi disponible que possible (taux de **fiabilité** élevé), aussi **stable** que possible (reproductibilité du positionnement faisceau), aussi **intense** que possible (bien que ce facteur puisse dépendre de l'expérience en cours). Nous verrons également comment quantifier ces paramètres afin d'avoir un critère d'évaluation.

3.2 La structure organisationnelle de l'ESRF

En janvier 2009, les différents pays membres de l'ESRF sont les suivants :

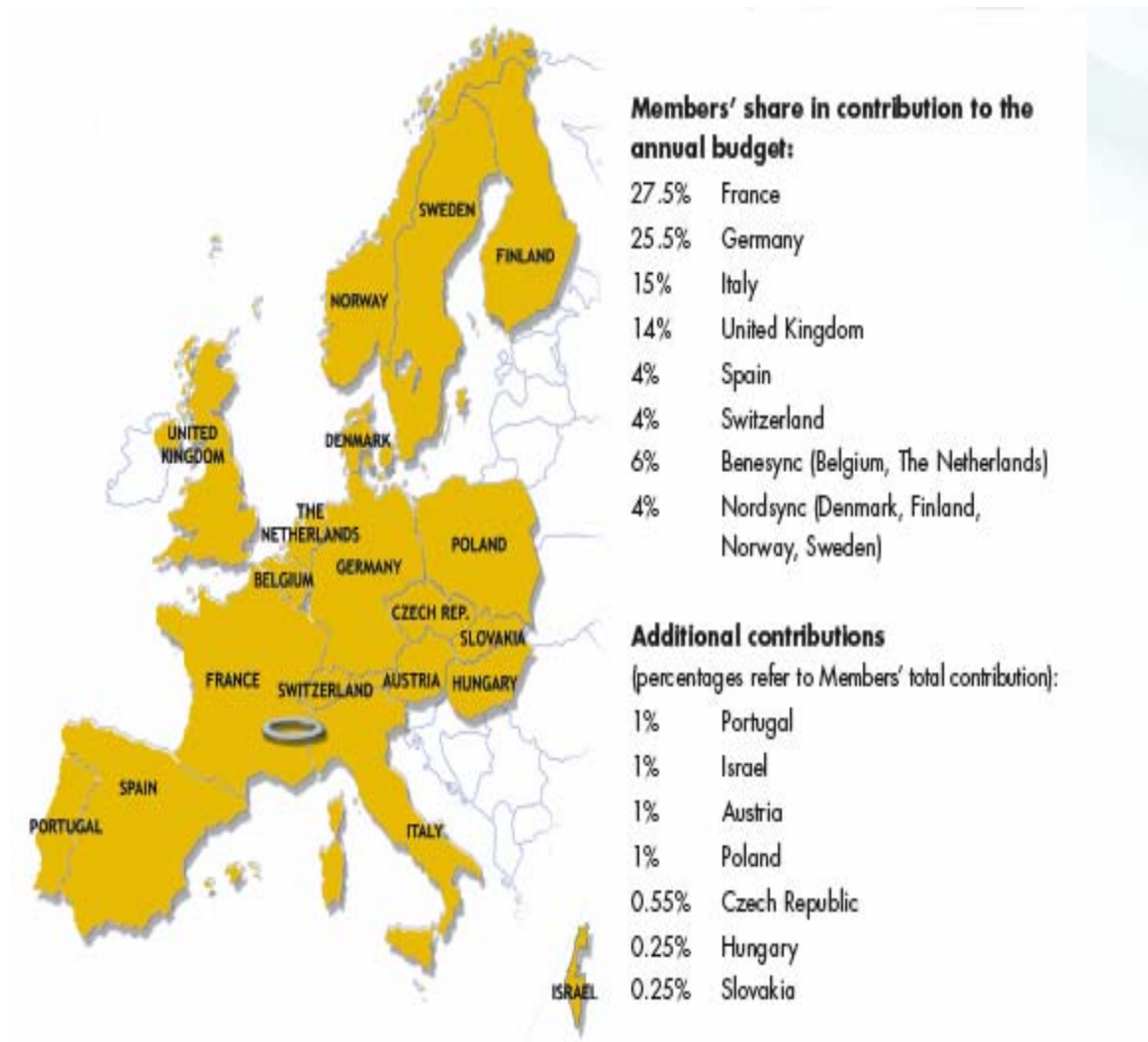


Figure 4 Les pays membres et associés de l'ESRF

En janvier 2009, la structure interne de l'ESRF est représentée comme suit :

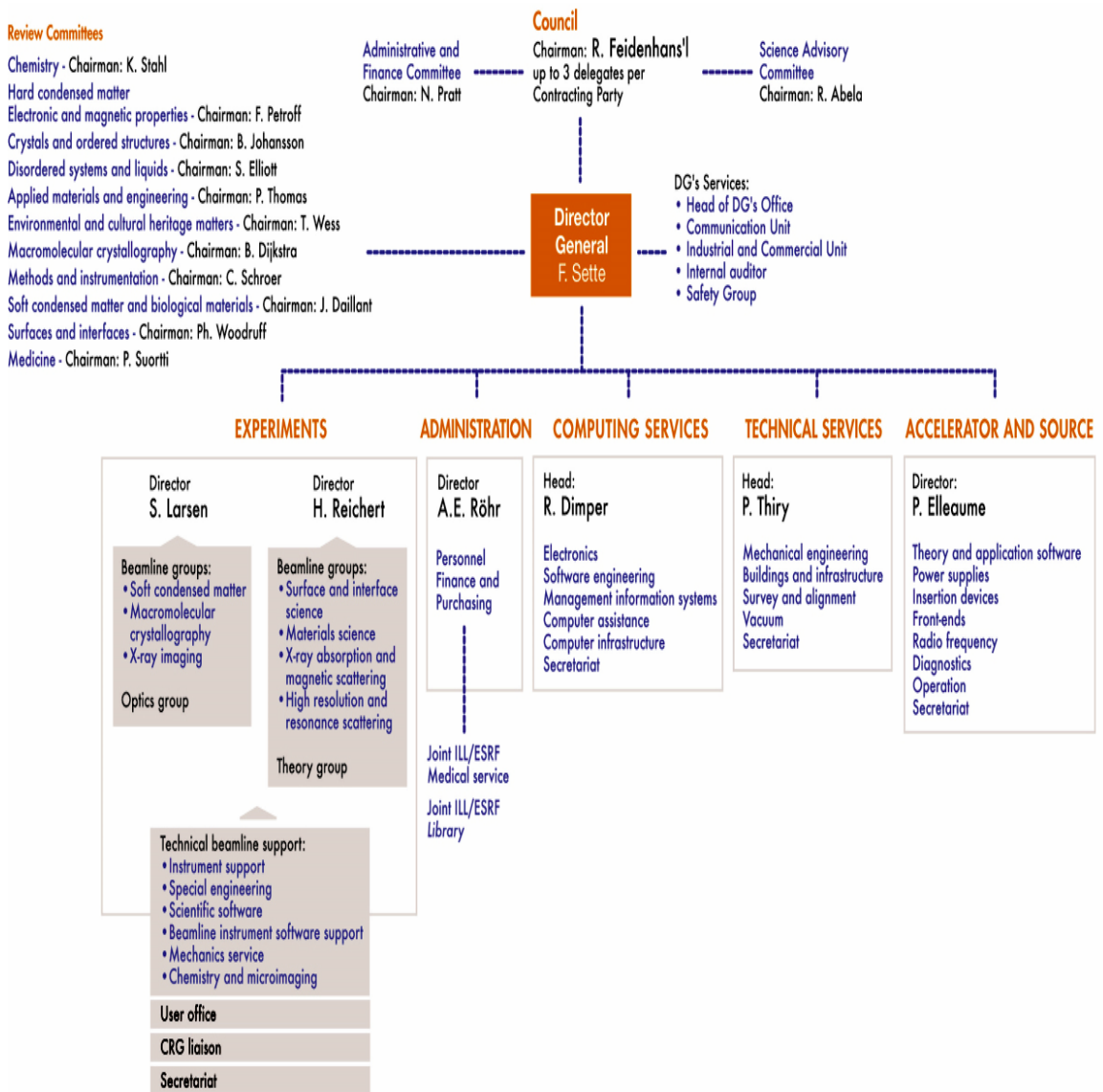


Figure 5 La structure organisationnelle de l'ESRF

On y voit que le groupe Opération est un groupe de la Division Machine, aujourd'hui renommée Division Accélérateurs et Sources. Différents comités participent aux décisions : le Conseil (constitué des représentants des pays membres), le comité Administratif et Financier, le comité scientifique et les 'review committees' qui se réunissent 2 fois par an pour sélectionner les expériences qui auront lieu les 6 mois suivants leurs réunions.

3.3 Les utilisateurs et la recherche à l'ESRF

La figure ci-dessous illustre bien ce qui fait la spécificité d'une source de rayonnement synchrotron : autant de lignes de lumière (et donc d'expériences différentes) que de points sources dans l'anneau de stockage. Toutes ces lignes pouvant évidemment opérer en parallèle !

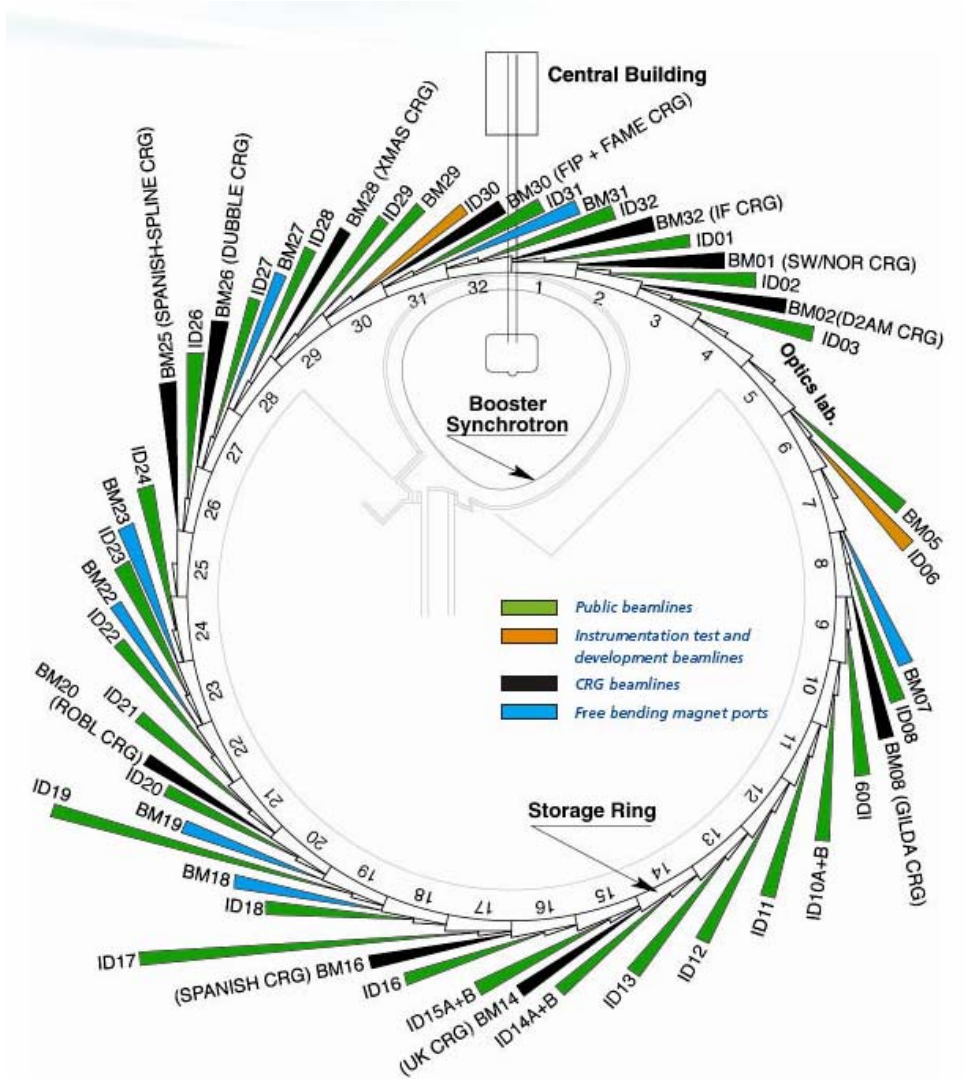


Figure 6 Les lignes de lumière à l'ESRF

- Public beamlines
- Number of independent end-stations
- Insertion device ports for the machine
- CRG beamlines
- Free bending magnet ports

La figure suivante illustre bien les différents types de recherches menées actuellement à l'ESRF, couvrant quasiment tous les domaines de la science et de la technologie.

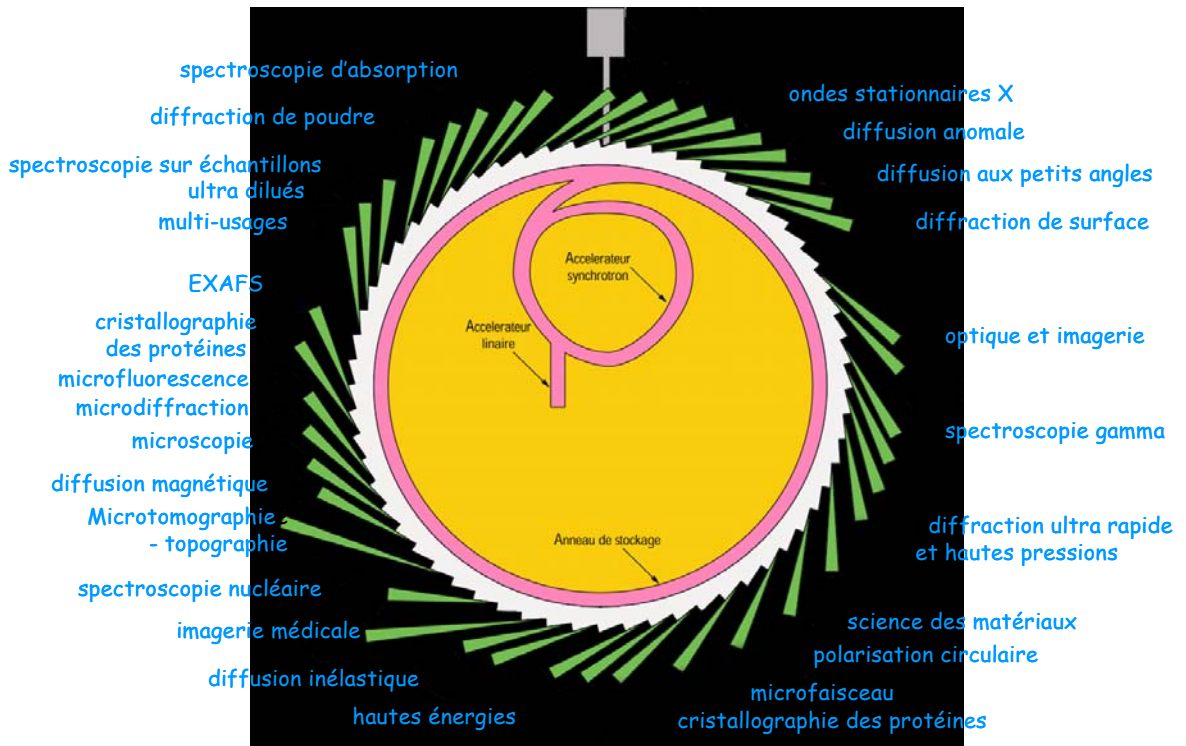


Figure 7 Les différentes recherches à l'ESRF

Comme expliqué dans l'introduction, les outils requis pour l'opération des accélérateurs sont essentiellement déterminés par la qualité du faisceau nécessaire pour l'expérience, que ce soit en terme d'intensité, de stabilité, de taille faisceau, etc. Dans ce but, je donnerai quelques exemples de recherches effectuées à l'ESRF afin de mieux percevoir les ordres de grandeurs.

3.3.1 Biologie

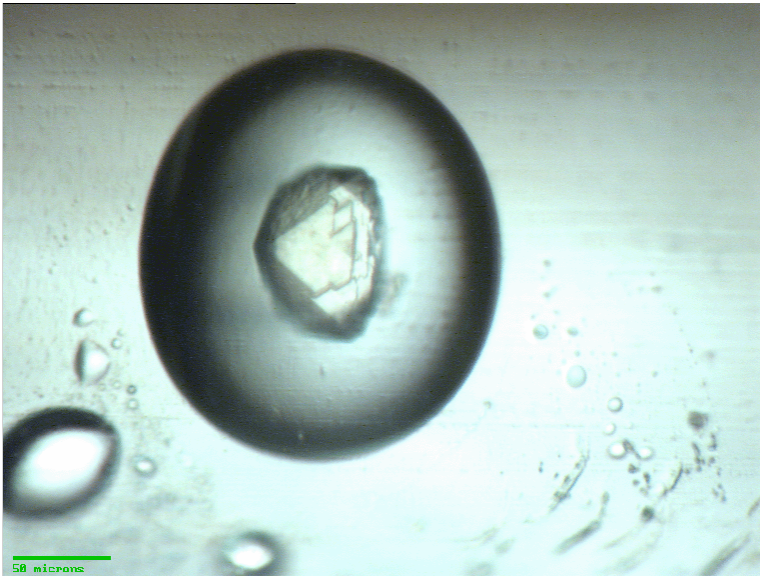


Figure 8 Un échantillon d'une centaine de microns de diamètre

A titre d'exemple, la cristallographie macromoléculaire a pour but d'étudier la structure tridimensionnelle de macromolécules biologiques. Il est courant d'étudier des échantillons dont la taille avoisine les 20 microns !

Ces utilisateurs seront particulièrement demandeur d'un faisceau stable, éventuellement structuré en temps mais pas nécessairement intense (trop de photons pouvant détruire l'échantillon !) et bien sûr, comme pour toute demande, un faisceau fiable afin d'analyser le plus d'échantillons possibles dans un temps donné.



Figure 9 : Un échantillon invisible à l'oeil nu est positionné pour être exposé aux rayons X. Un traitement ultérieur révélera sa structure en 3 dimensions

La structure en temps du faisceau d'électron fera que l'échantillon est bombardé par un faisceau de rayons X lui-même structuré en temps, comme un objet éclairé par une lumière stroboscopique. La reconstitution de toutes ces 'photos' peut donner lieu à un film, par exemple d'une protéine en action avec une image toutes les 100 picosecondes !! ou aussi d'une réaction chimique rapide.

3.3.2 Sciences des matériaux

Les exemples étant innombrables, citons-en un populaire à l'ESRF : l'étude des fils d'araignée !

Le fil d'araignée présente une solidité bien plus élevée que n'importe quel autre matériau artificiel de même taille. En connaître la structure dès sa production permettrait très probablement de créer des matériaux composites bien plus solides que ceux connus actuellement.

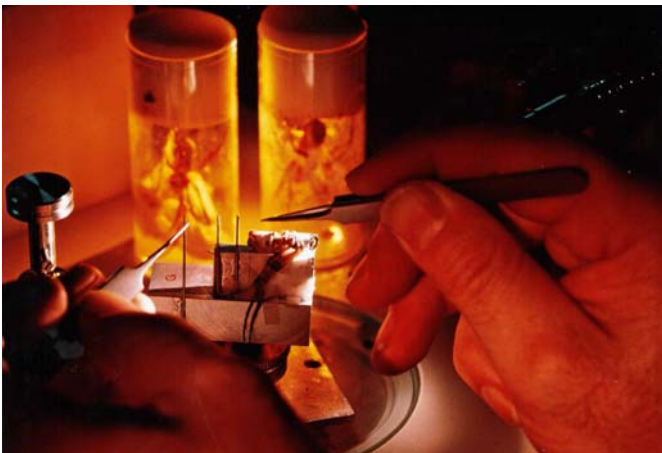


Figure 10 Une araignée est placée dans un dispositif expérimental. Son fil sera exposé aux rayons X afin de déterminer sa structure dès sa production.

Dans ce cas, les utilisateurs seront surtout exigeants sur les paramètres intrinsèques du faisceau : taille, cohérence.

3.3.3 La Médecine

L'angiographie coronarienne classique pratiquée en cabinet médical n'est pas sans risque et peut être fatale dans certains cas. De plus, l'image obtenue, est loin d'être idéale car peu précise. Des essais ont donc été réalisés avec succès à l'ESRF. Les images obtenues ont une résolution inégalée :

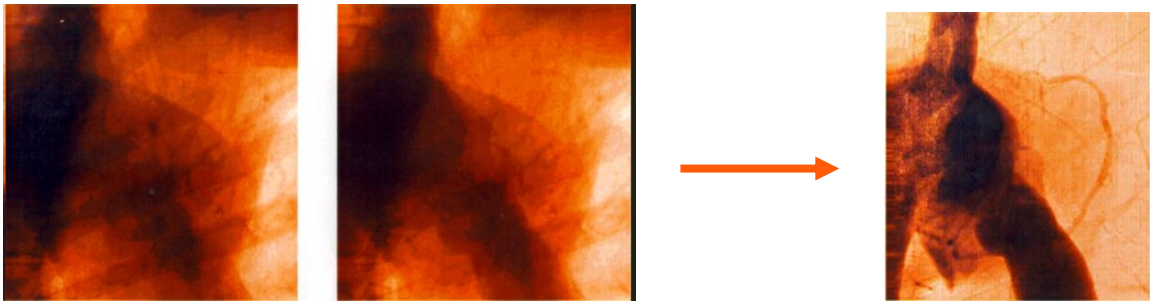


Figure 11 Des images d'une angiographie classique

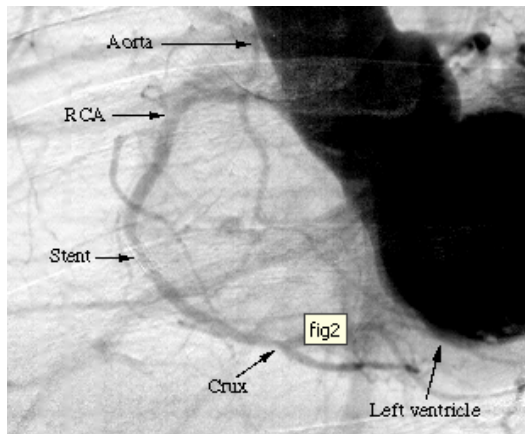


Figure 12 Des images d'une angiographie obtenues à l'ESRF (au dessus à droite et ci-contre)

Le patient n'est pas anesthésié, il est assis sur une chaise 'médicale' et l'exposition au faisceau dure environ 2 heures. Dans ce cas, les utilisateurs ont un besoin absolu d'un faisceau fiable (c-à-d, pas de panne pendant 2 heures) sans quoi une nouvelle exposition pourrait être nécessaire ...

D'autres programmes très porteurs sont actuellement en cours tel le traitement des tumeurs du cerveau par irradiations à l'aide de microfaisceaux.

3.3.4 La Géophysique

L'objectif de ces recherches est de comprendre les phénomènes physiques se passant dans des conditions extrêmes de température et de pression. Il s'agit par exemple de reproduire les phénomènes se passant au centre de la Terre. Pour ce faire, l'échantillon sera inséré entre 2 diamants sous pression. En collimatant le faisceau pour réduire sa taille sur l'échantillon à $10\ \mu\text{m} * 10\ \mu\text{m}$ (!), des pressions de l'ordre du Megabar seront alors obtenues !

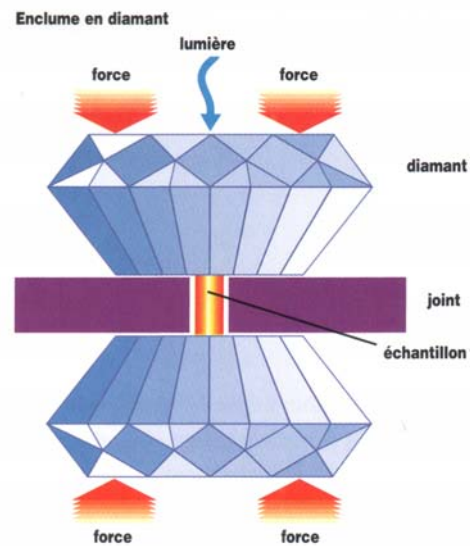
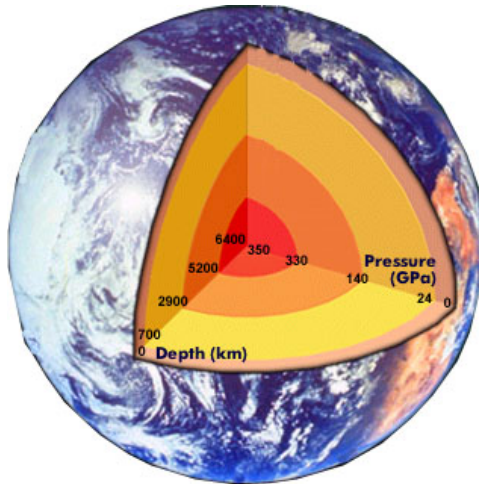


Figure 13 Un échantillon pressé entre 2 diamants et exposés aux rayons X intenses permet de recréer des conditions de pression/température extrêmes

Ces utilisateurs exigeront le faisceau le plus intense possible avec un temps de vie le plus élevé possible.

3.3.5 L'imagerie

Dans ce cas, c'est la faible taille de la source ($20\ \mu\text{m}$) et la grande distance ($150\ \text{m}$) qui permettront d'observer en contraste de phase.

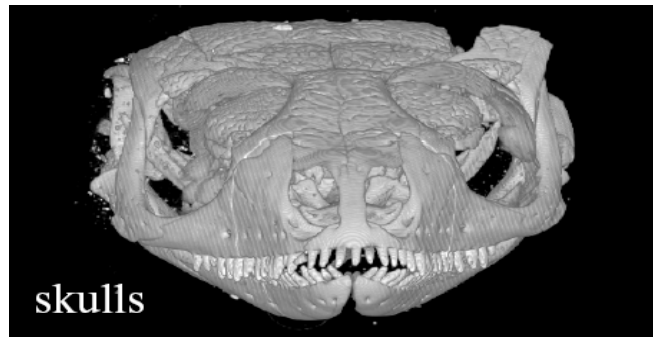
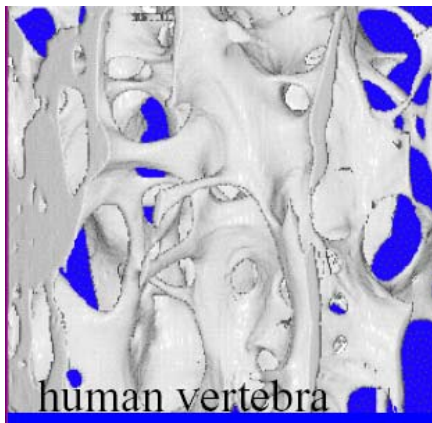


Figure 14 : reconstruction 3D d'un lézard fossilisé

Cette technique a même été utilisée pour reconstruire le squelette d'un fœtus de dinosaure à l'intérieur de l'œuf sans le casser ou aussi, visualiser une abeille de 100 millions d'années fossilisée dans de l'ambre !

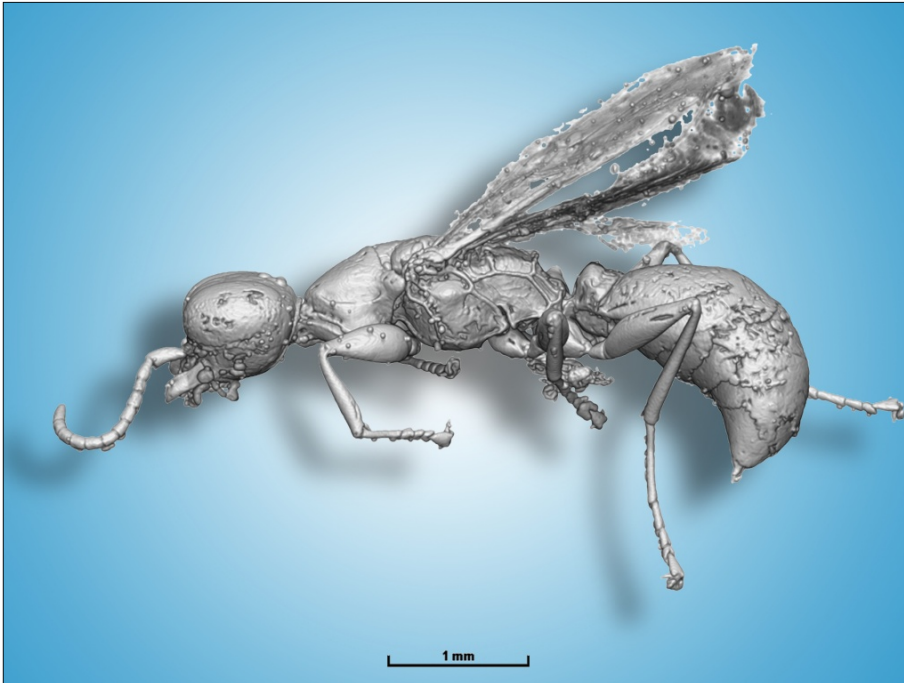


Figure 15 : Reconstruction 3D d'une abeille de 100 millions d'années fossilisée dans de l'ambre.
Credit : P Tafforeau

3.3.6 La spectroscopie par absorption de rayons X

Sans rentrer dans le détail, retenons que cette technique permet de mesurer les déplacements atomiques de l'ordre du ... femtomètre (10^{-15} m). Pour mieux apprécier, imaginons qu'un femtomètre est à un mètre ce qu'un cheveu est ... à la distance Terre-Soleil !!

Cette performance a été récemment obtenue à l'ESRF grâce à la **stabilité et la brillance élevée** du faisceau X délivré !

L'étude des réactions chimiques dans les pots catalytiques des voitures est une des nombreuses applications de cette technique.

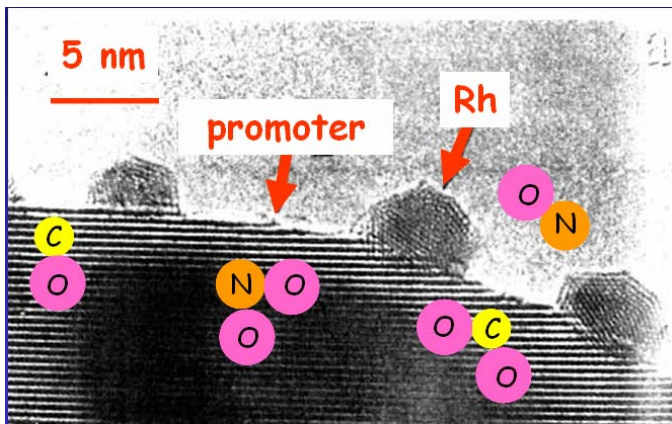


Figure 16 : Cette technique permet de mieux comprendre les réactions chimiques au sein d'un pot catalytique

3.3.7 Les applications industrielles

Les applications industrielles sont extrêmement variées : recherche en cosmétique, en pharmacologie, en bâtiment (béton, ciment), en microélectronique, les plastiques, les peintures, etc.

Ces utilisateurs, en fonction de leurs expériences, auront besoin tantôt d'un faisceau stable, tantôt d'un faisceau intense ou pulsé ou ... tout à la fois.

La renommée internationale de l'ESRF est telle que des industriels privés viennent du monde entier pour bénéficier du rayonnement synchrotron. Le critère d'excellence pour ces utilisateurs sera avant tout la fiabilité.

Ce tour d'horizon non exhaustif aura eu comme but de nous faire mieux comprendre les exigences des utilisateurs à travers les recherches menées. Comme nous l'avons dit plus haut, cela déterminera automatiquement comment l'Opération des accélérateurs de l'ESRF doit être menée au quotidien.

4 LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

Introduction



Figure 17 : Vue aérienne de l'ESRF

La chaîne d'accélérateurs commence par l'accélérateur linéaire aussi appelé Linac (Linear Accelerator). C'est à ce niveau que seront produits les électrons pour être 'pré accélérés'. Après avoir atteint une énergie de 200 MeV, les électrons seront transférés dans le synchrotron (Booster) via une ligne de transfert. Dans le Booster, les électrons seront accélérés de 200 MeV à 6 GeV, l'énergie nominale des électrons à l'ESRF. Ils seront ensuite injectés dans une ligne de transfert afin d'être dirigés vers l'anneau de stockage.

4.1 Le LINAC ou Accélérateur Linéaire.



Figure 18 : Vue panoramique de l'accélérateur linéaire

Le Linac consiste en une triode (cathode – anode – grille) alimentée par 100 KV. Les électrons produits ont donc une énergie de 100 keV. Les électrons sont ensuite accélérés par 2 sections accélératrices de 6 mètres chacune, chaque section accélérant le faisceau de 100 MeV, soit au total 200 MeV.

Le Linac peut fonctionner selon deux modes distincts. Le premier mode correspond aux modes multipaquets de l'anneau de stockage. Dans ce cas, le Linac délivre des paquets d'électrons d'une longueur de 1 μ sec vers le synchrotron, remplissant la totalité de la circonférence du synchrotron (300 mètres de circonférence = 1 μ sec). Dans le second mode, c'est un paquet d'une largeur de 2 nanosec qui sera généré, remplissant alors 1 seul bucket RF du synchrotron, c-à-d, 1 seul espace parmi 352 espaces possibles (voir plus loin). Des variantes de timing permettent cependant de générer plusieurs impulsions de 2 nsec afin de remplir –en routine- 2, 4 ou 5 paquets d'électrons sur la circonférence du Booster.

Les caractéristiques du Linac sont les suivantes:

Mode d'opération	Impulsions longues	Impulsions courtes
Courant pic	25 mA	250 mA
Longueur de pulse	1 μ s	2 ns
Dispersion en énergie	+/- 1%	+/- 0.5%

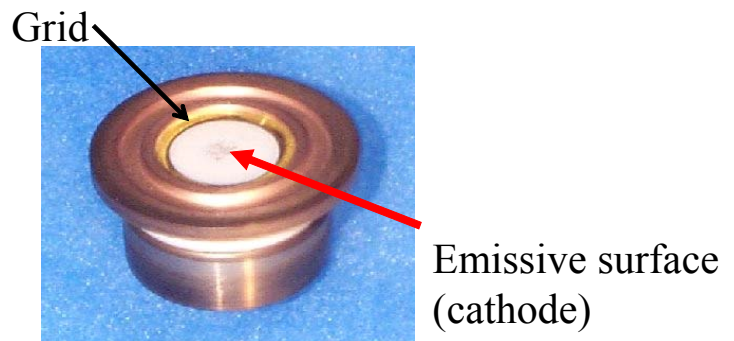


Figure 19 photo du canon à électron et de la cathode du Linac

4.2 La ligne de transfert Linac vers Booster (dite TL1)



Figure 20 : photo panoramique de la ligne de transfert TL1

La ligne de transfert joignant le Linac au Booster est longue de 16 mètres. Elle inclut 2 aimants dipolaires et 7 quadrupôles. Le réajustement de la position du faisceau se fait à l'aide de 2 paires d'aimants correcteurs (dits 'steerers'). La position du faisceau d'électron peut être vérifiée à l'aide d'écrans fluorescents insérables mais aussi, depuis peu, à l'aide du rayonnement synchrotron issu des dipôles.

4.3 Le Synchrotron

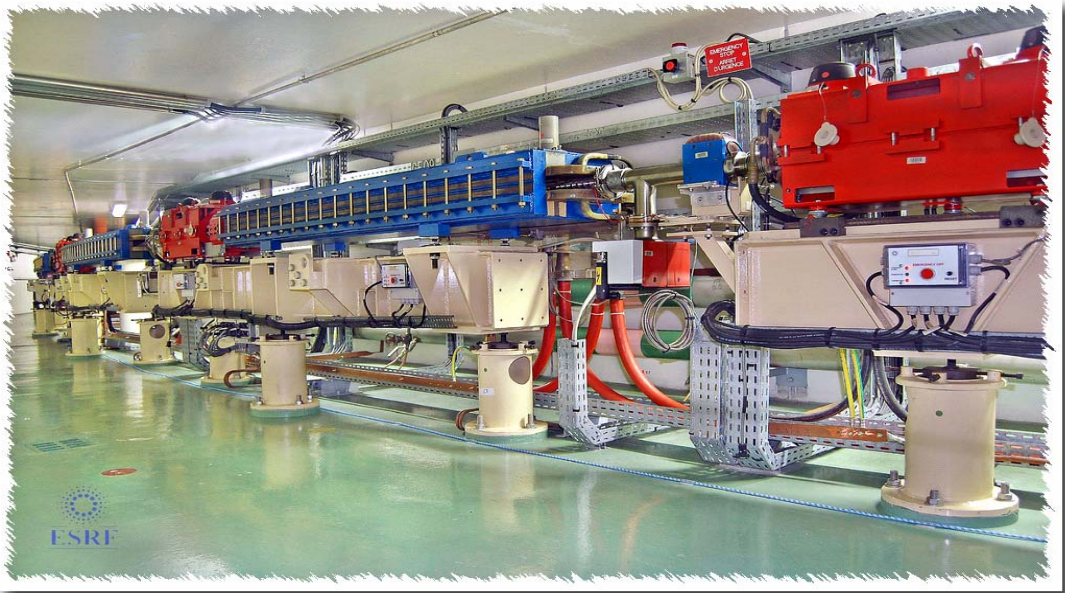


Figure 21 : vue panoramique du synchrotron

D'une circonférence de 300 mètres, le synchrotron a pour objectif d'accélérer les électrons de 200 MeV à 6 GeV. Ce processus ne dure que 50 msec. La structure magnétique a été conçue pour obtenir une émittance de l'ordre de 10^{-7} p m.rad à 6 GeV. Le maillage magnétique est assez classique, de type FODO, c-à-d, une alternance de quadrupôles focalisants et défocalisants séparés par de petites sections droites. Sur les 3 sections droites, 1 est utilisée pour placer 2 cavités radio-fréquence, 2 autres pour les éléments d'injection (venant de TL1) et d'extraction (vers TL2). Le synchrotron est composé de 3 superpériodes, chacune composée de 13 cellules élémentaires, soit 39 cellules au total.

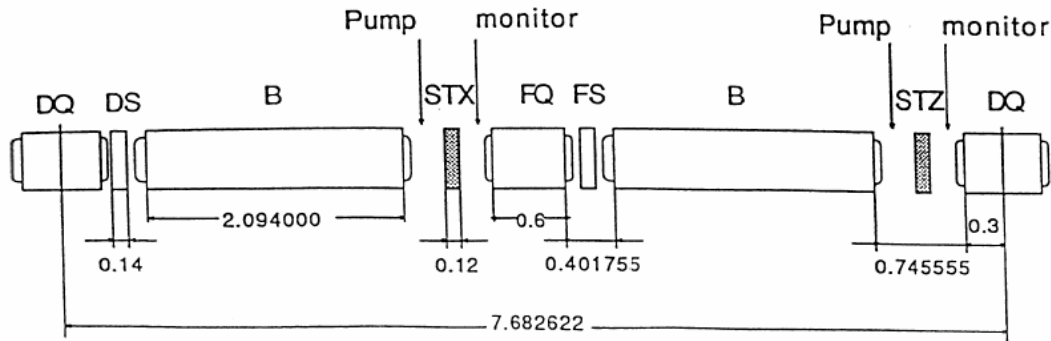


Figure 22 schéma d'une cellule type du booster

Les 3 familles d'aimants (dipôles, quadrupôles focalisants et défocalisants) sont alimentées par des alimentations indépendantes. De plus, chaque famille est alimentée par une composante DC et une composante AC. C'est la combinaison de ces deux composantes qui va permettre, dans chaque famille d'aimants, de générer un champ magnétique variable en temps et homothétiques, capable de capter les électrons provenant du Linac à 200 MeV et de les maintenir sur une trajectoire constante jusqu'à leur énergie de 6GeV (tandis que ces électrons gagneront de l'énergie grâce à la tension accélératrice des cavités radiofréquences – voir ci-dessous). La période d'un cycle d'accélération dure 100 msec : 50 msec pour grimper de 200 MeV à 6 GeV et 50 msec pour redescendre afin de capter les paquets suivants. Il est aussi important de noter que lorsque le champ magnétique est minimum dans les aimants de déviation, cela définit ce que l'on appelle le « T0 », c-à-d, un genre de 'top départ' pour tout le système de timing qui va gérer tout le cycle d'injection / extraction du Linac jusqu'à l'anneau de stockage.

Le système **radio-fréquence** consiste en 2 cavités à 5 cellules de type LEP, chacune équipée de 2 fenêtres. Chaque fenêtre consiste en un disque d'alumine séparant l'ultra-vide de la pression atmosphérique et par lequel va passer toute la puissance radio-fréquence. Cette puissance est générée par un klystron de 1 MW à une fréquence de 352.2 MHz.

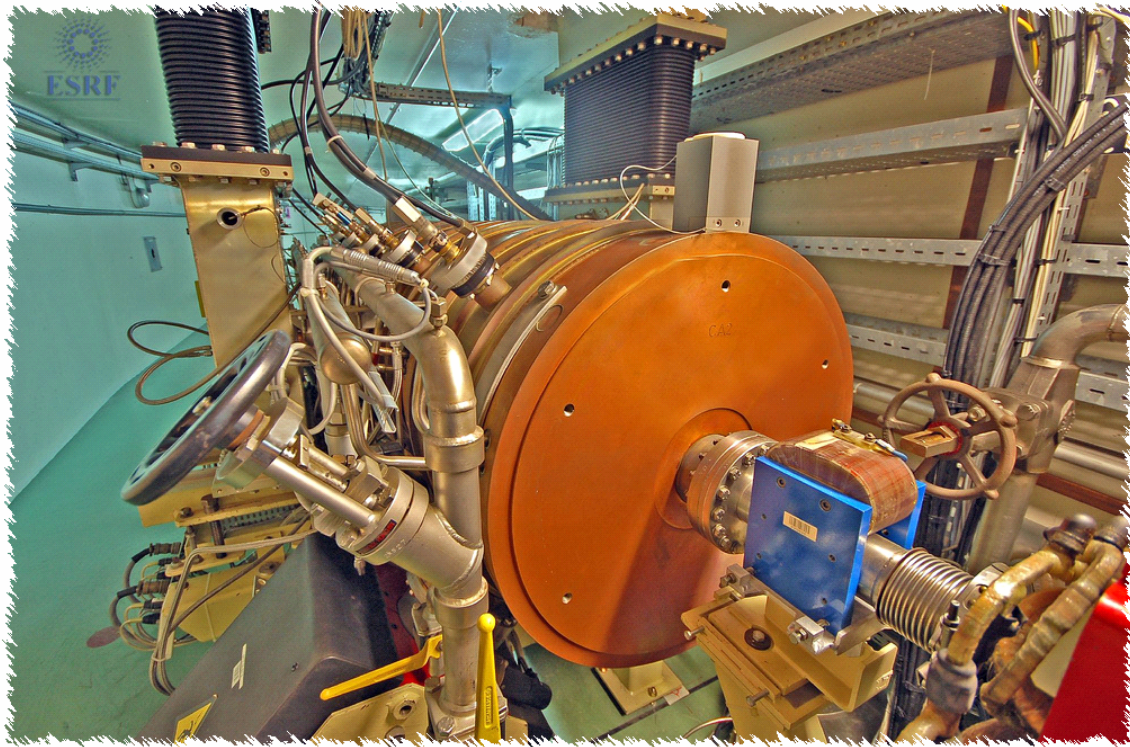


Figure 23 Une des 2 cavités radio-fréquence du synchrotron

De nombreux outils de diagnostic sont installés tout autour du synchrotron. Outre la mesure du courant total circulant (mesurée par des transformateurs de courant), un des outils de diagnostic principal le système de mesure de position du faisceau (BPM = beam position monitor) qui mesure la position du faisceau à 75 endroits différents. Ces mesures permettent à un programme de calculer et dessiner l'orbite fermée à tout moment du cycle d'accélération. Chaque bloc comporte 4 électrodes qui vont chacune indépendamment, capter le signal. Soit A, B, C, D les 4 signaux, il est alors possible, après traitement électronique de déduire les désalignements du faisceau dans chaque plan, par rapport au centre du bloc BPM.

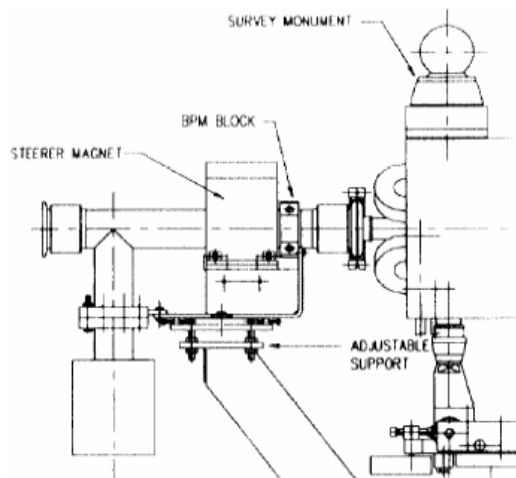


Figure 24 :Un bloc BPM sur son support

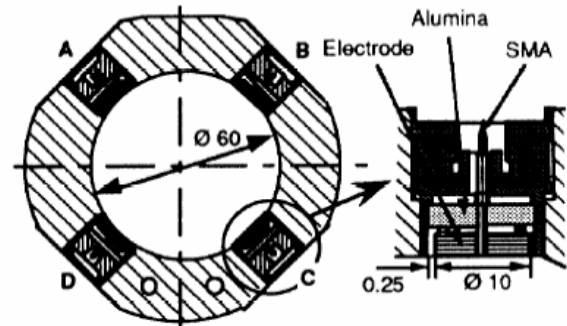


Figure 25 : Un bloc BPM et le détail de l'électrode

Il y a également 8 écrans fluorescents amovibles répartis autour du synchrotron permettant de visualiser la progression du faisceau lors du premier tour.

Il est également possible de déduire la position du faisceau d'électron par la visualisation de la position du rayonnement synchrotron issue des dipôles du Booster. Cette méthode a le grand avantage d'être non destructive.

Les points de fonctionnements ou nombres d'onde du faisceau (Q_x , Q_z) (voir cours de dynamique du faisceau) sont mesurés par un système de tune monitor qui analyse la réponse en fréquence du faisceau suite à une excitation créée par 2 excitateurs (shakers), un horizontal et un vertical. Il est également possible depuis peu de mesurer ces tunes à n'importe quel moment du cycle d'accélération. Ces mesures sont extrêmement utiles lorsqu'on veut optimiser l'efficacité d'injection en optimisant les tunes à l'extraction. En effet, une fois calculés les tunes théoriques souhaités et censés être optimum, il suffit d'agir sur les alimentations AC/DC des quadropôles pour les changer et ensuite utiliser la mesure de tunes pour s'assurer de leur réelle valeur.

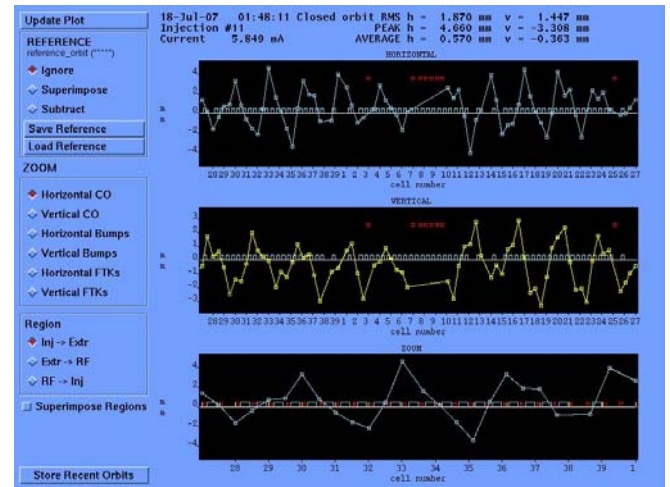
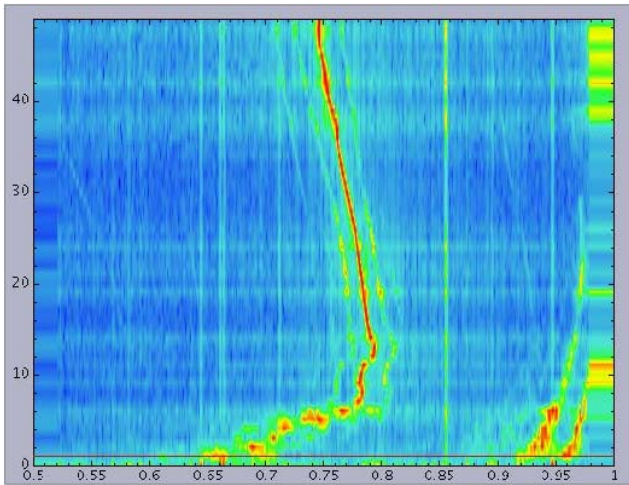


Figure 26 : Le tune du booster pendant le cycle d'accélération de 50 msec et l'orbite du faisceau dans le booster

4.4 ligne de transfert N° 2

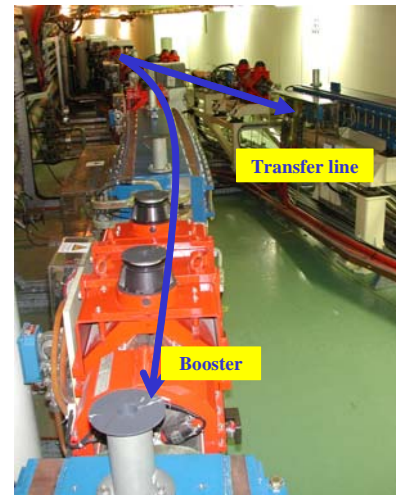


Figure 27 : Vues de la ligne de transfert TL2

Une fois accélérés jusqu'à 6 GeV dans le Booster, les électrons sont acheminés vers l'anneau de stockage via la ligne de transfert N° 2. Elle comprend 5 aimants de déviation parfaitement identiques à ceux du booster et d'ailleurs alimentés en série avec les dipôles du booster. Ils ont donc, de facto, le champ adéquat lorsque le faisceau de 6 GeV est extrait du booster. Il y a également 14 quadrupôles et 17 steerers. Les positions de faisceau, peuvent, une fois de plus, être mesurées à l'aide d'écrans fluorescents amovibles, ou plus récemment, monitorées grâce à des BPMs d'acquisition ultra-rapides. Celle ligne est longue de 65 mètres.

4.5 L'anneau de stockage

D'une circonférence de 844 mètres, l'anneau de stockage constitue le dernier maillon de la chaîne d'accélérateurs de l'ESRF. Les électrons éjectés du synchrotron y seront stockés pour la période la plus longue possible.

On peut déjà dire à ce stade-ci que l'objectif principal des personnes en charge des accélérateurs sera de maintenir ces électrons sur une orbite stable et ce, selon des contraintes importantes : position, stabilité, intensité, etc., jusqu'à la production des faisceaux de rayons X, eux aussi soumis à des contraintes spécifiques de position, stabilité, flux, contrôle de l'énergie, taille, etc.

L'anneau de stockage est constitué de 32 cellules. Chaque cellule étant le miroir de la suivante, on parle aussi de 16 super-périodes, chaque super-période étant constitué de 2 cellules antisymétriques.

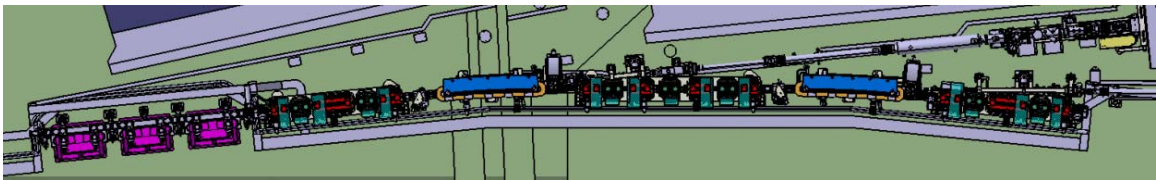


Figure 28 : vue d'une cellule type de l'anneau de stockage

4.5.1 Les aimants

Les aimants de courbure ou **dipôles** ont pour but d'infléchir la trajectoire des électrons et de ce fait, sont automatiquement une source de rayonnement synchrotron.



Figure 29 : vue d'un dipôle de l'anneau de stockage

Les caractéristiques sont les suivantes :

Nombre : 64 (2 par cellules)
Angle de courbure : 5.625°
Champ magnétique : 0.8612 Tesla
Nombre de famille : 1
Courant Nominal : 714.993 A

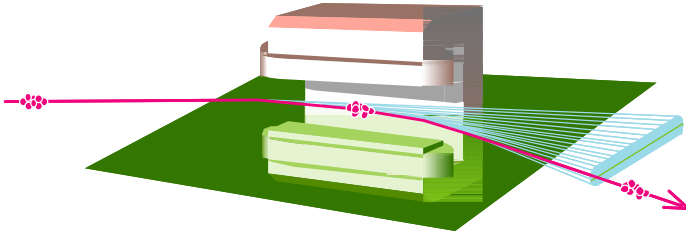


Figure 30 : vue schématique du rayonnement issu d'un dipôle

Les **quadrupôles** ont pour but de focaliser le faisceau d'électron afin de maintenir sa taille aussi petite que possible.

Avant juillet 2007, il y avait 320 quadrupôles (10 par cellule) répartis en 8 familles. Depuis cette date, la structure magnétique a été modifiée dans le but de supprimer 2 familles de quadrupôles et ainsi allonger les sections droites de 5 à 7 mètres. A l'heure où ce cours est écrit, les 2 familles supprimées sont encore physiquement présente mais elles ne sont plus alimentées. Bien sûr, afin de ne pas changer fondamentalement les propriétés optiques de la maille magnétique, le courant a dû être modifié dans les familles restantes :

Nom	Nombre	Courant
QF2	32	216.730 A
QD3	32	-334.022 A
QD4	64	- 415.454 A
QF5	64	411.798 A
QD6	32	- 491.497 A
QF7	32	375.181 A



Figure 31 : photo d'un quadrupôle de l'anneau de stockage

Les valeurs des quadrupôles ont beaucoup d'importance, notamment sur :
 les valeurs des tunes, la taille du faisceau, la vitesse d'injection, les résonances
 bétatroniques, pour ne citer que ces paramètres.

Les **sextupoles** ont pour but de compenser l'effet de chromaticité (en optique classique,
 on parle d'aberration chromatique due à des points de focalisation différents pour des
 longueurs d'ondes différentes). Les sextupôles viennent compléter la focalisation des
 quadrupôles afin de la rendre indépendante de l'énergie des électrons.



NAME	NUMBER	VALUE (Amps)
S4	32	55.775
S6	32	-74.037
S13	32	-39.58
S20	32	-193.852
S19	32	205.938
S22	32	-43.06
S24	32	59.351

Figure 32 : sextupole de l'anneau de stockage

Un sextupôle va donc agir comme un quadrupôle focalisant supplémentaire pour les
 particules de haute énergie et un quadrupôle défocalisant complémentaire pour les
 particules de plus faible énergie, de sorte qu'au final, les particules de différentes
 énergies focaliseront au même point.

Les valeurs des courants de sextupôles auront de l'importance sur les chromaticités, les
 résonances bétatroniques, l'ouverture dynamique, et donc sur le temps de vie du faisceau
 (ce paramètre étant celui qui est directement observable).

Les aimants correcteurs.

Leur rôle est de corriger la trajectoire du centre de masse du faisceau d'électron (l'orbite fermée) afin de la rapprocher autant que possible de l'axe magnétique. Cela peut être fait en générant des faibles champs magnétiques verticaux et horizontaux. Actuellement, la déviation standard dans chaque plan est de l'ordre de 100 μm rms.

A l'ESRF, ces aimants correcteurs sont situés à l'intérieur des sextupôles. Il s'agit des bobinages noirs sur la photo du sextupôle ci-dessus. Vu leur localisation non perpendiculaires, on comprend qu'il faut 3 alimentations indépendantes, pour produire, par combinaisons, des champs horizontaux et verticaux. Bien que les courants maximum de ces correcteurs puissent monter à 3 Amp, les valeurs réelles dépassent très rarement 0.5 Amp.

Des capteurs de positions de faisceau, dits BPM (Beam Position Monitor) mesurent la position du faisceau. Ensuite, un programme visualise l'orbite du faisceau, calcule les déviations dans chaque plan et, à la demande, calcule les valeurs à appliquer sur différents steerers pour minimiser encore plus la déviation de l'orbite. Ces valeurs sont ensuite envoyées aux steerers. Ce processus peut être fait manuellement (pour certaines manipulations, il peut être nécessaire de ne pas corriger l'orbite afin d'en étudier la 'dérive') ou automatiquement de manière transparente (typiquement toutes les 30 secondes, à l'ESRF)

4.5.2 Le système radio-fréquence

Le rôle du système radio-fréquence va être de compenser l'énergie perdue tour par tour par les électrons, par suite de l'émission du rayonnement synchrotron.

L'énergie nominale étant de 6 GeV, on peut calculer que l'énergie perdue sous forme de rayons suite au seul passage dans les aimants de déviation est de 5 MeV. Si l'on tient compte en plus de l'énergie perdue dans les éléments d'insertion, on obtient une énergie totale perdue d'environ 6.25 MeV, énergie qui devra être restituée par le système radio-fréquence.

Trois klystrons sont disponibles pour alimenter les 6 cavités radio-fréquence de l'anneau de stockage. Pour une intensité faisceau de 200 mA, seuls 2 klystrons sur les 3 sont utilisés. Le troisième est 'en réserve' prêt à être utilisé en cas de défaillance d'un des 2 klystrons actifs, grâce à un circuit de guides d'ondes manoeuvrable depuis la salle de contrôle.

Les paramètres principaux sont :

Pour une intensité faisceau de 200mA :

- 6 cavités actives (1 klystron alimente 4 cavités, le deuxième en alimente 2)
- Tension accélératrice : 9 MV
- Tension / cavité : 1.5 MV
- Puissance totale klystrons : 1.3 MW (1MW pour faisceau+42 kW/cavité+20kW réfléchi)

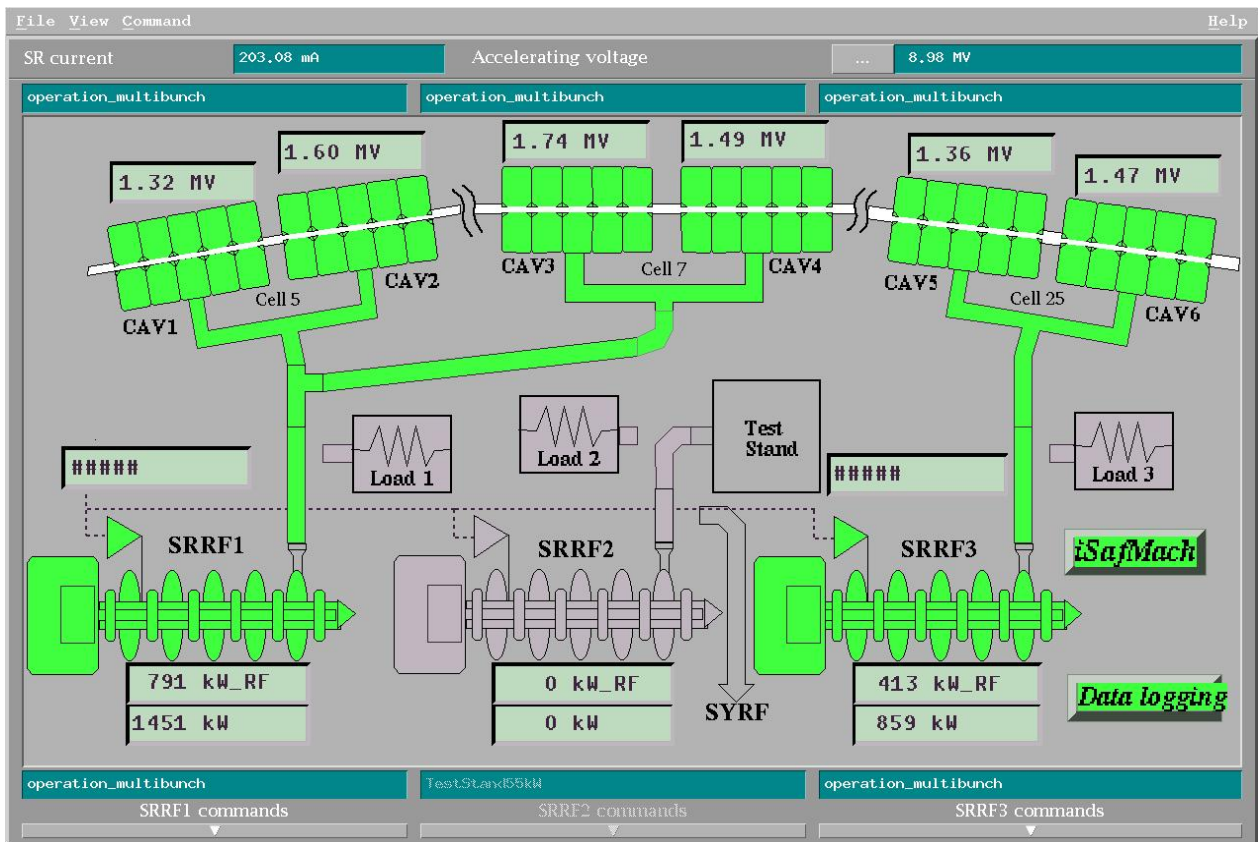


Figure 33 : représentation du système radio-fréquence de l'anneau de stockage

D'un point de vue **macroscopique**, la fréquence RF va imposer le nombre maximum de bunches sur la circonférence.

$$h = \Delta \frac{F_{RF}}{F_{rev}} = 352 \text{ MHz} / 355 \text{ kHz} = 992$$

La géométrie des cavités ayant été optimisée pour résonner à cette fréquence, ce paramètre ne peut PAS être changé.

D'un point de vue microscopique, la fréquence RF va imposer le temps de révolution de la particule de référence. Pour un champ donné des aimants de déviation, elle définit la longueur de la trajectoire et donc, l'énergie de la particule de référence.

Lorsque la fréquence RF est trop élevée (resp. trop basse), la longueur de la trajectoire des particules est plus petite (resp. plus grande). Ces particules qui ne sont pas sur la trajectoire de référence sont dites « off-momentum ».

Pour certaines mesures, telle la mesure de la chromaticité ou l'optimisation des corrections de résonance, on varie délibérément la fréquence RF : on voit très bien le déplacement du faisceau X en fonction de la fréquence RF.



Figure 34 : une des cavités RF de l'anneau de stockage

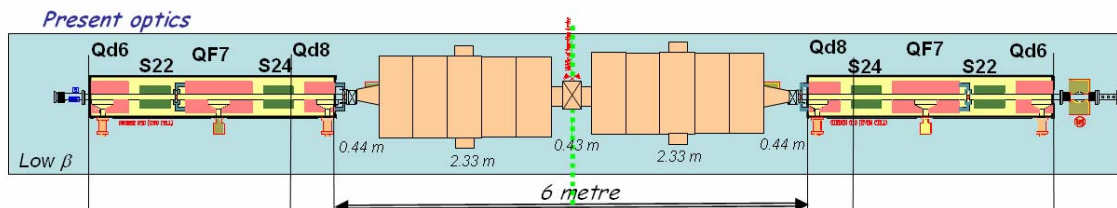


Figure 35 : implantation de 2 cavités RF dans une section droite

Un calcul simple basé sur les équations liant Δ position en fonction de Δ énergie, lui-même fonction de Δ fréquence RF montre que pour une variation de fréquence de 3.5 kHz (pour une fréquence nominale de 352.2 MHz) un déplacement dans le plan horizontal de 18 mm sera induit!

En effet, à l'ESRF, le momentum compaction (α) est de $1.84 \cdot 10^{-4}$, la dispersion maximum η_{\max} est de 0.34 mètres (voir définitions ET équations dans le cours de dynamique des faisceaux).

Ensuite : $\Delta f / f = 3.5 \text{ KHz} / 352.2 \text{ MHz} = 10^{-5}$

→ $\Delta E / E = (\Delta f / f) / \alpha = 10^{-5} / 1.8410^{-4} = 5.410^{-2}$

→ $x_{\text{max}} = \eta_{\text{max}} \cdot \Delta E / E = 0.34 * 5.4 * 10^{-2} = 18 \text{ mm}$

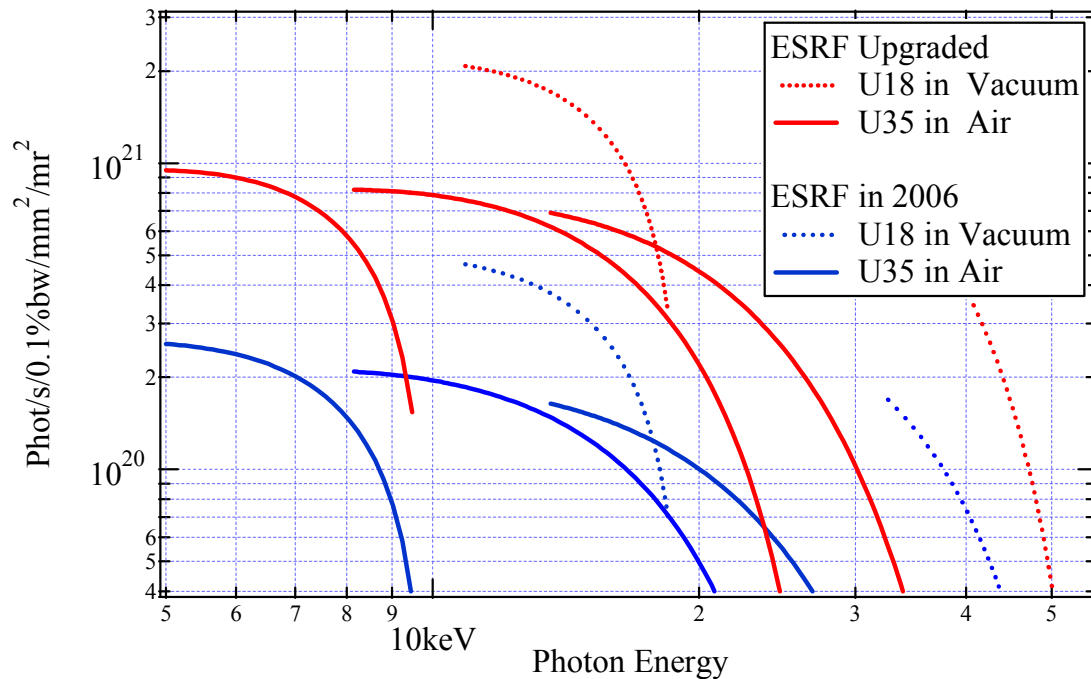
C'est bien ce qu'on observe sur nos écrans.

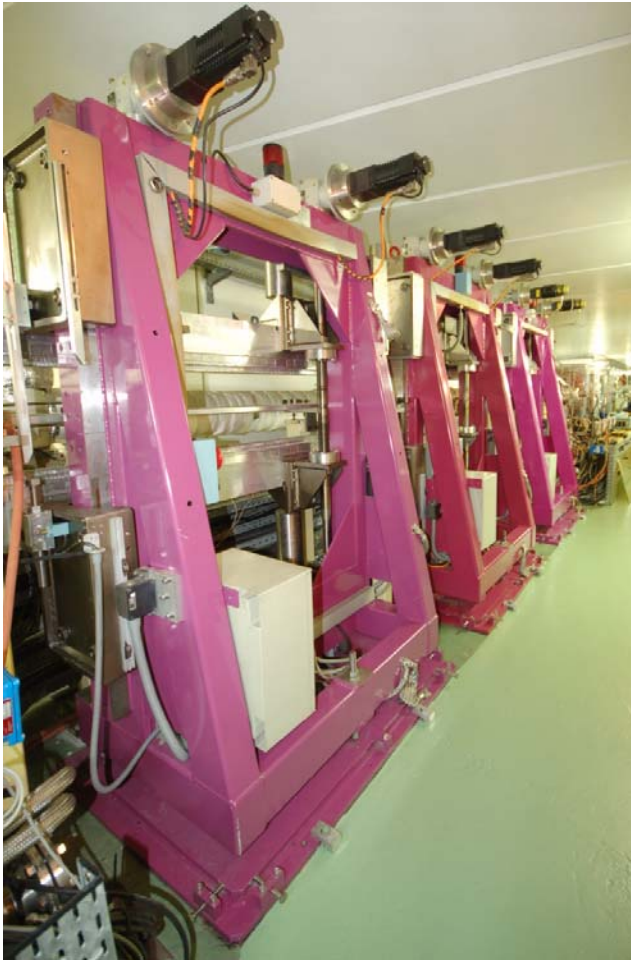
Réciproquement, cela nous aide à comprendre que pour rectifier une trajectoire de quelques microns, une variation de quelques Hz (sur 352 MHz) tout au plus, est nécessaire et ... suffisante !

Ce que l'on a coutume d'appeler « la phase RF » représente la phase entre le signal émis par l'horloge radiofréquence (la master source) et la tension d'une cavité.

4.5.3 Les éléments d'Insertion.

Leur rôle est de produire des rayons X avec des propriétés spécifiques et différentes de ceux émis par les dipôles, par exemple, spectre en énergie variable, polarisation, brillance plus élevée.





Un élément d'insertion produit des rayons X pour une et une seule ligne. Il a d'ailleurs été conçu « sur mesure » pour satisfaire aux exigences d'une ligne de lumière spécifique.

Un élément d'insertion est formé de mâchoires magnétiques. Chaque mâchoire est composée d'une succession de petits aimants permanents avec une direction alternée de leur magnétisation, de sorte que l'électron, dès qu'il pénètre entre ces 2 mâchoires, suive une trajectoire sinusoïdale.

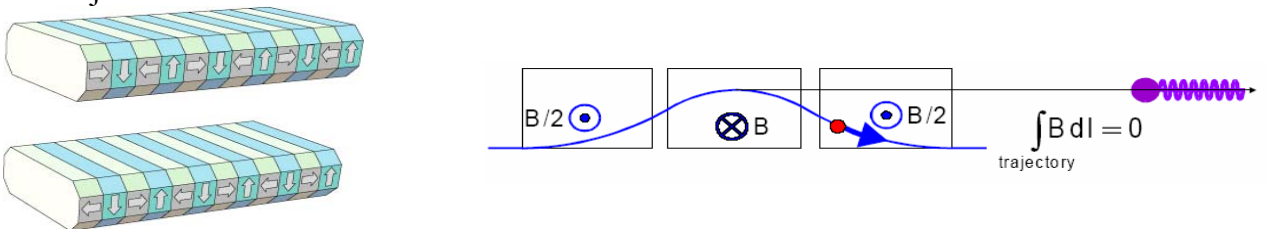


Figure 36 : représentation des mâchoires magnétiques et trajectoire des électrons entre ces mâchoires

On considère 2 grandes familles d'éléments d'insertion :

- les wigglers : petits nombres de périodes mais des champs magnétiques élevés. Ils produiront des rayons X 'durs' ($E > 10$ keV).

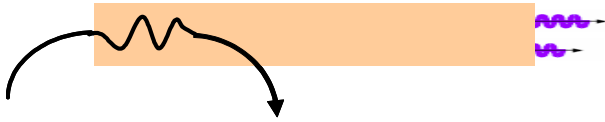


Figure 37 : représentation schématique du rayonnement issu d'un wiggler

- Les onduleurs : un grand nombre de périodes pour un champ magnétique plus petit. Ils produiront un flux plus élevé mais à plus basse énergie.

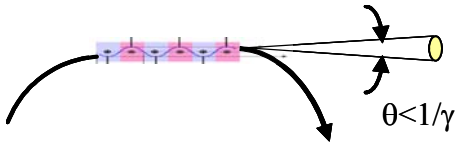


Figure 38 : représentation schématique du rayonnement issu d'un onduleur

Le principal paramètre modifiable par l'expérimentateur (ou l'opérateur) est la distance entre les 2 mâchoires (le « gap »). Quand le gap est très ouvert (quelques cm), le champ magnétique est si faible qu'il n'influence plus la trajectoire du faisceau d'électron. A l'inverse, pour des gaps très faibles (jusque 5 mm pour les onduleurs sous vide à l'ESRF), la brillance (c-à-d, le flux de photon) augmente considérablement.

4.5.4 Les départs de ligne (ou « Front Ends »)

Leur rôle est d'acheminer les rayons X produits soit par les dipôles, soit par les éléments d'insertion, de l'anneau de stockage vers les lignes de lumière. De plus, ils assurent une séparation entre le vide de l'anneau de stockage et le vide des lignes de lumière. Finalement, leur rôle est également d'arrêter les rayons X lorsqu'ils ne sont pas utilisés par les utilisateurs.

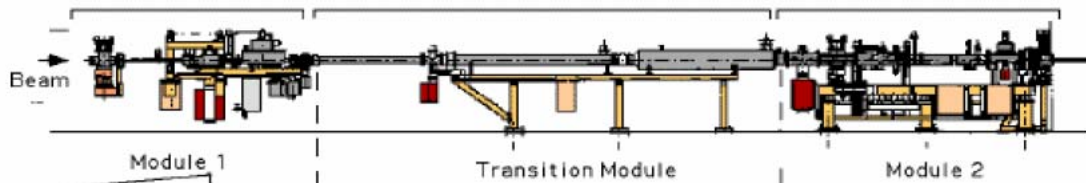


Figure 39 : représentation schématique d'un départ de ligne

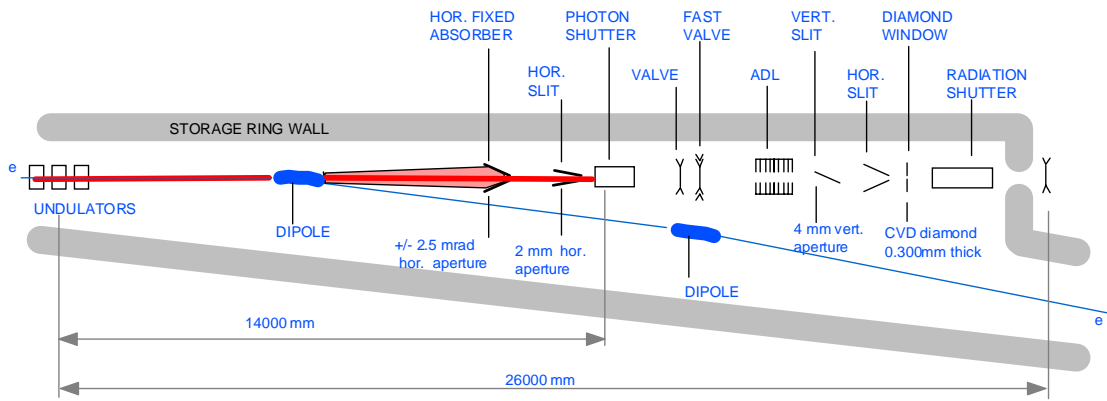


Figure 40 : les éléments d'un départ de ligne

Fonctionnalités :

Module 1 :

- L'absorbeur rayons X : en position ouverte, laisse passer le faisceau. En position fermée, arrête les rayons X avec une pièce de cuivre Glidcop refroidie à l'eau.
- L'absorbeur fixe : absorbe les photons parasites
- La fente horizontale : définit l'ouverture horizontale (FE haute puissance)
- La vanne pneumatique : isole le vide entre anneau de stockage et Front End.
- Le shutter rapide : vanne rapide en cas de fuite de vide soudaine.

Module 2 :

- L'absorbeur : absorbe les photons parasites provenant des aimants de courbure.
- Les fentes : refroidies à l'eau, définissent les ouvertures dans chaque plan.
- Les filtres : feuilles de carbone refroidies à l'eau pour absorber les photons de basses énergies et ainsi protéger les fenêtres en béryllium.
- Les fenêtres : sépare le vide du côté anneau de stockage et côté expérimental (fenêtre de béryllium ou diamant)
- Le 'radiation shutter' : Bloc de plomb qui arrête les radiations en position fermée.
- Le boîtier électrique : La plupart des câbles de puissance/ signaux arrivent dans ce boîtier.

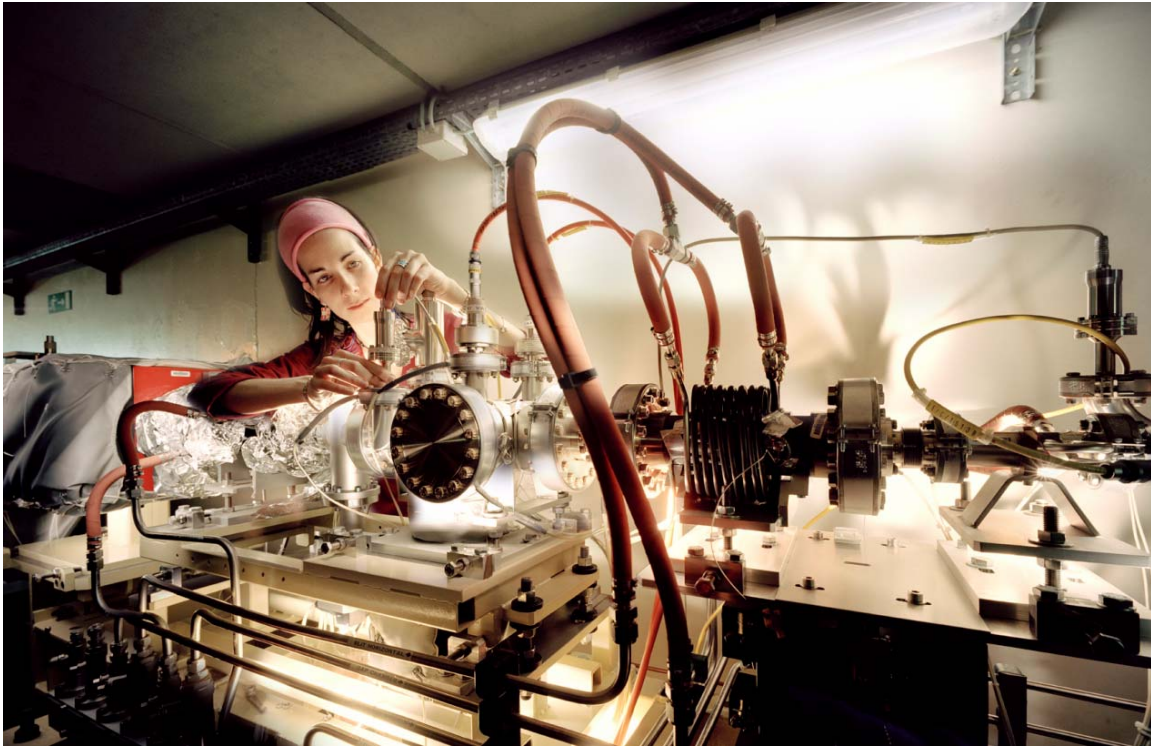


Figure 41 : photographie d'un composant de départ de ligne

4.5.5 Le Diagnostic faisceau

- Les transformateurs de courant :

Ils mesurent l'intensité du faisceau. Deux grandes familles se distinguent :

- les PCT (pour « Parametric Current Transformers ») : ils ont été conçus pour lire un courant jusque 300 mA avec une résolution de 2 μ A. Ils mesurent l'intensité TOTALE du faisceau circulant (le temps d'intégration est de 1 seconde).
- les FCT (pour « Fast Current Transformers ») : ils ont été conçus pour mesurer l'intensité d'UN SEUL paquet d'électrons (ou plusieurs paquets si ceux-ci sont suffisamment rapprochés pour être contenu dans une fenêtre de quelques nanosecondes). Ce type de transformateur est très utile pour mesurer l'intensité d'un paquet isolé, notamment dans certains modes de livraison décrits plus loin. Ou également pour mesurer l'intensité de chacun des 16 paquets dans le mode dit '16 bunches' – voir plus loin.

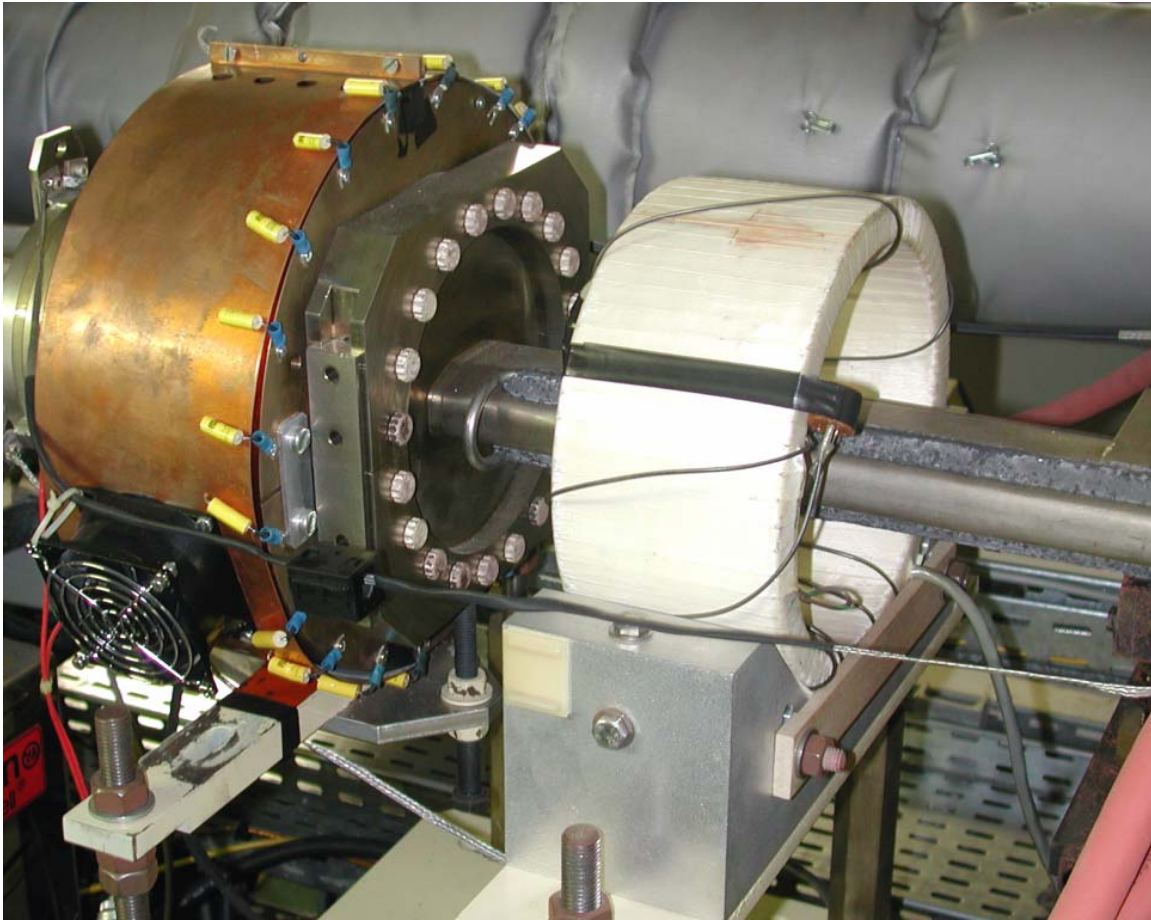


Figure 42 : un transformateur de courant

- Les BPMs (Beam Position Monitor)

Au nombre de 224 (c-à-d un tous les 4 mètres en moyenne !), leur rôle est de mesurer les positions centre de masse du faisceau d'électron dans les plans horizontal et vertical.

Jusqu'à fin 2008, la mesure consistait en la lecture de la tension induite par le faisceau chargé, sur les 4 électrodes de chaque bloc BPM. Après traitement (démodulation des 4 signaux à la fréquence de 352.2 MHz), ces 4 signaux étaient combinés pour donner l'information de la position du faisceau par rapport au centre du bloc BPM.

Le résultat était présenté sous forme de graphe montrant les déviations de l'orbite fermée dans chaque plan.

Un inconvénient majeur de ce système est qu'il ne permettait pas de tracer l'orbite au premier tour d'un faisceau injecté, et qui pour différentes raisons, se serait perdu lors de ce premier tour. Cette fonction est capitale quand nous devons savoir où se perd le faisceau, suite à un réalignement de composants de l'anneau de stockage par exemple.

Depuis cette date, c'est le nouveau système "Libera-Brillance" qui effectue le traitement des faibles signaux RF sur les 224 stations BPMs.

Ce système remplace avantageusement le précédent qui a démontré sa fiabilité pendant 17 ans!

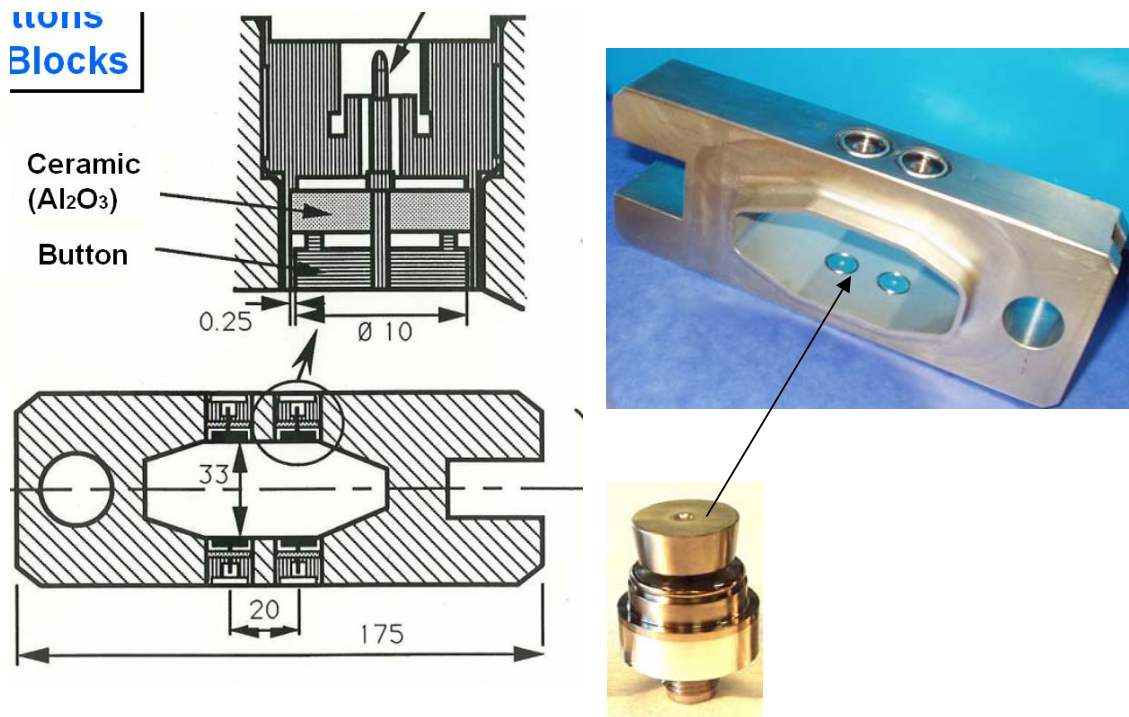


Figure 43 : Schéma et photo d'un bloc BPM, détail de l'électrode et intégration du bloc sur un quadrupole

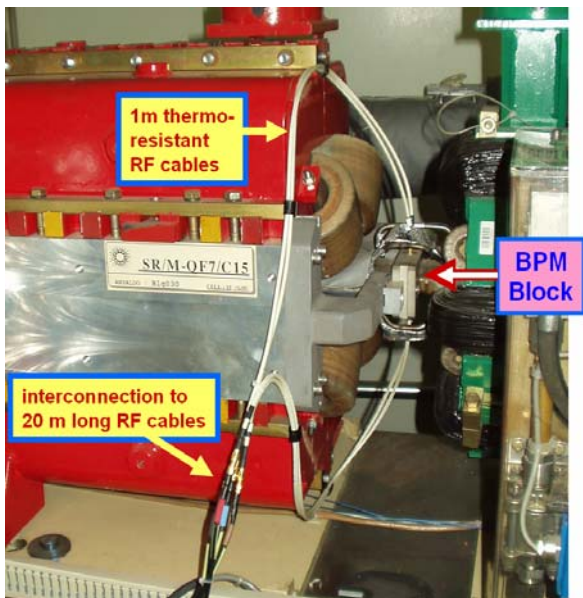


Figure 44 : Photo d'un bloc BPM, intégration du bloc sur un quadrupole.

Ce nouveau système traite les 4 signaux RF en parallèle et de ce fait, permet de suivre le faisceau dès son entrée dans l'anneau de stockage, et aussi permet de faire des calculs 'tour-par-tour'. En outre, les « Liberas » permettent d'obtenir une stabilité de position inégalée sur une large gamme dynamique de d'intensité (0.1 à 300 mA).

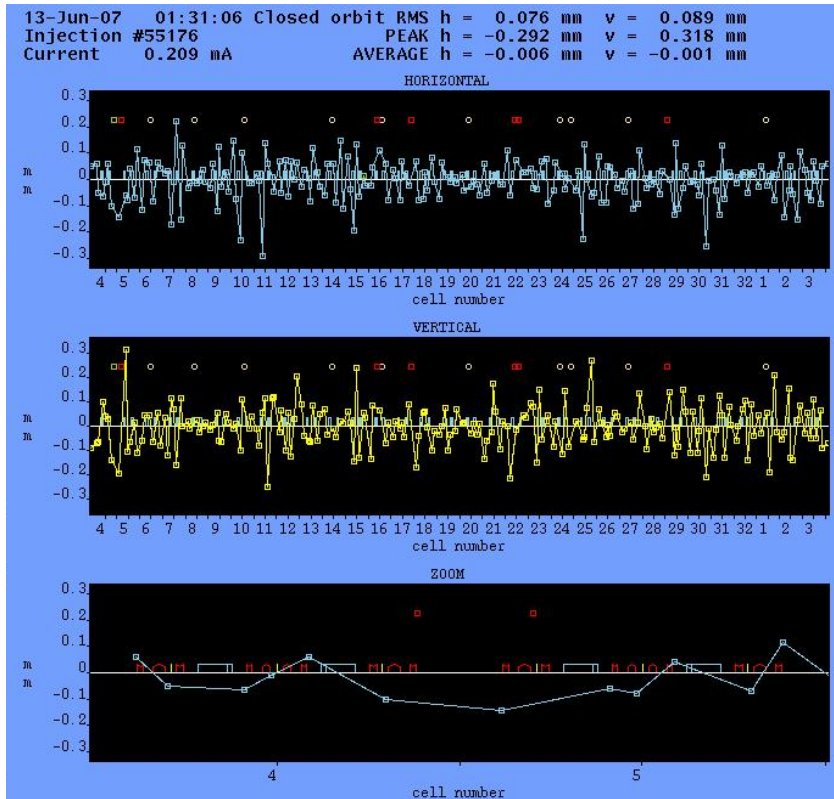


Figure 45 : L'orbite fermée du faisceau mesurée par les BPM

- Le Tune Monitor

Son rôle est de mesurer les tunes verticaux et horizontaux (c-à-d, les fréquences d'oscillations bêta-troniques) du faisceau circulant.

Sur le principe, un exciteur excite le faisceau sur une bande de fréquence. Un pick-up récupère le signal qui sera traité par un analyseur de spectre.

En pratique, tant l'excitation que le pick-up sont faits par 1 seule ligne à ruban (stripline) ou 2 lignes séparées, dans ce dernier cas, 1 ligne excite le faisceau tandis que l'autre capte le signal.

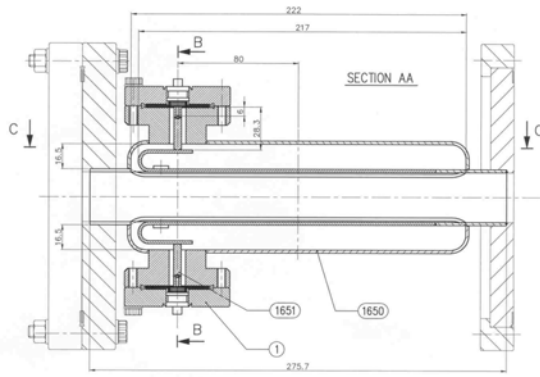


Figure 46 : dessin d'un stripline

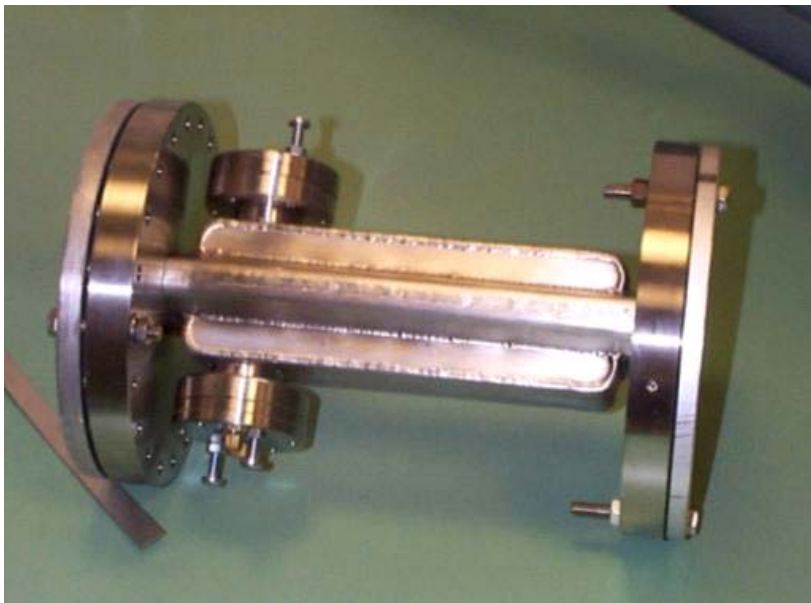


Figure 47 : Cette stripline sert de pickup uniquement

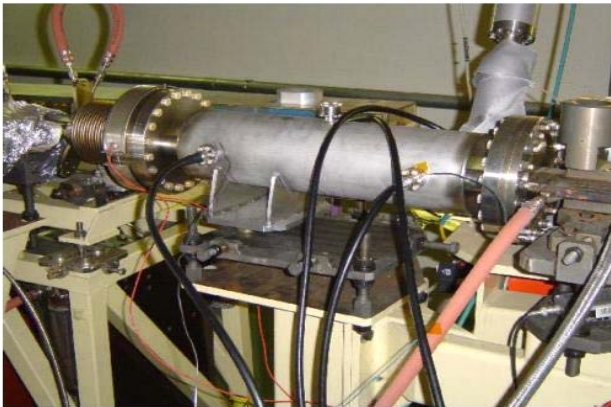
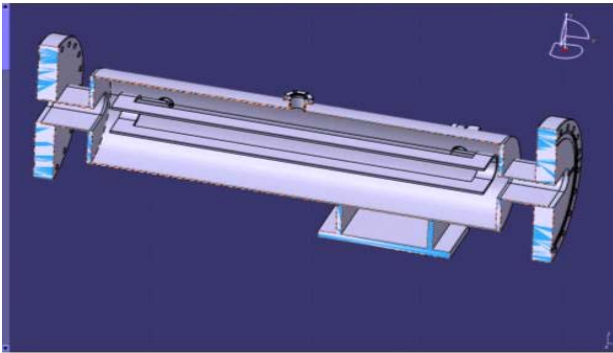


Figure 48 : Cette stripline sert à la fois d'excitateur et de pick-up

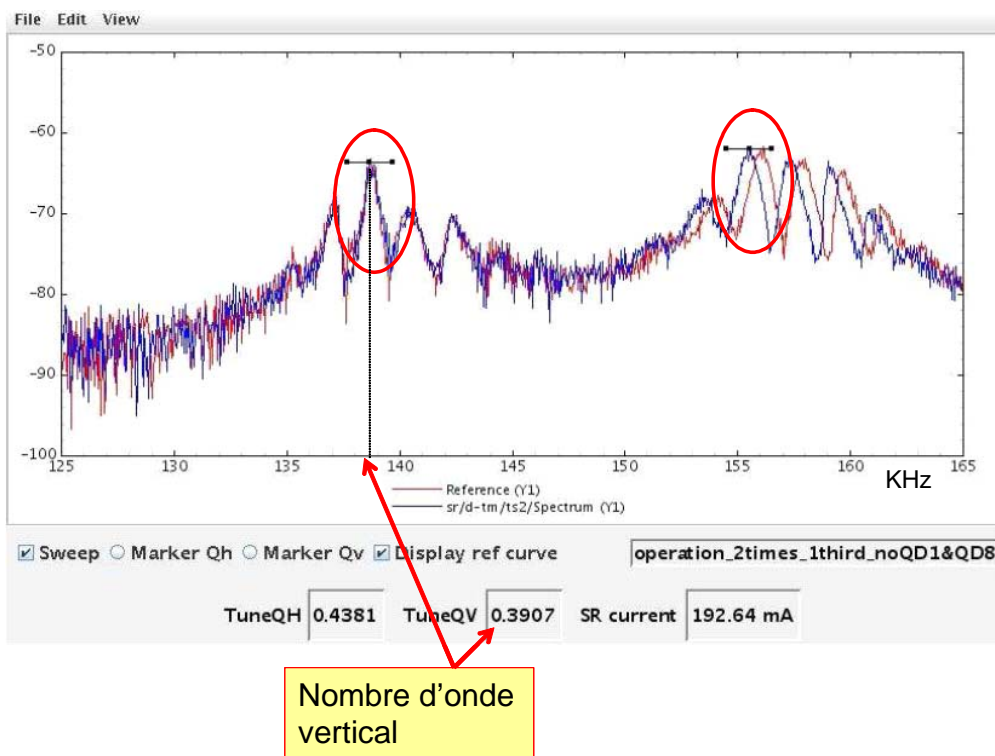


Figure 49 : La figure finale affichée en salle de contrôle: les tunes H / V

- Les pinholes camera.

Il y en a deux présentes sur l'anneau de stockage. Chacune recueille le rayonnement X produit par un aimant de déviation. Une fenêtre aluminium sépare le haut vide de l'anneau de stockage du reste de l'équipement, qui lui, se trouve dans l'air. Un assemblage 'pinhole' se trouve à 4 mètres du point source et est constitué de barrettes de tungstène séparées par des cales d'épaisseur précises (de l'ordre de 25 et 100 μm). Le montage complet constitue un réseau de pinhole (trous d'épingle) de dimensions différentes, le tout monté sur une table motorisée avec possibilité de translation en X et Z ainsi qu'une rotation autour de X et Z. Une caméra CCD située à 16 mètres du point source recueille une image via un écran fluorescent.

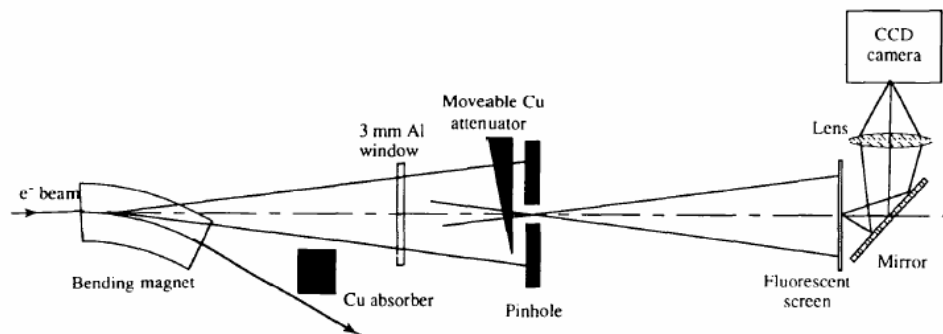


Figure 50 : implantation de la pinhole camera dans l'anneau de stockage

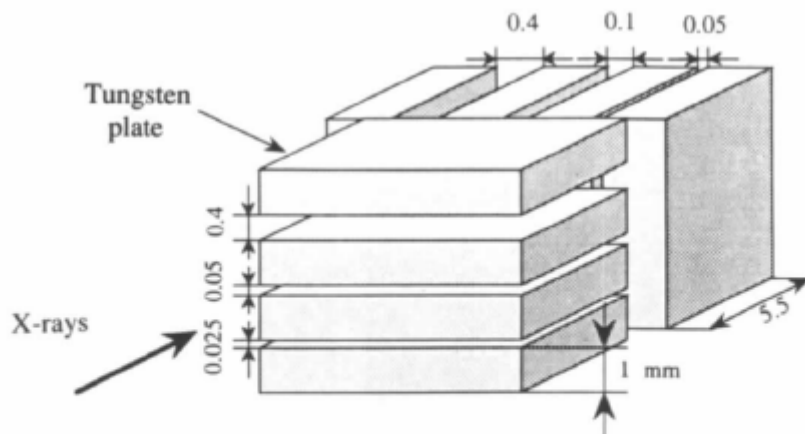


Figure 2

An array of 3×3 rectangular pinholes is made with tungsten plates. The wide pinhole is used for alignment purposes using an HeNe laser. The small pinholes are used during the measurement.

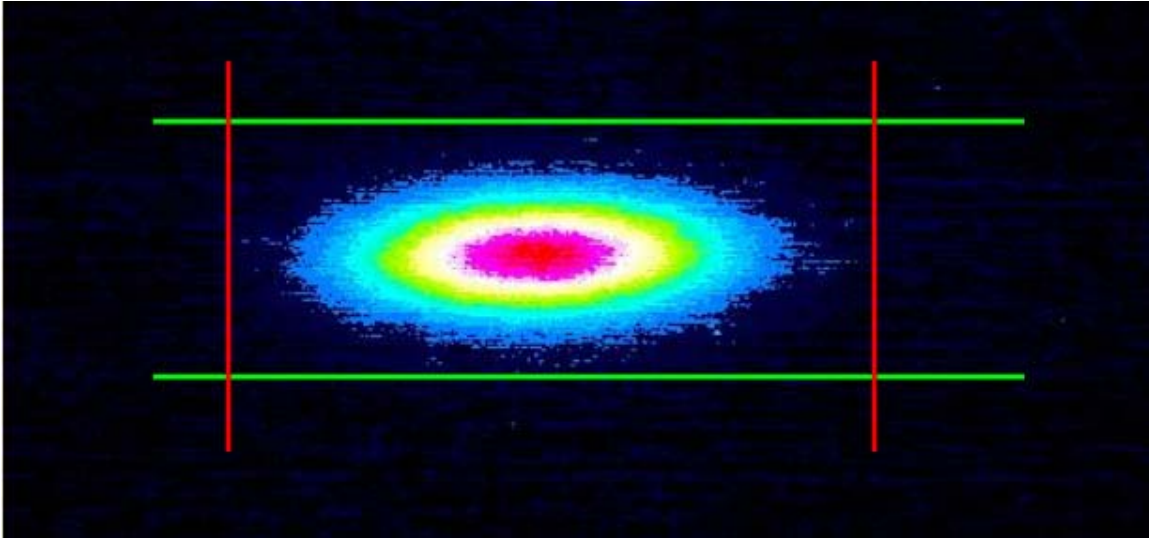


Figure 51 : Image obtenue par le système de pinhole camera

Ce système permet de visualiser le profil transverse du faisceau d'électrons dans un aimant de déviation et d'en calculer son emittance.

Cette image subit peu d'aberration et l'observation de la forme du faisceau est une aide précieuse pour le bon réglage des aimants ou de la radiofréquence : stabilité de la position, instabilités verticales / horizontales, présences de modes d'ordres supérieurs dans les cavités RF, etc

- Les détecteurs de perte

Plusieurs types différents de détecteurs ont été installés dans l'anneau de stockage.

- o Les détecteurs de radiation « Unidos » sont des chambres à ionisation localisées dans des coffrets blindés de 10 mm de plomb et placées à même le sol du côté extérieur de l'accélérateur, au début de chaque dipôle. Le détecteur est un gaz sous pression et ionisé par le passage de particules à hautes énergie (électrons / photons). Le but du blindage est d'éliminer la composante 'rayonnement synchrotron'. Le gaz ionisé va créer un courant de fuite entre 2 plaques à haute tension. L'avantage de ces détecteurs est leur grande linéarité (pas d'effet d'avalanche). Par contre, il faudra détecter des courants de l'ordre du ... femtoA, processus coûteux et lent !



Figure 52 : détecteur de type 'Unidos'

- Les 'slow beam loss detectors' sont eux aussi protégés par 1 cm de plomb afin d'éliminer la composante 'rayonnement synchrotron'. Ils sont situés sur le coté intérieur de l'accélérateur à hauteur de l'axe faisceau et au bout de chaque dipole. Ces détecteurs sont constitués d'un cylindre de polymère photoémissif (25 mm de diamètre / 600 mm de long). La lumière émise est recueillie par un photomultiplicateur. Ces détecteurs sont particulièrement utiles pour localiser les pertes résultant d'un effet de 'rabotage' (scraping) du faisceau sur les chambres à vides et/ou dues à un vide localement médiocre.

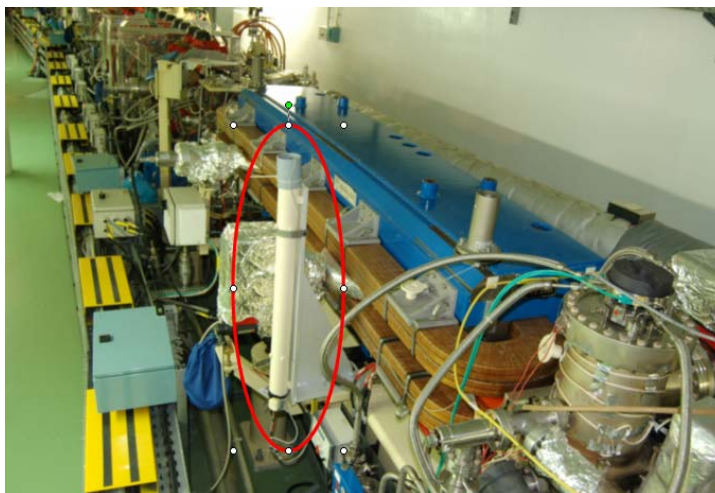


Figure 53 : photo d'un slow beam loss detector dans l'anneau de stockage

D'autres détecteurs sont également utilisés tels les détecteurs de neutrons localisés sur le toit (de 1 mètre d'épaisseur de béton) de l'anneau de

stockage. Ceux-ci ont un but bien spécifique: assurer le respect de la norme européenne pour le personnel dit 'non-exposé'.

Ces détecteurs ont la capacité de bloquer temporairement les injecteurs dans le cas où une dose de 2 μSv intégrée sur une période de 4 heures (neutrons + gammas) a été mesurée.

4.5.6 Le système de vide

L'objectif est de contrôler et maintenir le vide dans l'anneau de stockage à un niveau aussi bas que possible. Les niveaux de vide typiques sont :

- 10^{-10} mbar sans faisceau (pression statique)
- 10^{-9} mbar avec faisceau (pression dynamique)

Le maintien de ce niveau de vide est assuré par les pompes ioniques alors que le contrôle de la pression est assuré par des jauges de type Penning.

L'anneau de stockage est divisé en 32 zones de vide, chacune pouvant être isolée par des vannes contrôlables à distance.

Grâce à des thermocouples, la température est contrôlée en des centaines de points sensibles (soufflets, crotch absorbers, etc).

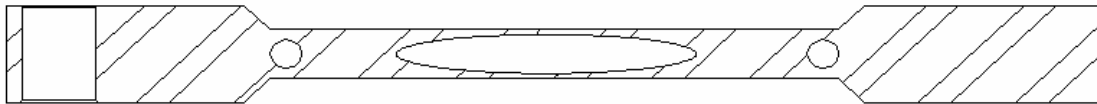


Figure 43 : Section d'une chambre à vide CV 5000 - 5mètres

Les chambres à vide principales se trouvent dans les sections droites. Elles mesurent 5 mètres de long et sont en aluminium (extrudé). Le gap extérieur est de 10 mm tandis que l'ouverture verticale intérieure n'est que de 8 mm, c-à-d que l'épaisseur d'aluminium à l'endroit le plus fin n'est que de 1 mm (sur une longueur de 5 mètres !). L'intérieur de ces chambres est couvert d'une fine couche de NEG (Non Evaporable Getter) constitué d'un alliage de Titane, Zirconium, Vanadium. La particularité de cet alliage est de piéger chimiquement certaines molécules (surtout le CO et CO₂) et en simplifiant, on peut donc dire que ces matériaux se comportent comme une pompe à vide.

L'Opération des accélérateurs au jour le jour consiste à contrôler, et faire fonctionner ces 3 accélérateurs selon des contraintes imposées pour remplir les objectifs de l'ESRF.

5 Le fonctionnement au jour le jour : approche globale

Dans le chapitre 2 étaient décrites les contraintes imposées par les utilisateurs pour mener une recherche de pointe.

Dans le chapitre 3 étaient présentés sommairement les outils dont nous disposons pour satisfaire à ces contraintes.

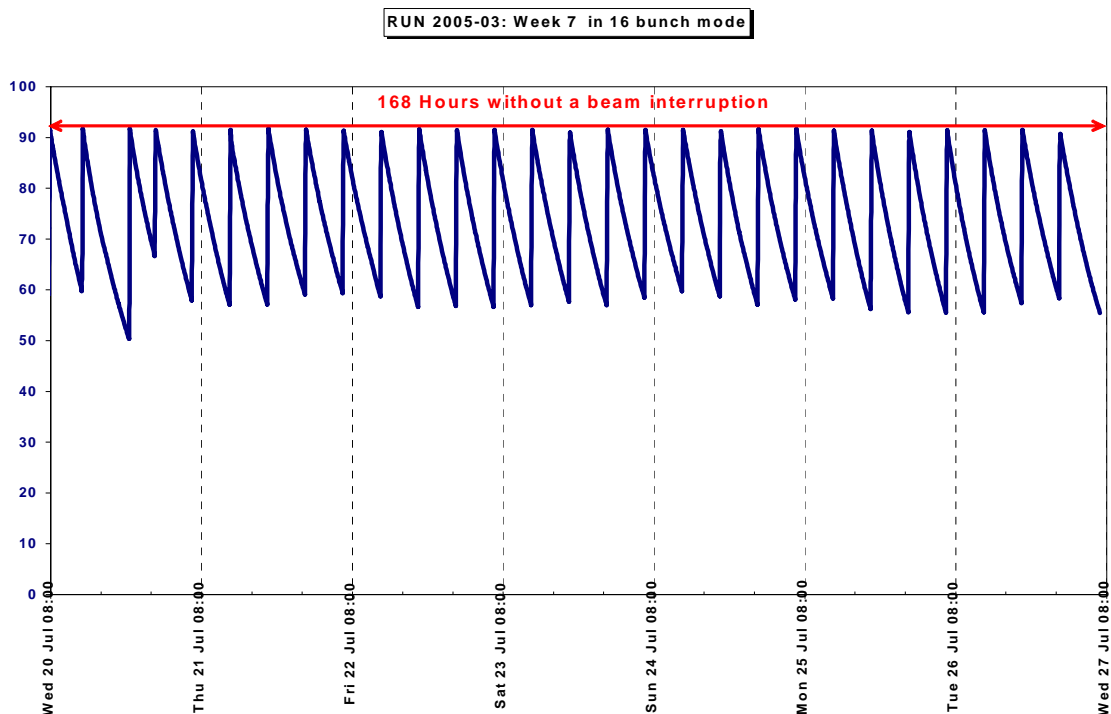
L'objectif de ce chapitre sera de décrire les **tâches de fond qui auront des répercussions sur le fonctionnement quotidien des accélérateurs** et qui répondront à un critère essentiel requis par les utilisateurs : les accélérateurs doivent être **fiables** !

5.1 Définitions et faits

Prenons quelques cas pour mieux illustrer nos propos :

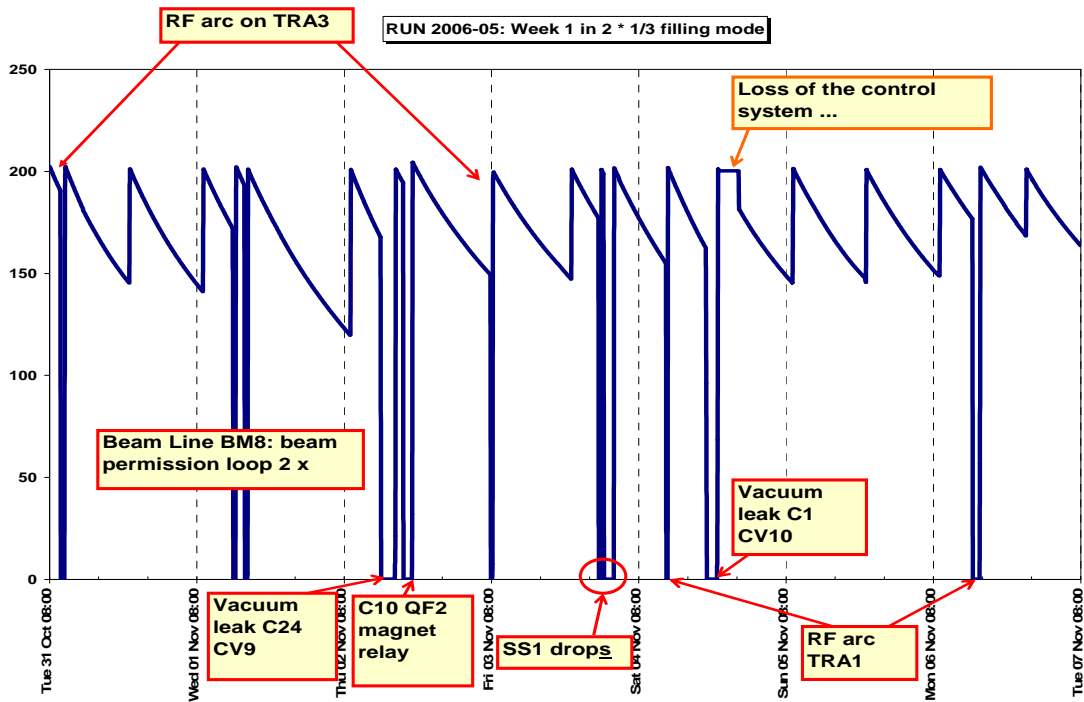
La semaine de rêve ...

aucune panne !



Une semaine d'horreur !...

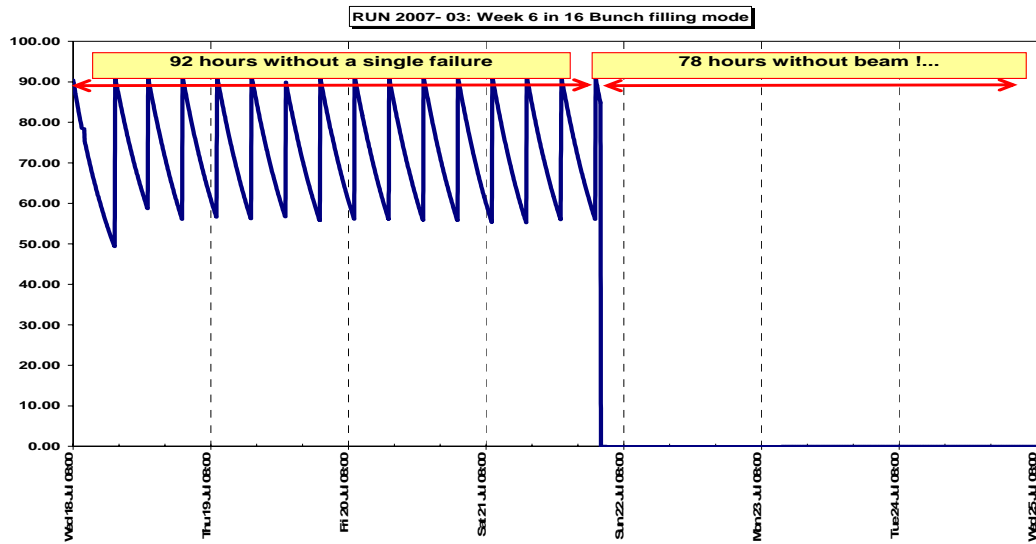
11 pannes en 7 jours. Durée moyenne d'une panne : 60 minutes.



A ce stade ci, il est utile de comprendre que la perte du faisceau stocké est un événement important. En effet, même si la panne est immédiatement identifiée et résolue en quelques minutes, le remplissage de l'anneau de stockage qui s'ensuivra durera 15 minutes au minimum (plusieurs équipements doivent être préchauffés avant d'être opérationnels). De plus, pour certaines lignes, ces quelques minutes d'arrêt vont se traduire en 1 heure, 1 heure et demi perdue. La raison ? Certains de leurs équipements (monochromateurs) sont très sensibles aux chocs thermiques. Dans le cas d'une perte de faisceau, cet équipement subit un premier choc thermique. Ensuite, lors du remplissage de 0 à 200 mA, il en subit un deuxième. Cela peut prendre plus d'une heure pour que ces équipements retrouvent une position stable permettant de reprendre l'expérience ...

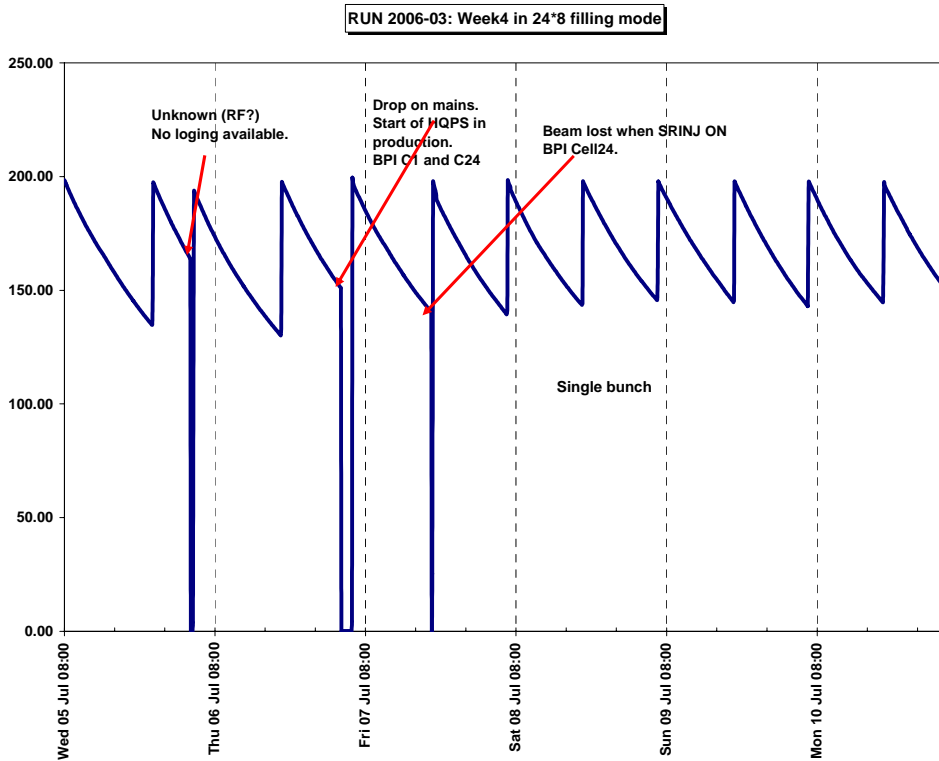
Autres temps difficiles !...

1 seule panne, mais d'une durée de ... 78 heures !



Et finalement, une semaine typique:

3 pannes sur 144 heures de faisceau. Durée moyenne d'une panne : 1 heure.



On l'aura vite compris à travers ces exemples : il faut tout mettre en œuvre pour

- **Eviter la panne !**
- **Diminuer le temps moyen d'une panne** lorsque celle-ci survient. (exemple 3).
Quoi de plus frustrant pour un chercheur qui a réservé son expérience plus de 6 mois à l'avance, qui vient de voyager 24 heures, d'arriver au Laboratoire et de constater que le faisceau est indisponible pour plusieurs heures, voire plusieurs jours et enfin d'apprendre que son expérience est annulée ?...
- **Avoir une durée moyenne maximale entre 2 pannes**. Ces pannes perturberont l'ensemble des expériences (exemple 2). Le temps moyen entre 2 pannes est appelé **MTBF** – Mean Time Between Failures

La réalisation de ces 3 objectifs est loin d'être académique ou théorique, nous allons voir qu'il existe de nombreux moyens qui peuvent être mis en œuvre pour y parvenir.

Rappelons au passage que si l'on divise le budget de fonctionnement de l'ESRF par le nombre d'heures de faisceau fourni dans l'année, 1 heure de faisceau représente un coût de 14000 euros et donc ... une heure de panne également !

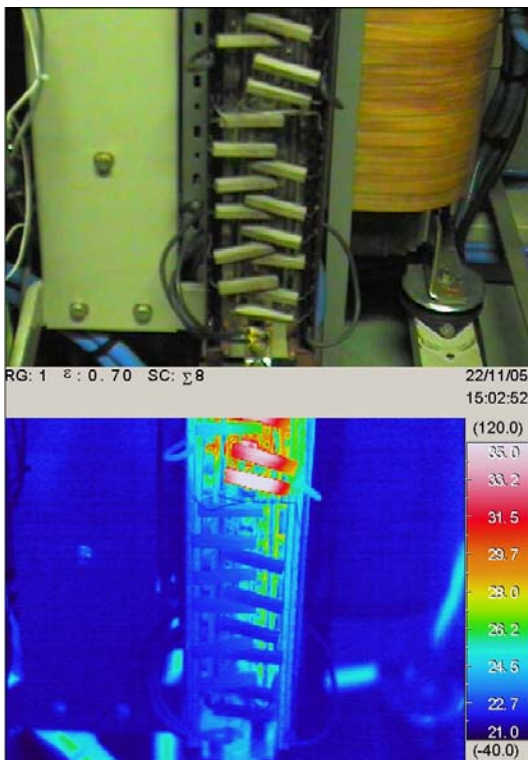
5.2 Éviter la panne.

L'objectif N°1 est évidemment d'éviter la panne. Cela suppose de facto, qu'il y a moyen de l'anticiper suffisamment tôt et de planifier de remplacer/réparer l'équipement défaillant lors d'un prochain créneau de temps d'interventions.

Nous citons ici, à titre d'exemple, quelques techniques employées à l'ESRF.

5.2.1 La thermographie infra-rouge.

Cette technique consiste à photographier un équipement en fonctionnement à l'aide d'un appareil photographique (ou caméra) sensible aux infrarouges, et ce, même à travers la paroi métallique d'une armoire ! Par exemple, on pourra détecter que la température d'une résistance semble beaucoup plus élevée que les résistances voisines.



La photo ci-contre illustre 2 résistances aux contacts douteux parmi un banc de résistances similaires.

C'est l'exemple type d'une panne potentielle, repérée à temps. Elle fera l'objet d'une réparation dès que les accélérateurs seront arrêtés pour une maintenance planifiée.

Figure 44 : photographie infra-rouge d'une alimentation d'aimant

5.2.2 Les radio –gammagraphics

A l'ESRF, il y a environ 300 soufflets assurant une transition flexible d'une chambre à vide vers la suivante. Cependant, ces soufflets représentent des mini cavités résonantes pour le faisceau qui sont donc très perturbants pour le faisceau. Il y a donc lieu, à l'intérieur de ces soufflets, de placer des transitions radiofréquences, appelées « RF liner », lesquels vont assurer une continuité de la circulation du courant image du faisceau chargé, d'une chambre à vide vers la suivante. Deux parties sensibles font partie de cet ensemble : les 'doigts' RF et le ressort qui les compresse sur la 'jupe'.

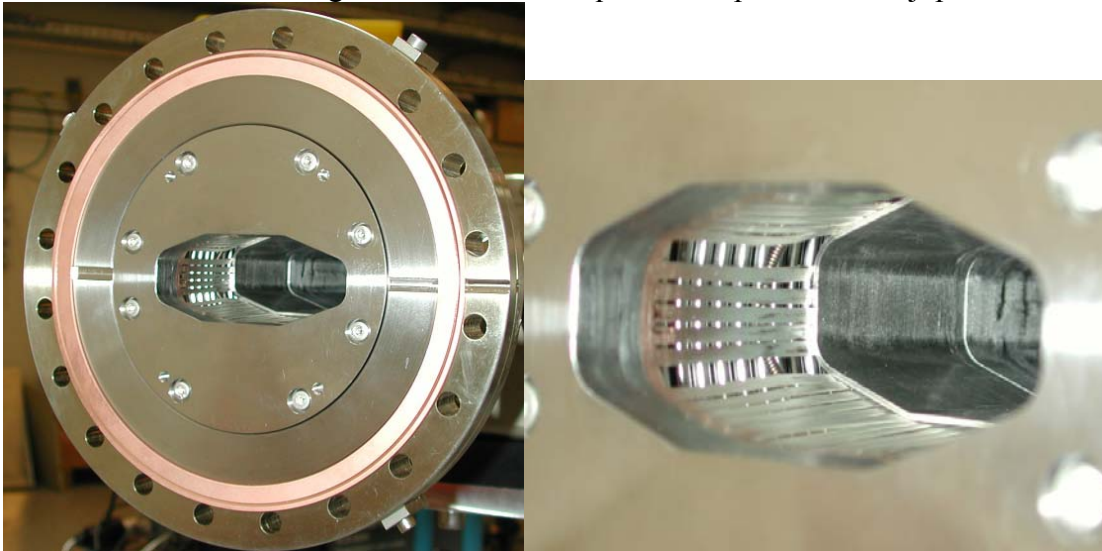


Figure 45 : Photos de RF fingers + ressort dans une chambre à vide.

Dans un fonctionnement normal, il est crucial que le ressort soit bien en place et comprime parfaitement tous les doigts sur la 'jupe'. Si le ressort venait à se détendre, les contacts deviendraient médiocres, provoquant de grosses remontées de pression et de température à cet endroit, au point de compromettre la livraison du faisceau.

Dans un premier temps et grâce à l'expérience acquise, les experts en technique du vide sont maintenant capables d'appréhender les premiers signes de faiblesse : des remontées de pression et de température suite à un changement de mode de faisceau.

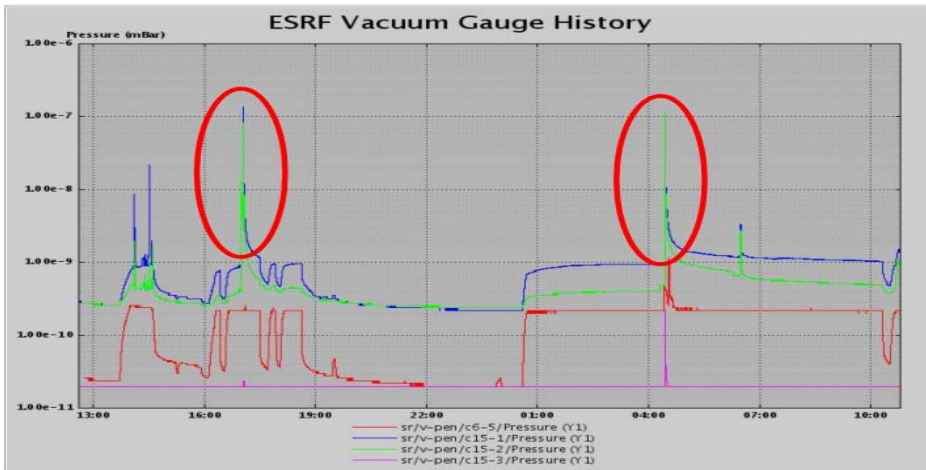


Figure 46 : graphe de remontée de pression suite à un défaut sur un RF liner

Cet ensemble 'RF liner' souffre particulièrement dans certains modes structurés en temps, pour lesquels on a peu de bunches, mais beaucoup de courant par bunch. La température de cet ensemble va sensiblement augmenter dans ces modes.

A ce stade du diagnostic, une radio gammagraphie est très souvent envisagée. Elle va permettre de visualiser des composants à l'intérieur de la chambre à vide ! La technique consiste à placer un film (typiquement 15 cm * 30 cm) derrière la zone à inspecter. Une source hautement radioactive (type cobalt ou iridium) sera placée devant la zone à une distance bien choisie pour obtenir une image nette. Après une exposition de quelques minutes et un développement, on dispose très vite de la photo de l'intérieur de la chambre à vide, laquelle peut nous renseigner sur le problème en train de se développer.

Par exemple, dans l'exemple de la remontée de pression ci-dessus, un ressort largement détendu a été trouvé :

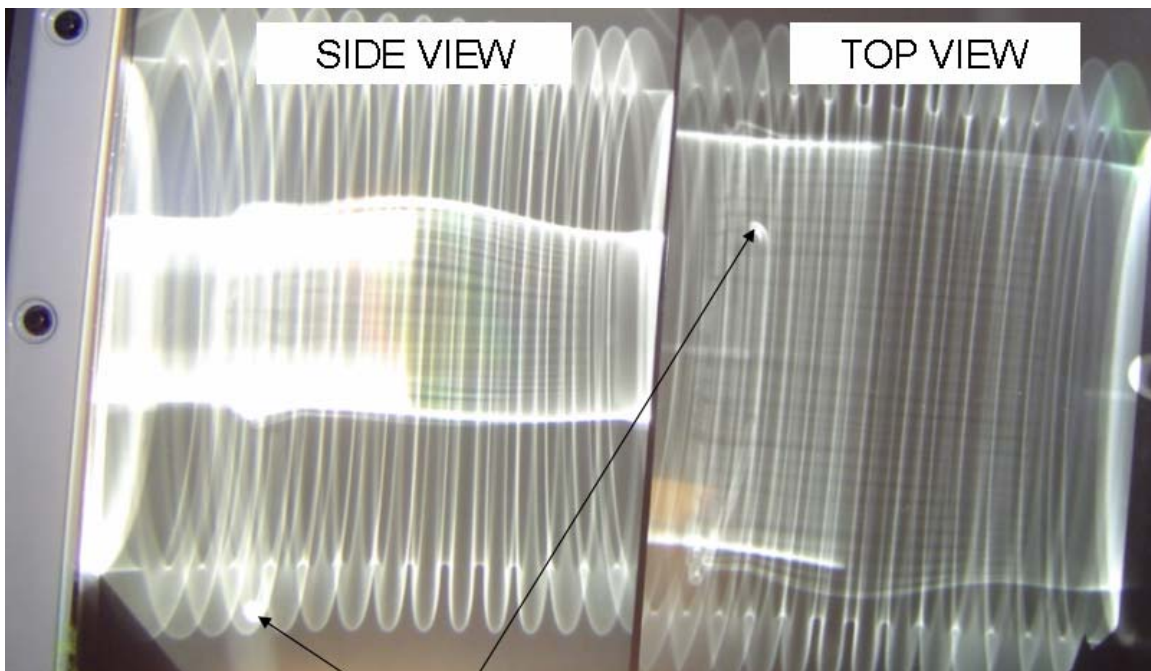


Figure 47 : radio-gammagraphie montrant un ressort détendu dans un RF liner

D'autres cas, bien pires, surtout au début du fonctionnement de l'ESRF ont montré des doigts RF complètement relâchés. Tout le courant de retour passait donc par les doigts restants, qui eux-mêmes, n'assuraient plus un bon contact :

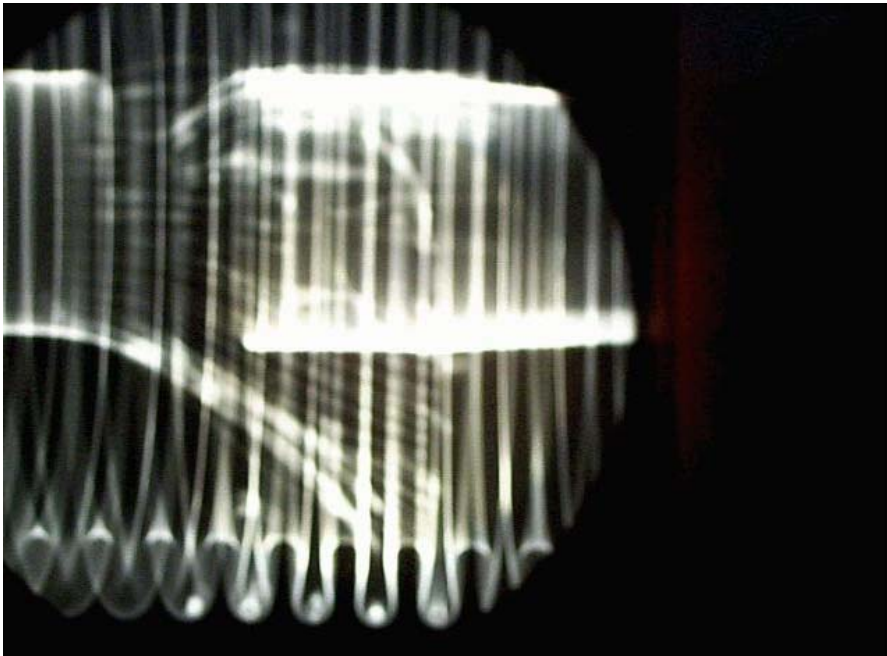


Figure 48 : Après claquage du ressort, les RF fingers sont complètement relâchés. Il n'existe plus de contacts.

Dans ce cas extrême, la panne fut ... inévitable :



Figure 49 : Photo d'un RF liner ayant subi un échauffement suite à l'absence de contact entre les doigts et la jupe.

Il est donc possible d'anticiper ce type de problème grâce à une analyse **quotidienne** des pressions et températures à des endroits critiques connus de l'anneau de stockage, de valider cette analyse par une gammagraphie et d'agir, dès l'arrêt planifié des accélérateurs, avant que l'incident ne se produise.

5.2.3 Étude post-accident

Dans certains cas, l'accident n'a pu être évité car il était d'un type nouveau. Dans ce cas, il faut être vigilant et se poser la question de savoir si ce cas n'est pas le premier d'une longue série ... On peut alors faire appel à différentes techniques pour analyser aussi finement que possible l'origine et prendre une décision en connaissance de cause. Deux exemples notoires à l'ESRF sont donnés :

- Les Crotch absorber :

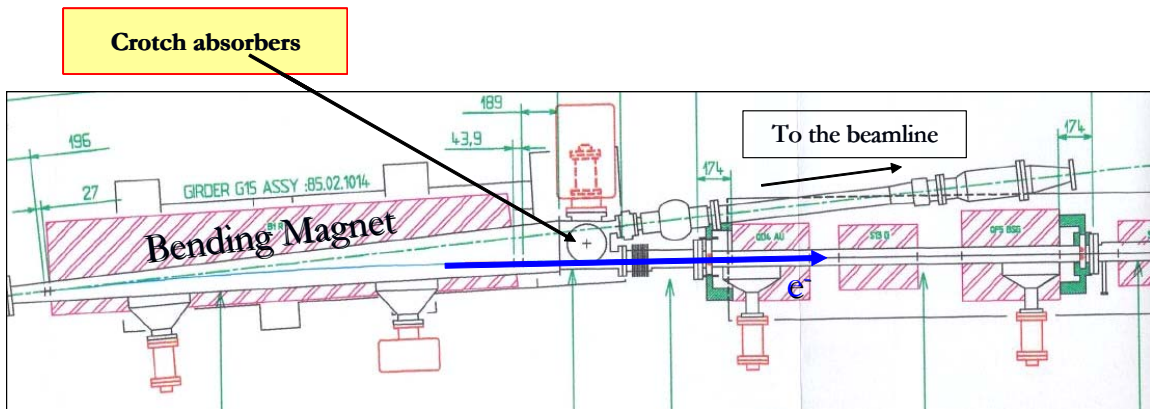


Figure 50 : Localisation d'un crotch absorber derrière un dipôle

Le rôle des crotch absorbers est de capter les rayons X émis par un aimant de déviation mais qui ne seront pas pris vers le départ de ligne.

En mars 2005, une fuite d'eau s'est déclenchée dans l'un d'eux, provoquant une mise à l'air sur plus de 50 mètres et ... de l'eau dans une chambre à vide. Cinq jours seront perdus.

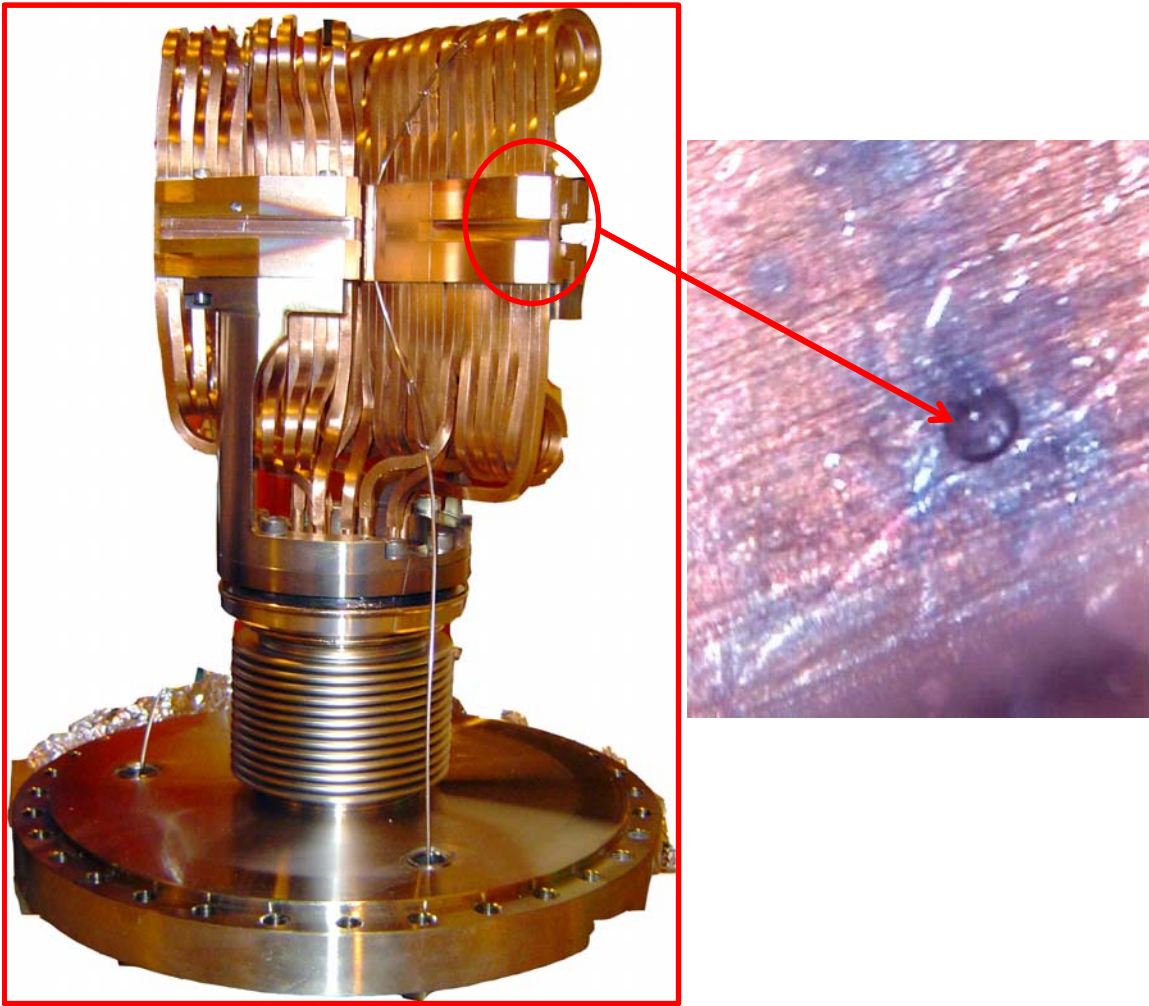
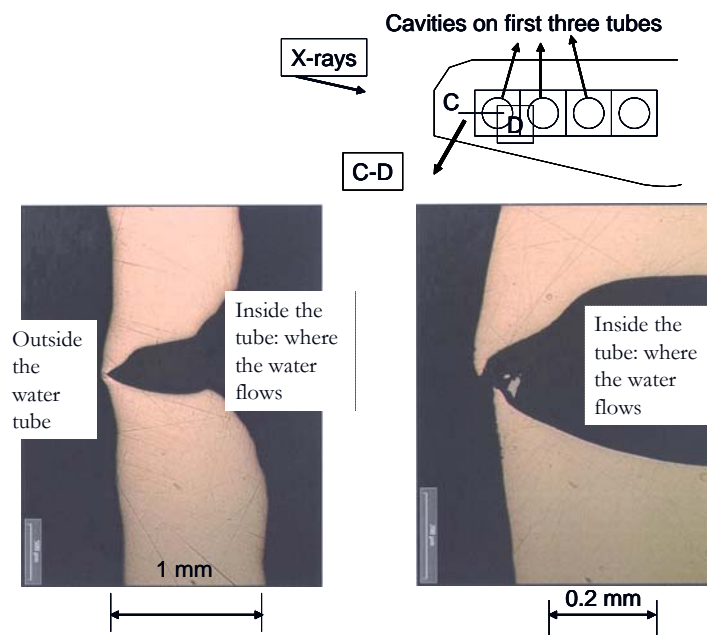
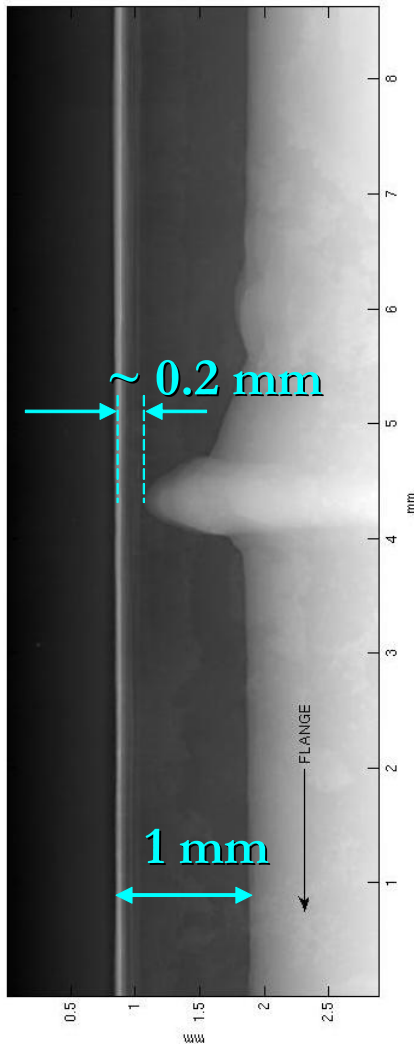


Figure 51 : Zoom sur la partie trouée suite à un mélange rayons X + cuivre + radiolyse.
 La partie incriminée fut découpée finement afin de mieux analyser la fuite :



A ce stade, il était nécessaire de savoir si c'était un incident localisé (problème d'alignement ? de fabrication ? etc.) ou non.

Un autre crotch fut démonté et radio-gammagraphié ...



La radio démontrait qu'il était également sur le point de percer (il ne restait plus que 200 μm d'épaisseur à l'endroit le plus sensible).

Nous étions donc clairement face à un risque systématique : tous les crotch absorbers présentaient un risque potentiel suite à une combinaison « détonante » connue : eau désionisée + cuivre + radiations !

L'action immédiate fût de désaligner volontairement tous les crotch de 2 mm dans le plan vertical afin que les rayons X heurtent une zone encore épaisse de 1 mm n'ayant jamais vu de faisceau.

Depuis 18 mois, tous les crotch sont remplacés selon un planning pré-établi en tenant compte des différentes contraintes de shutdowns. Les nouveaux équipements présentent plus d'épaisseur de cuivre à l'endroit critique.

Depuis lors, plus aucun accident de ce type n'a eu lieu.

Figure 52 : radio-gammagraphie d'un tube de refroidissement d'un crotch absorber

- Les problèmes de corrosion dans les chambres à vide.

Ce problème se différencie du précédent par le fait qu'il est connu depuis longtemps mais le remplacement systématique des chambres n'est pas envisageable. En effet, le remplacement d'une chambre entraîne une opération très lourde et délicate d'ouverture de plusieurs aimants, tout cela sans avoir la certitude que la chambre changée était réellement concernée ...

Les premiers signes se manifestent toujours par une remontée de pression dans une chambre à vide :

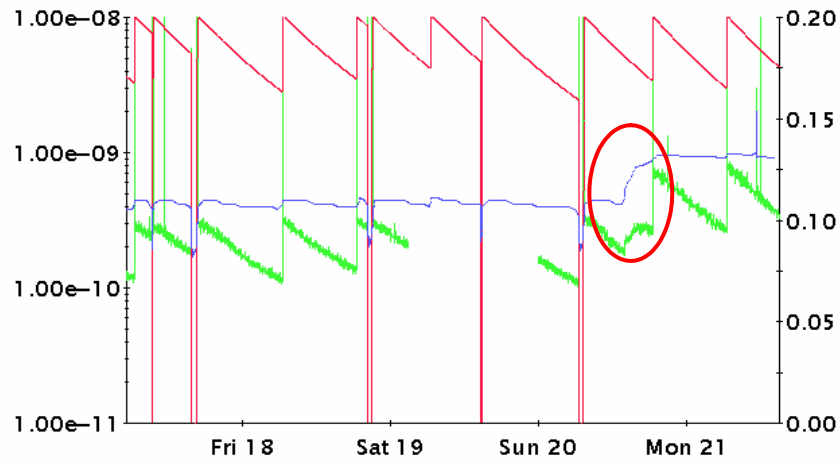


Figure 53 : premiers signes de fuite dans une chambre à vide.

Le rapport d'expertise conclut « que la fuite résulte d'un mécanisme de corrosion sous contrainte, imputable à la présence de chlore. Cette contamination provient très vraisemblablement de l'utilisation, lors de l'opération de brasage des tubes en acier inoxydable sur la chambre, d'un flux décapant contenant du chlore, flux qui se sera infiltré au fond du lamage, lieu de confinement et qui n'aura pu être éliminé, malgré les opérations de nettoyage de la pièce ».

Cette fissure s'approfondit avec le temps au point de générer une fuite après plusieurs années.

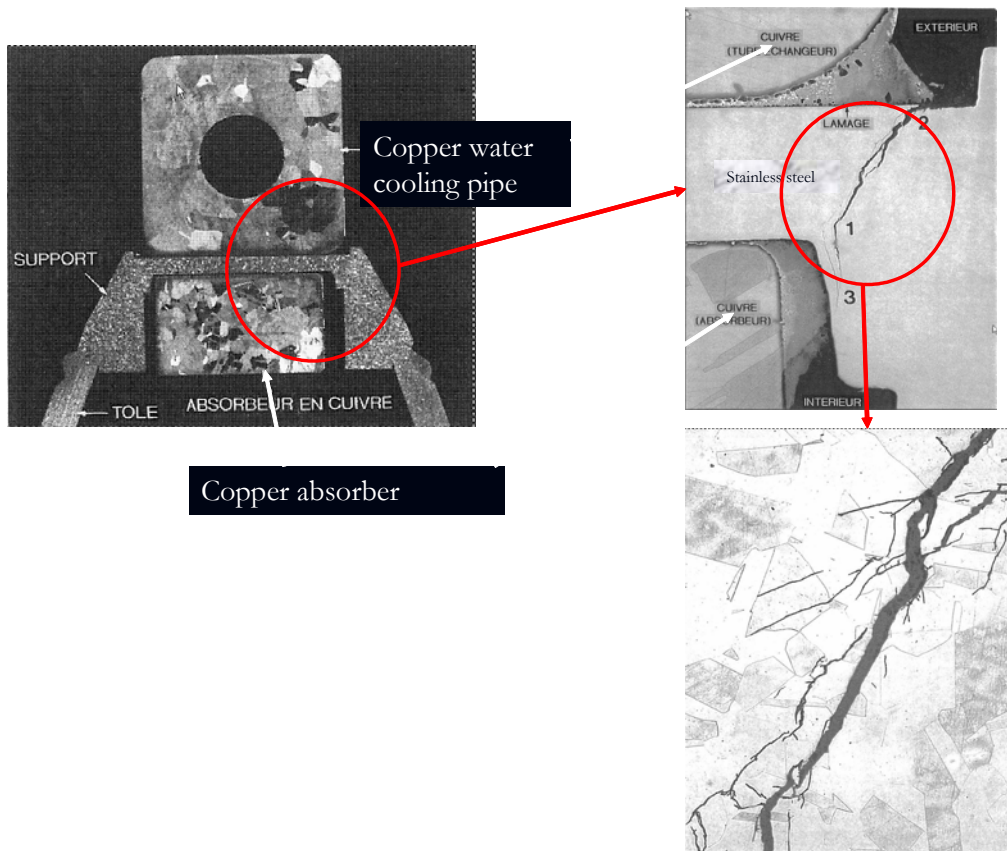


Figure 54 : Détail d'une fissure dans un tuyau de refroidissement de chambre à vide.

En conséquence et vu l'impossibilité de changer systématiquement les chambres, des outils informatiques de suivi très performants ont été mis au point pour détecter immédiatement et d'un coup d'œil, toute suspicion de fuite sur l'anneau de stockage. L'objectif étant de localiser la fuite, de la boucher avec de la résine en spray lors du prochain arrêt planifié et si nécessaire, de changer la chambre lors de la période de maintenance. Depuis l'utilisation de cette application informatique, toutes les fuites potentielles (6 en 2005) ont bien été détectées à temps et leur réparation, totalement transparente vis-à-vis des utilisateurs !

5.2.4 Analyse mécanique en ligne.

Jusqu'à septembre 2007, l'ESRF était doté de 10 moteurs Diesel de 1 MW chacun, soit 10 MW au total, dont le rôle était de pallier les coupures d'électricité dues à des défauts sur le réseau du fournisseur d'électricité.

Un arrêt inattendu d'un ou plusieurs de ces moteurs, pendant qu'ils tournaient pour produire de l'énergie, aurait pu avoir de sérieuses conséquences sur certains équipements des accélérateurs. En effet, ces équipements n'étant subitement plus alimentés auraient été forcés de passer à un état 'pleine puissance' à un état 'arrêté' en une fraction de secondes.

A cette fin et dans le but d'anticiper au mieux une panne naissante, des capteurs de vibrations ont été placés sur chaque moteur. Les dérives de fréquences de vibrations étaient analysées en ligne, donnant l'occasion aux ingénieurs en charge de stopper proprement le moteur incriminé afin de le réparer préventivement.

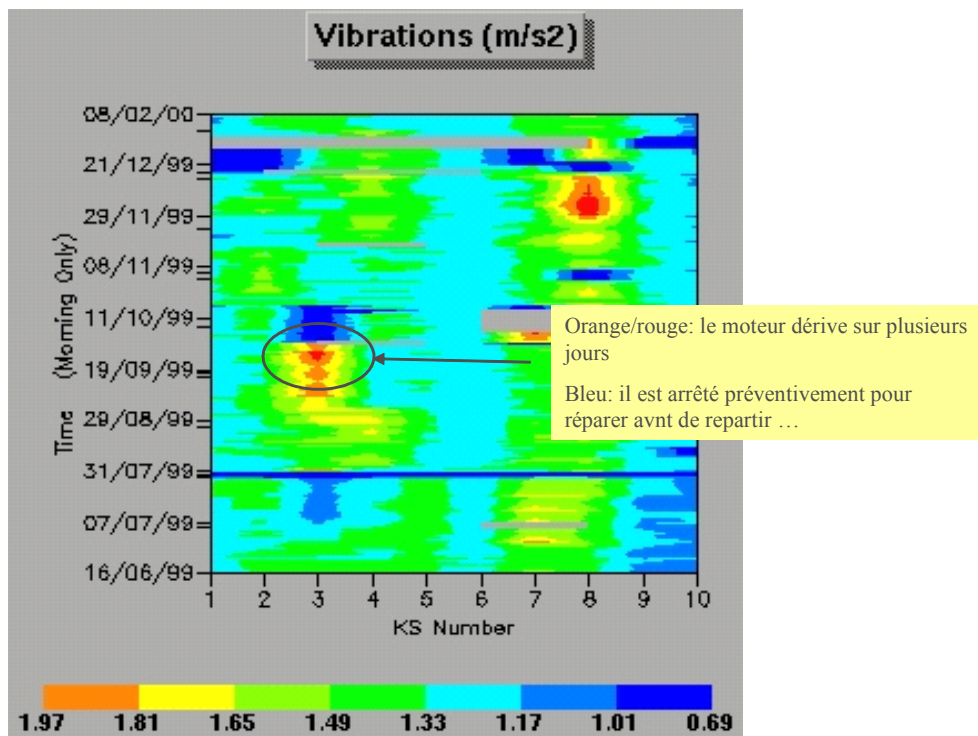


Figure 55 : vibrations sur les 10 moteurs de HQPS

5.2.5 Éviter les fausses pannes

Par fausse panne, on entend ici une panne déclenchée par un défaut du capteur lui-même et non pas de l'équipement qui est surveillé. La conséquence est néanmoins aussi grave car cela déclenchera l'arrêt des accélérateurs. Bien que les exemples soient nombreux, j'en relève un qui me semble typique.

A plusieurs reprises, des aimants sextupolaires se sont arrêtés suite à un déclenchement de leur capteur de température indiquant une surchauffe de la bobine.

Les radiations sur le caoutchouc protecteur isolant du 'Vigitherm' étaient en fait à l'origine du problème. Les radiations 'liquéfiaient' petit à petit ces capots isolants et changeaient leur structure matérielle de sorte qu'ils devenaient ... conducteurs ! Le léger courant de fuite entre les 2 bornes du capteur suffisait à simuler un défaut de température !



Figure 56 : protection d'un capteur de température usé par les radiations

Des études systématiques furent alors faites pour savoir si ces capteurs étaient vraiment utiles ! La question revenait à savoir si l'élévation de température induite par une absence de refroidissement accidentelle d'une bobine pouvait avoir des conséquences dommageables pour l'aimant.

Après que le sextupole fût placé sur un banc de mesure afin de le soumettre à différents tests, il s'est en effet avéré que le non refroidissement des bobines, même à courant élevé, ne provoquait pas d'élévation de température suffisamment inquiétante pour arrêter l'aimant. La figure ci-dessous illustre l'expérience.

En conclusion, tous les capteurs qui présentaient un risque de fausse alarme suite à une dégradation de leur capot par irradiation furent déconnectés, soient 1344 causes d'interlocks potentiels en moins !

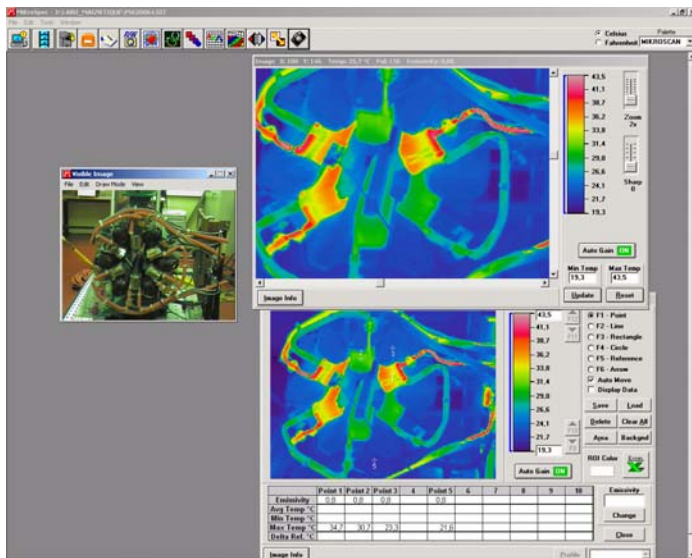


Figure 57 : photographie infra rouge d'un sextupole partiellement non-refroidi

5.2.6 Se servir de ses yeux ...

Bien qu'il semble évident qu'une observation visuelle de base peut apporter des indices, cela n'est pas nécessairement pratiqué minutieusement au quotidien et cela peut parfois mener à de grosses pannes qui auraient pu être évitées.

Je citerai 2 exemples concrets à l'ESRF pour faire prendre conscience des conséquences :

- le premier en 1996 lorsque 24 heures furent perdues. Après de multiples tentatives infructueuses pour stocker le faisceau dans l'anneau de stockage, on s'aperçoit que l'alimentation d'une famille de quadropôles présente des défauts intermittents. Une première inspection visuelle rapide de cette famille d'aimants sur 32 cellules ne révèle rien. Après plusieurs heures de manipulations en suivant une méthode dichotomique, la cellule incriminée est localisée. Un contrôle visuel plus approfondi révélera en effet... un boulon oublié pendant la période de maintenance, tombé juste entre les 2 conducteurs de ce quadropole, le mettant ainsi en court-circuit de façon intermittente. Cet incident sert souvent d'exemple pour mieux conscientiser les équipes intervenant sur les accélérateurs des conséquences de ce qui pourrait être au départ, un fait anodin.
- Le deuxième exemple s'est déroulé lors du démarrage suivant l'arrêt d'hiver 2001-2002. Alors que les accélérateurs avaient parfaitement démarré depuis 3 jours, il était devenu impossible de stocker le faisceau le 4^{ème} jour alors que nous procédions à une simulation de livraison de faisceau aux utilisateurs (c'est-à-dire avec les éléments d'insertion fermés ...). Plusieurs outils de diagnostic (dont les détecteurs de perte) nous permettaient de savoir qu'un obstacle (mécanique ou magnétique) était présent aux environs de la cellule 15. Une inspection visuelle nous a rapidement révélé la cause... Lors de la période de maintenance, une

personne avait oublié une pince à proximité d'un élément d'insertion. Lorsque celui-ci a commencé à se refermer, la pince a été attirée par le champ magnétique et s'est positionnée sur la face principale de la mâchoire magnétique. La mâchoire continuant à se refermer, la chambre à vide fut complètement écrasée par cet outil, obstruant bien sûr le passage du faisceau. La 'chance' fût que cette chambre en aluminium souple s'est pliée et ne s'est pas fissurée, ne provoquant donc pas de mise à l'air. Le même incident avec une chambre en acier inoxydable aurait pu provoquer une remise à l'air d'un grand nombre de cellules suite à une cassure franche de la chambre.

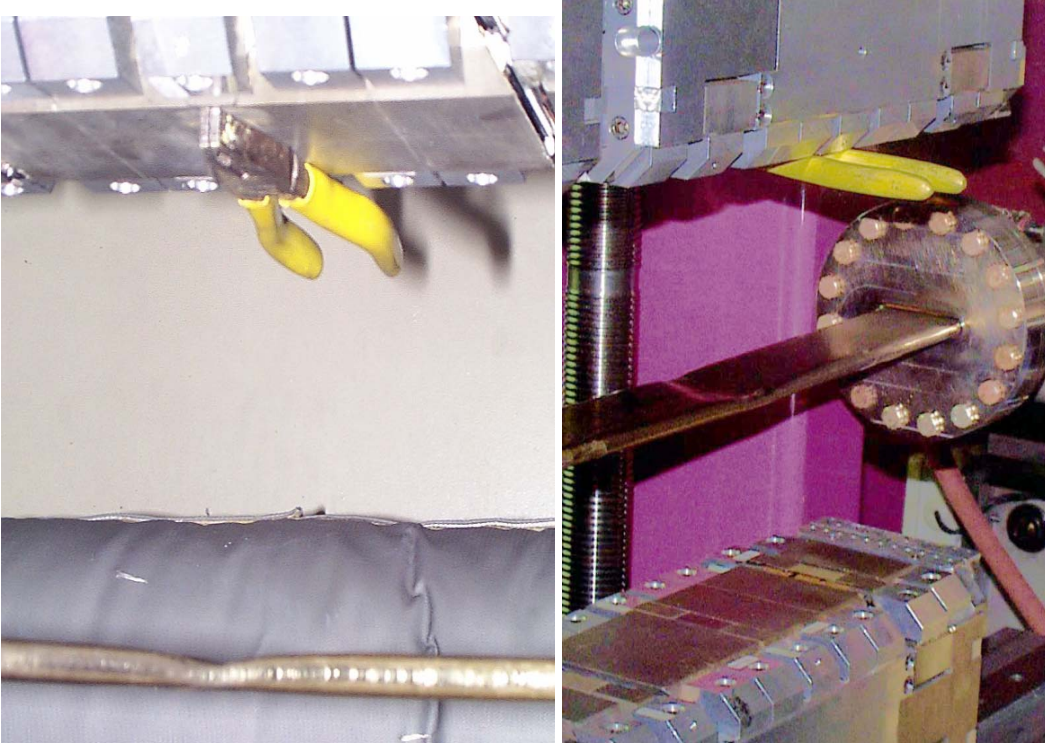


Figure 58 : une pince attirée par le champ d'un élément d'insertion a écrasé une chambre à vide lors de la fermeture des mâchoires magnétiques

Depuis cet incident, une ronde très minutieuse est effectuée par 2-3 personnes juste avant que les tunnels ne soient fermés, en fin de période de maintenance.

5.2.7 Planifier des arrêts pour réparer/ maintenir.

La plupart des méthodes exposées ci-dessus permettent d'anticiper, souvent en amont, une panne potentielle. Encore faut-il se réserver un créneau, de temps à autre, pour intervenir de manière transparente aux utilisateurs. Basé sur l'expérience des années, il nous a semblé raisonnable de planifier 1-2 heures d'intervention tous les 15 jours pendant la journée réservée aux études accélérateurs. En cas de nécessité, cette fréquence peut être ramenée à 1-2 heures tous les 7 jours (actuellement, 1 journée par semaine est dédiée aux études sur les accélérateurs). De plus, 5 périodes plus longues sont prévues sur l'année pour effectuer des interventions plus conséquentes (changements de chambre à

vide, remplacement d'un élément d'insertion, etc.) : 1 mois en hiver, 1 mois en été et 3 * 10 jours répartis sur le reste de l'année.

Voici, à titre indicatif, un planning type d'opération pour l'année 2010 :

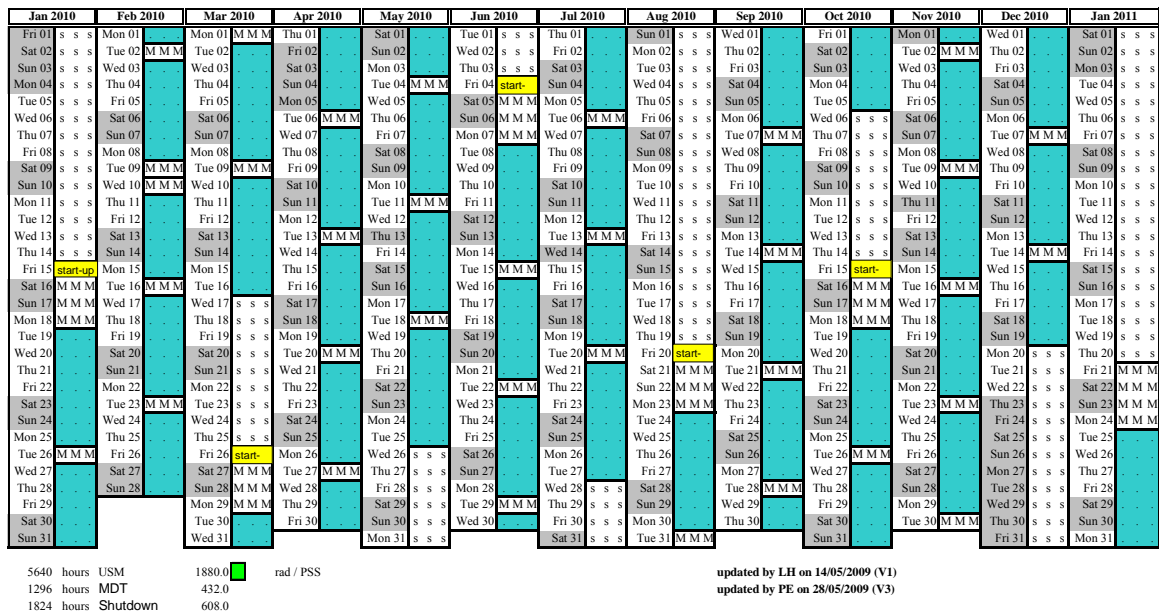


Figure 59 : planning d'opération 2010

- Les périodes bleues sont les périodes de livraison 'utilisateurs'.
- Les périodes 'M', sont les journées réservées aux études accélérateurs (et donc comprenant, de temps à autre, de 1-2 heures pour des interventions)
- Les périodes 's' (shutdown), sont les journées consacrées aux maintenances plus conséquentes.

Ce type de planification semble faire partie du bon sens. Il faut pourtant savoir que certains accélérateurs ont une stratégie radicalement différente. Leur stratégie est appelée 'run till it blows' ('on tourne jusqu'au moment où ça casse !'). Dans ce cas, la période de maintenance commence à un moment imprévu, pour une durée non planifiée...

Si cette stratégie est possible pour certains types d'accélérateurs (avec un nombre d'utilisateurs restreints et locaux), elle est inimaginable pour une source de rayonnement synchrotron mobilisant 100 à 250 chercheurs 24h/24 venant du monde entier !

5.2.8 Et ...Les échanges d'expérience avec des instituts similaires

Une autre source d'information pour minimiser la panne sur un équipement donné est bien sûr d'échanger les connaissances avec d'autres utilisateurs de matériel similaire à celui que l'on veut implanter ou remplacer.

Les conférences, les workshops, les papiers techniques disponibles sur le Web sont autant de sources possibles pour connaître la fiabilité d'un système donné.

A ce titre, mentionnons 2 workshops typiquement adapté à ces échanges :

- WAO (Workshop on Accelerator Operation) qui a lieu tous les 2 ans $\frac{1}{2}$. Celui de 2007 a eu lieu à Vancouver (Canada) : <https://www.elettra.trieste.it/wao07/>
Le prochain aura lieu en Corée en avril 2010.
- ARW (Accelerator Reliability Workshop). Le dernier a eu lieu à Vancouver (Canada) en 2009 : <http://www.triumf.info/hosted/ARW/index.htm>
Le prochain aura lieu au printemps 2011 à Cape Town (Afrique du Sud).
Une liste e-mail internationale a été créée regroupant toutes les personnes concernées par l'opération des accélérateurs (et donc les aspects de fiabilité) et souhaitant échanger sur ces sujets :

Le site :

<http://lists.reliadb.org/mailman/listinfo/accelerator-announc>

donne de plus amples informations pour s'inscrire.

- Un forum dédié à la fiabilité des accélérateurs a été créé à l'initiative de l'ESRF : <http://reliability.forumotion.com/>
- Un site dédié à l'opération des accélérateurs a également été créé à l'ESRF : <http://sites.google.com/site/particleacceleratorreliability/>

Il est facile de comprendre que des pannes fréquentes vont perturber tous les types d'utilisateurs. Ce type de pannes se distingue de la catégorie précédente en ceci qu'il faut en avoir eu plusieurs avant de se rendre compte que l'on est en face d'un problème récurrent et non isolé...

Comme dans le chapitre précédent, je donnerai quelques directions qui ont été utilisées à l'ESRF pour augmenter le MTBF (Mean Time Between Failures) accompagné d'exemples concrets.

5.2.9 HQPS : un exemple de redondance active.

Au moment où ce cours est révisé (juin 2009), la première version du système HQPS décrit ci dessous est démantelée. Certains défauts de fonctionnement sont apparus sur des composants pour des raisons qui ne sont pas encore clairement et définitivement identifiées. Il m'a cependant semblé utile de le mentionner comme exemple.

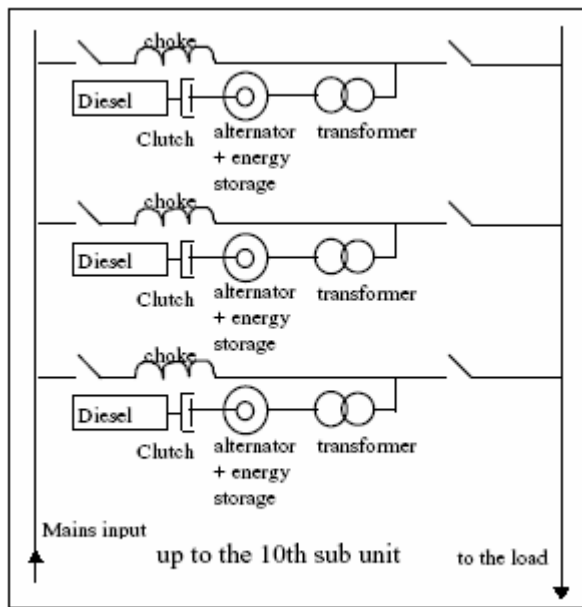
L'ESRF est situé dans une région de montagnes où les orages peuvent parfois être très violents et bien sûr, générer des chutes de tension sur le réseau électrique 225 - 400 KV, accompagnées aussi de variations de fréquence par rapport au 50 Hz nominal. Dans certains cas, plus rares et plus souvent dus à des accidents de manipulation, il est arrivé

d'avoir des coupures franches de plusieurs minutes. Une chute de tension « moyenne » est typiquement de - 20 % (par rapport au 20KV) et dure 200 msec.

En 1993, l'idée fut d'installer un système dit « High Quality Power Supply » - HQPS, afin de pallier ces chutes de tension. Résumons en disant que le système consiste en 10 alternateurs placés en parallèle sur le réseau principal et 10 accumulateurs ayant en réserve l'énergie pour alimenter les alternateurs pendant 5 secondes. En cas de détection de chute de tension, un disjoncteur en entrée s'ouvre et les accumulateurs délivrent leur énergie aux alternateurs jusqu'au moment où le réseau principal est redevenu correct, ce qui fermera le disjoncteur pour revenir dans des conditions de travail normales.

Il est intéressant de savoir qu'entre août 1992 et juillet 1993, il y a eu 279 (!) perturbations de réseau, toutes comprises entre 0.1 et 2 secondes, dont 6 avec $\Delta U / U = -80\%$! A cette époque, ce système (installé en 1995) aurait été capable de toutes les compenser !

Les 10 moteurs Diesel sont capables de délivrer une puissance totale de 10 MVA (1 MVA / moteur), soit suffisamment de puissance pour assurer un fonctionnement de tous les accélérateurs lors d'un remplissage en plein orage !



Single line diagram of HQPS power plant.

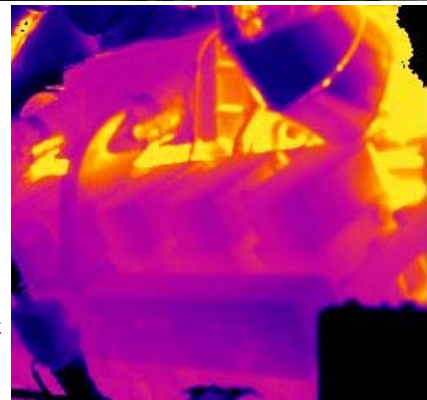


Figure 60 : schéma de principe de HQPS + photo normale et infra rouge d'un moteur en fonctionnement

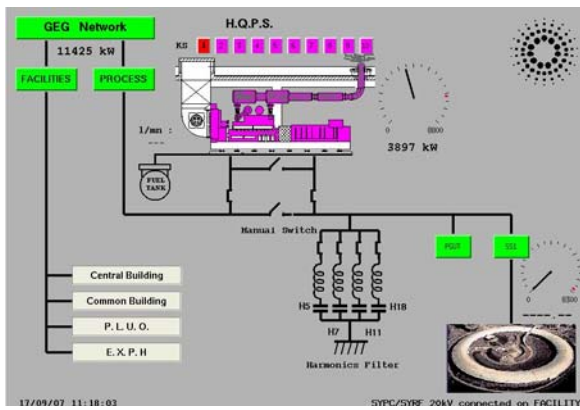


Figure 61 : synoptique de l'installation HQPS

Sur une période de 6 ans, les moteurs Diesel ont démarré en moyenne 70 fois / an, autant de pertes de faisceau évitées !

Les deux seules fois où le système n'a pu prendre le relais ont été lorsque l'orage est tombé directement sur le site de l'ESRF.

Un nouveau système HQPS II est fonctionnel depuis l'été 2008.

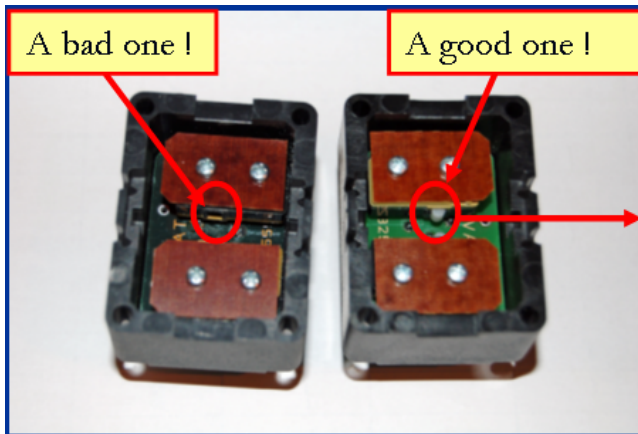
5.2.10 Une « simple » amélioration de conception est parfois suffisante.

Exemple 1 : Les équipements radio-fréquence sont protégés par une multitude d'interlocks, notamment une cinquantaine de détecteurs d'arc répartis dans tout le circuit de guides d'ondes. Avant 2000, les arrêts de faisceau suite à une fausse détection d'arc RF étaient très fréquents. Plus de 50 arrêts en 1999 (!). Des inspections visuelles démontraient bien que les guides d'ondes n'avaient subi aucun dommage ce qui confirmait qu'il s'agissait bien de fausses détections.

A contrario, certaines détections, plus rares, se sont révélées tout à fait justifiées : le démontage du guide d'onde concerné révélait en effet des traces d'arc à des endroits sensibles du guide d'onde. Contrairement à l'exemple cité en 4.2.5, l'interlock est donc ici nécessaire mais il n'est pas du tout optimisé.

En juin 2000, l'électronique de ces détecteurs a été complètement revue : le bruit électronique (souvent à l'origine du déclenchement) est beaucoup mieux filtré, la bascule flip-flop a été supprimée et le niveau de détection remonté. Actuellement, sauf rares exceptions, les fausses détections sont éradiquées, la dizaine d'arcs RF constatée chaque année donne souvent lieu à une inspection visuelle pendant la période de maintenance.

Exemple 2 : Plus récemment (2005), plusieurs arrêts de faisceau ont eu lieu suite au déclenchement d'un 'fin de course' provenant de vannes manuelles de vide situées dans le tunnel. Or, une vanne manuelle ne se ferme pas toute seule ! Comme le montre l'exemple ci-dessus, l'interlock est pourtant indispensable car lorsqu'on redémarre les accélérateurs après une longue période d'arrêt, on veut être sûr que toutes les vannes ont bien été rouvertes. Ces pannes s'étant répétées de plus en plus souvent, ces composants ont été démontés et il s'est avéré que le contact déclencheur était complètement détruit sous l'effet des radiations.



Depuis lors, ces contacts ont tous été remplacés par des contacts en céramique, bien moins sensibles aux radiations et l'ensemble du composant est maintenant protégé par un petit capot de plomb. Plus aucune panne de ce genre ne s'est manifestée depuis.

Figure 62 : à gauche, le contact détruit par les radiations ; à droite, un contact neuf.

5.2.11 Maintenance préventive.

Dans certains cas de pannes fréquentes, la maintenance préventive, en plus d'autres solutions curatives, reste la meilleure solution pour minimiser les pannes. Il est en effet une catégorie de pannes dont on peut minimiser la fréquence sans les empêcher totalement car elles sont dues à des phénomènes physico-chimiques inévitables, notamment la corrosion, la production d'oxyde de cuivre dans les circuits d'eau, etc.

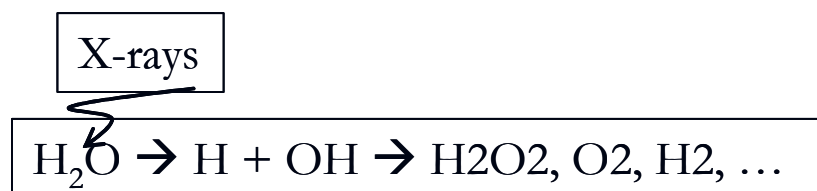
Deux exemples de pannes sont donnés ici. Pour chacune de ces pannes, les causes sont comprises, la fréquence des pannes minimisée, mais il n'est pas encore possible de les éviter totalement.

Exemple 1 : Présence d'oxyde cuivre dans les circuits d'eau.

La formation d'oxyde de cuivre dans l'eau dé-ionisée subissant du rayonnement est un phénomène connu, observé dans tout accélérateur. De nombreuses études ont été menées pour comprendre ce phénomène complexe et ... inévitable !

Je ne ferai que résumer ce phénomène ici pour aider à la compréhension :

1°) La radiolyse :



H₂O₂, O₂ et H₂ sont des contributeurs importants à la production d'oxyde de cuivre.

2°) La formation d'oxyde de cuivre (résumée !)

Lors d'une intervention sur les circuits d'eau, du CO₂ est inévitablement introduit dans le circuit d'eau :

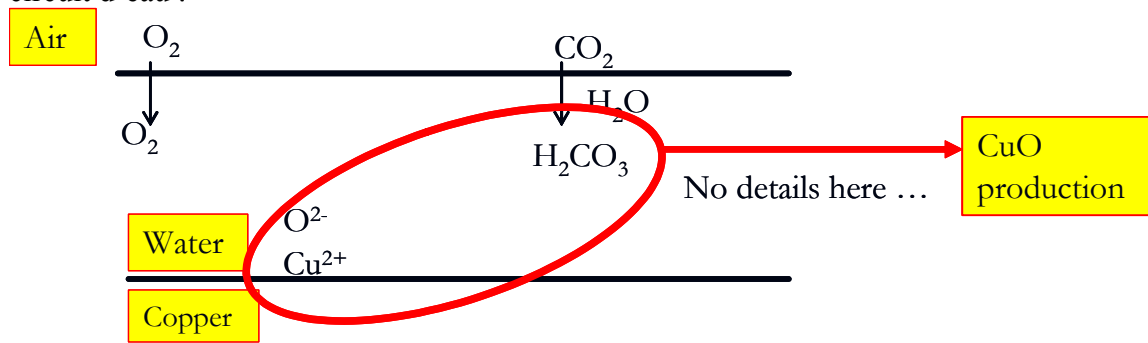


Figure 63 : schéma de principe de la production d'oxyde de cuivre

Les phénomènes qui auront de l'importance sur le TAUX de production sont :

- facteur 1.6 : les radiations
- facteur 3 : la température de l'eau
- facteur 15 : la vitesse de l'eau
- facteur 200 (!) : le taux de concentration de CO₂ dans l'eau et la quantité d'oxygène dissous dans l'eau.

Les conséquences seront des dépôts d'oxyde de cuivre dans tous les rétrécissements du circuit, là précisément où la vitesse de l'eau est élevée et où un effet de cavitation est souvent présent. L'oxyde de cuivre va continuer à se déposer jusqu'au moment où l'eau ne parvient quasiment plus à passer, déclenchant alors l'interlock du débitmètre de l'équipement correspondant (bien souvent un aimant, parfois un crotch absorber).

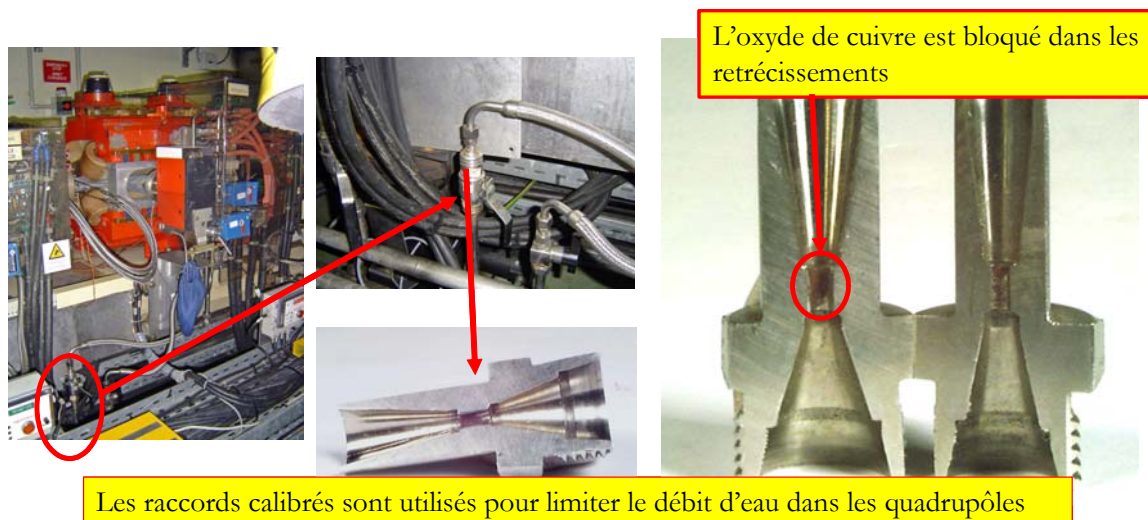


Figure 64 : dépôts d'oxyde de cuivre dans les raccords calibrés

Comment avons-nous pu minimiser cet effet ?

- En plaçant des résines spéciales dans le circuit d'eau. Celles-ci ont pour but de piéger l'oxyde de cuivre.
- En mesurant en continu le taux d'oxygène dissous dans l'eau (de l'ordre de 50 ppb) afin d'anticiper tout problème.
- En prenant régulièrement des échantillons d'eau pour mesurer la quantité d'oxyde de cuivre (également pour anticiper toute anomalie)
- Afin d'éviter tout contact avec l'air, le réservoir d'eau est maintenu sous pression avec de l'azote et non pas de l'air.
- Le pH est maintenu aux environs de 4
- Pendant les interventions, et autant que possible, les contacts air-eau sont limités dans le temps
- Les débitmètres sont tous systématiquement vérifiés lors des périodes de maintenance. Dès que l'un d'entre eux mesure un débit légèrement inférieur au débit nominal, les raccords sont vérifiés et nettoyés.
- Des tests systématiques de baisse de pression d'eau ont lieu afin de noter quels débitmètres déclenchent en premier lieu. Ceux-là sont aussi vérifiés en priorité.

Ces pannes autrefois très fréquentes sont aujourd'hui marginales. De plus, on retire aujourd'hui 20 mgr de cuivre / m² / jour contre ... 600 avant que ces mesures ne soit prises.

Exemple 2 : Les phénomènes de corrosion eau-cuivre.

Il arrive assez fréquemment que des fuites d'eau se déclenchent à des endroits où ont lieu le phénomène de cavitation (coudes, rétrécissements). En 2005, il y a eu 13 arrêts et 17 heures de pertes à cause de ce type de panne.

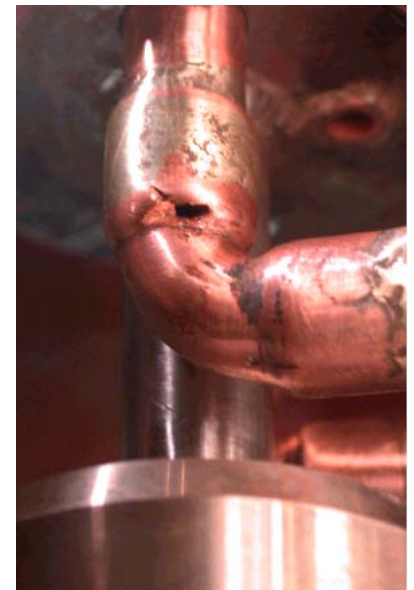
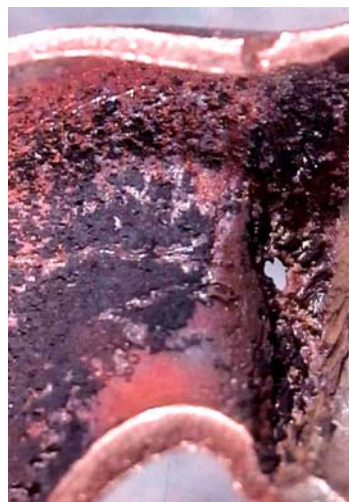


Figure 65 : détails de l'effet de corrosion dans un tuyau coudé.

Dans ces endroits où la vitesse de l'eau est élevée ou bien change de direction, des bulles vont se créer et percuter avec suffisamment de force les parois de cuivre qu'au fil des années, un trou va se créer ; Ce phénomène appelé 'pitting effect' est bien connu également des plombiers du bâtiment !

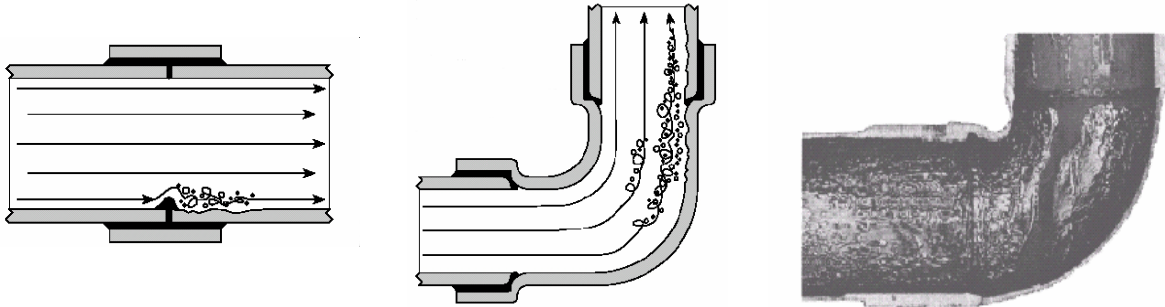
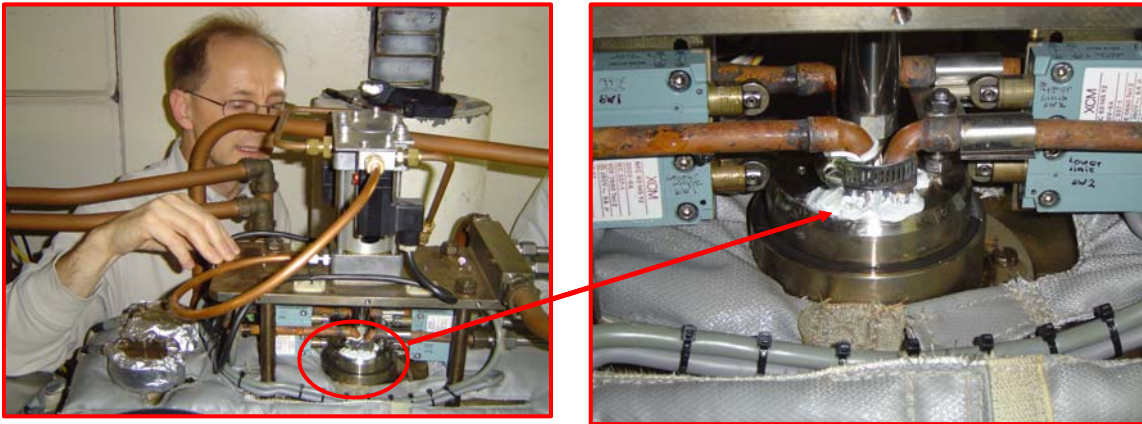


Figure 66 : effet de la cavitation sur l'effet corrosif.

Dans l'immédiat, la solution est de réparer du mieux possible en fonction de l'importance du trou.

Figure 67 : réparation temporaire d'une fuite sur un absorbeur de départ de ligne.



La solution à long terme est bien sûr de remplacer ces équipements mais cela fait partie d'un programme long et coûteux, actuellement en cours.

5.3 Diminuer le temps moyen d'une panne

Lorsque la panne arrive, d'autres méthodes doivent être utilisées pour essayer que celle-ci soit aussi courte que possible. Je donnerai ici quelques exemples de méthodes utilisées à l'ESRF : elles sont de 2 types : techniques (redondance) mais aussi organisationnelles (procédures, formations, etc)

5.3.1 La redondance passive d'équipement.

En opposition à la redondance active (de type HQPS décrit plus haut), la redondance passive nécessite souvent la présence d'un expert pour démarrer un équipement de réserve une fois que la panne a eu lieu.

Je citerai ici 2 exemples types qui se passent fréquemment à l'ESRF.

Exemple 1 : redondance de klystrons radio-fréquence.

Aux débuts de l'ESRF, 1 seul klystron alimentait 4 cavités radio-fréquence, de sorte que pour obtenir une intensité élevée du faisceau d'électrons circulant, ce seul klystron travaillait à pleine puissance et toute cette puissance passait à travers 4 fenêtres de cavité. Cela donnait très souvent lieu à des claquages du klystron mais aussi des éclatements de fenêtres de cavités. Dans le cas d'une panne klystron, cela pouvait redémarrer tout de suite dans le meilleur des cas, mais cela pouvait nécessiter de remplacer un klystron dans le pire des cas, soit une opération de 6 heures environ en supposant que le personnel compétent soit disponible et en nombre suffisant.

Dans le cas d'un claquage des fenêtres RF, la situation était bien plus catastrophique puisque les cavités étaient remises à la pression atmosphérique. Plusieurs jours de conditionnement étaient alors nécessaires avant de redonner le faisceau aux utilisateurs.

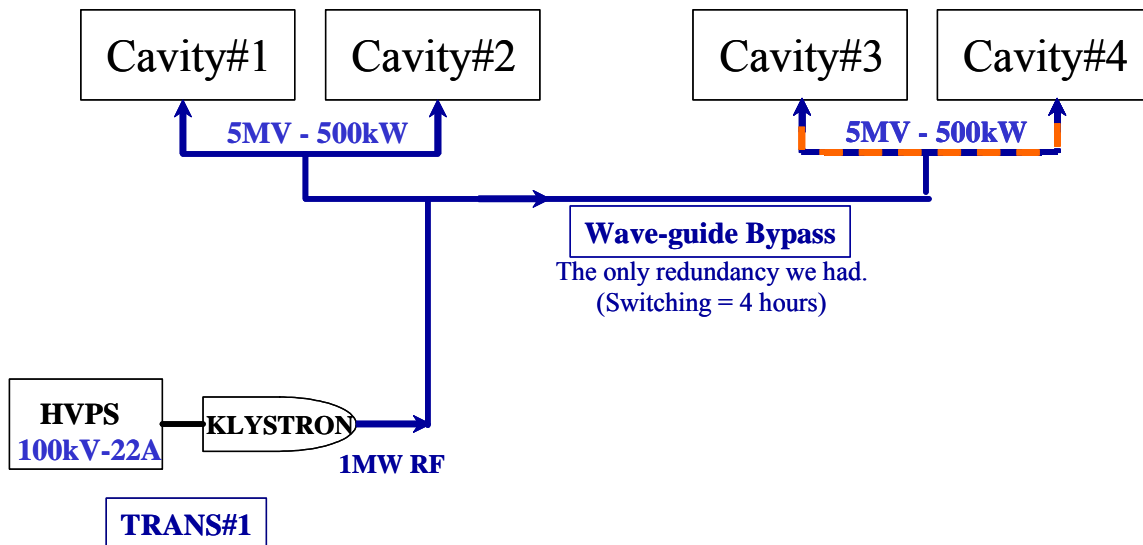


Figure 68 : étape 1: 1 klystron alimente 4 cavités

Une première étape fut franchie en mai 1995 quand un deuxième klystron fut installé, chacun alimentant 2 cavités. L'objectif était de diminuer la puissance de chaque klystron d'un facteur 2. Ce fut un premier succès car les pannes liées aux klystrons diminuèrent drastiquement et 200 mA furent obtenus fin 1995.

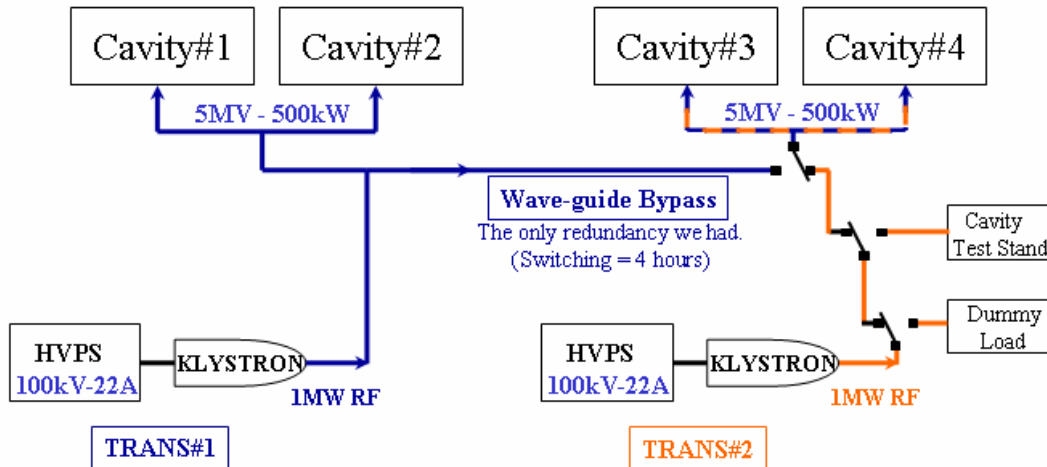


Figure 69 : étape 2: 2 klystrons alimente 4 cavités

Mais dans le cas d'une panne sérieuse sur 1 klystron, il fallait toujours plusieurs heures pour le remplacer.

En 1997, deux nouvelles cavités furent installées sur l'anneau de stockage alimentées par un nouveau klystron. De même, le circuit de guide d'onde fut considérablement augmenté. Dans cette nouvelle configuration, la puissance passait donc dans 6 fenêtres au lieu de 4 (donc réduisant considérablement le risque de claquage d'une fenêtre). De plus, un klystron alimentait les cavités 1-2-3-4 à mi-puissance tandis qu'un autre klystron alimentait les cavités 5-6 à mi-puissance également. Grâce à un subtil circuit de guide d'onde, il reste donc 1 klystron prêt à prendre la relève dès qu'un klystron 'actif' serait défaillant.

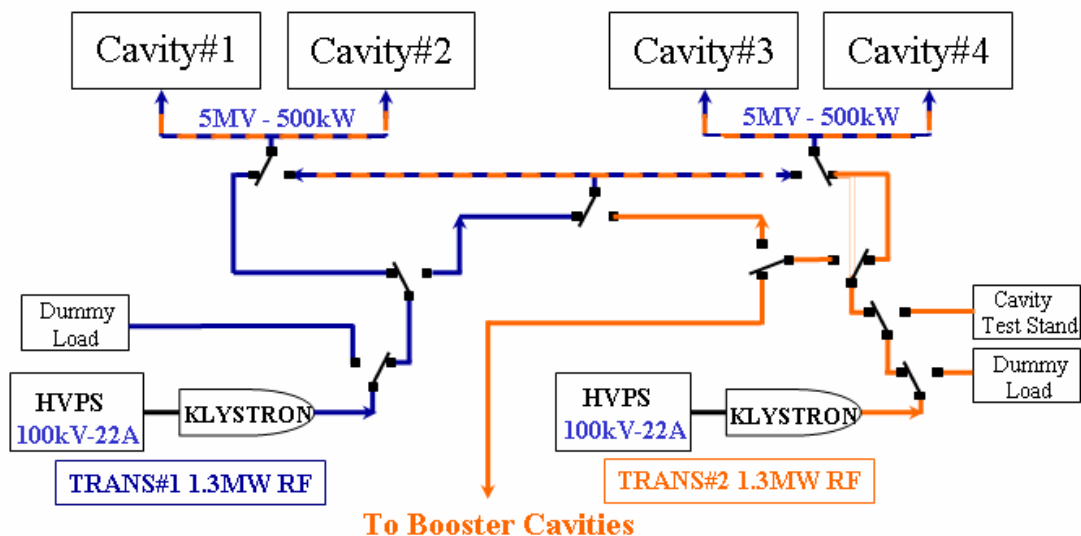


Figure 70 : étape 3: 1 klystron alimente 4 cavités, l'autre sert de pièce de réserve, le troisième (non-visible) alimente 2 autres cavités (non-visibles sur la figure)

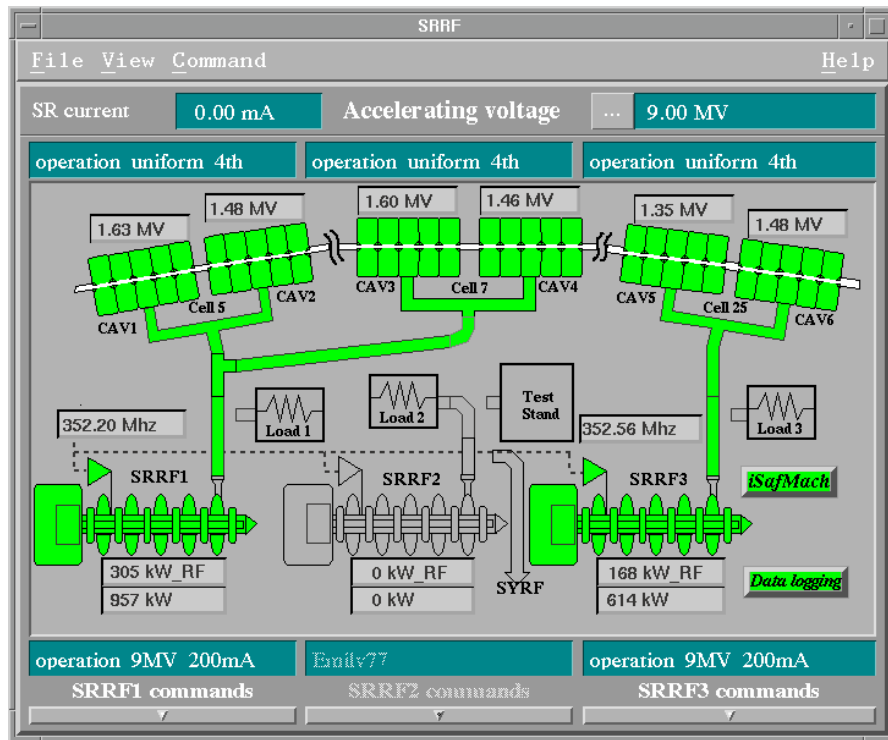


Figure 71 : synoptique du système radio-fréquence tel qu'il fonctionne en 2009

Il ne faut plus que 15 minutes pour passer d'un klystron à l'autre contre 6 heures auparavant ...

Exemple 2 : redondance d'alimentations de haute puissance

Chaque famille d'aimants possède une alimentation qui lui est spécifique, soit 13 alimentations différentes (1 pour les dipôles, 6 pour les quadrupôles, 6 pour les sextupôles). Il n'est pas concevable d'avoir une alimentation de réserve par famille d'aimants.

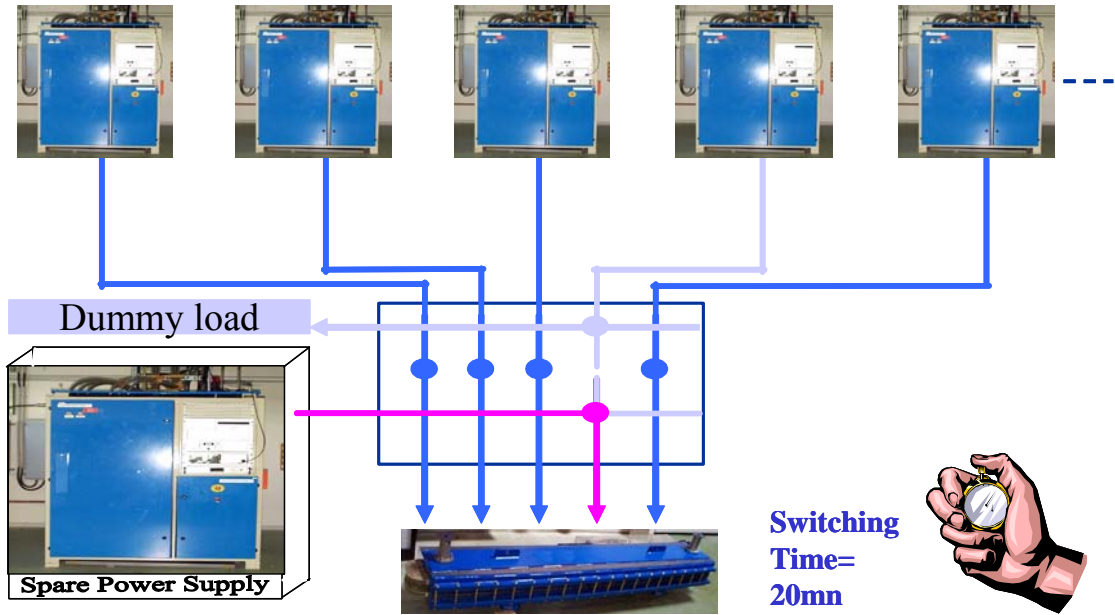
La première idée fut donc d'avoir une alimentation de réserve capable de remplacer n'importe quelle alimentation existante. Elle est appelée 'Super Spare Power Supply'.

Mais lorsqu'une alimentation venait à défaillir, il fallait malgré tout quelques heures de décablage/ recablage pour alimenter une famille d'aimants avec cette 'super alimentation'.

L'idée fut alors de construire une armoire géante de type matricielle, par où passent tous les câbles de puissance de toutes les alimentations ainsi que les câbles de la 'super alimentation'.



Figure 72 : Le 'switching board' : point de passage de toutes les alimentations de puissance à l'ESRF.



Courtesy of JM KOCH

Figure 73: Le principe de fonctionnement lorsqu'une alimentation tombe en panne.

Le principe est que quand une alimentation tombe en panne, on peut agir sur un simple jeu de switch basculeurs pour la déconnecter de sa famille d'aimants, l'envoyer sur une charge pour des tests ultérieurs et basculer la famille d'aimants sur la super alimentation. Cette opération ne dure que 20 minutes !
Le coût de cette armoire est de 360 000 euros.

Ces 2 exemples réunis nous ont fait gagner de nombreuses heures de faisceau !

5.3.2 Un plan d'intervention doit exister.

Pour minimiser le temps moyen d'une panne, d'autres moyens de type organisationnel doivent avoir été mis en place.

Exemple 1 : des experts disponibles 24h/24.

A l'ESRF, des experts de différents domaines sont joignables 24h/24 en cas de problème sur un de leur équipement. On compte actuellement 11 groupes en astreinte : des groupes 'experts' (vide, radiofréquence, alimentations haute –puissance, etc.), des groupes supports (système de contrôle, sécurité) et un groupe de physiciens des accélérateurs pour les problèmes liés au faisceau.

C'est l'opérateur, qui après avoir diagnostiqué la panne, prend la décision d'appeler la personne en astreinte. Celle-ci doit se rendre sur site dans l'heure qui suit l'appel.

L'astreinte dure une semaine, du vendredi 07h00 au vendredi suivant 07h00.

Exemple 2 : quelques procédures.

Une cinquantaine de procédures écrites se trouvent en salle de contrôle. Ces procédures sont généralement utiles pour aider à diagnostiquer un problème complexe ayant déjà été rencontré dans le passé. A titre d'exemple, 'comment retrouver un aimant correcteur fautif en se basant sur une analyse de l'orbite'. Ces procédures sont particulièrement utiles pour gagner du temps, par exemple, lorsque la fatigue se rajoute au problème à résoudre.

Exemple 3 : du matériel 'prêt à l'emploi'.

Comme il est écrit plus haut, il arrive parfois qu'un raccord calibré se bouche sur un aimant, faisant tomber le faisceau. Quoi de plus désagréable que de perdre le temps à chercher du matériel dispersé dans différents ateliers au milieu de la nuit...

Pour cette raison, plusieurs boîtes à outils spécialisées ont été équipées du matériel nécessaire à une intervention précise.

Exemple 4 : retrouver rapidement de l'information

Face à un problème, l'opérateur pourra se souvenir que quelqu'un a déjà du faire face à ce problème X années auparavant. Un des objectifs du logbook électronique installé récemment à l'ESRF est précisément de retrouver rapidement toute l'information

concernant un équipement, la documentation de cet équipement, l'historique des pannes et des événements, etc.

Il faut quelques secondes à peine pour filtrer tous les événements qui se sont passés sur le klystron N° 2 :

Event	Accelerator	Equipment	Sub-Equipment	Message
Information	SR	SRRF	TRA2	P. Jodar : D.Boilot starts Tra2 at low power for Cavity conditioning till 12:00...
Information	SR	SRRF	TRA2	Jorn Jacob writes: We have successfully started the RF system in the 300 mA configuration (without beam). The FOC2 Voltage of TRA2 was out of range and therefore INTERLOCKED for about 25 minutes. Then, it was sufficiently warm to be inside the interlock window. For the RF experts: after some hours heating, one should probably re-adjust the Voltage Interlock level on the power supply. For the operation group: If you have to switch to TRA2, then give about half an hour of warm up before FOC2 can be reset.
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas : D.boilot informs CTRM he stopps his test on SRRF2
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas : we ask D.Boilot to stop the TRA2 tests : total power consumed too high
Information	SR	SRRF	TRA2	Stephane writes: D. Boilot switched TRA2 on T-Stand
Information	SR	SRRF	TRA2	Stephane writes: D. Boilot switch SRRF2 on Test stand until tomorrow
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas D.Boilot informs CTRM : TRA2 started for tests now and hopefully until to morrow morning....it needs about 800kW
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas : TRA2 running for tests now and hopefully during all the next night in case of trip, do not try to restart it ! in case of power limitation, please stop it (low heating)
Information	SR	SRRF	TRA2	Pierre Jodar writes: Call from D.Boilot, he restarts TRA2 for cavity conditioning...
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas SRRF : D.Boilot informs CTRM ---> TRA2 will be kept running for tests until to morrow morning (HQPS in by pass) if any problem occurs let it as it is
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas

Figure 74 : copie d'écran du logbook électronique de la salle de contrôle

Exemple 5 : La formation

Les formations pratiques et les renseignements glanés sur le terrain se révèlent, dans un premier temps, bien plus efficaces que la plupart des documentations.

Pour cette raison, les opérateurs de l'ESRF effectuent 20 % de leur temps de travail en horaire normal. L'objectif est de participer au travail des autres groupes, visiter les autres groupes, se renseigner sur le fonctionnement des équipements, etc.

Cette connaissance de terrain des opérateurs nous a fait bien souvent gagner beaucoup de temps en évitant de faire venir une personne d'astreinte.

Comment quantifier les résultats de toutes ces méthodes exposées dans ce chapitre ?

Probablement en comparant les données statistiques entre 1995 et 2006.

La **disponibilité du faisceau** est passée de **92.9 % en 1995** à **98.3 % en 2008** !

Le **temps moyen entre 2 pannes** est passé de **21.5 heures en 1995** à **64.5 heures en 2008** !

De nombreuses améliorations sont encore possibles mais les efforts consentis jusqu'à présent n'ont pas été vains !

6 Le fonctionnement au jour le jour : l'approche quotidienne

Le chapitre précédent indiquait des exemples de tâches de fond (long – moyen terme) qui ont une influence sur l'opération des accélérateurs au quotidien, notamment en termes de fiabilité.

Ce chapitre se concentrera plus sur les outils de contrôle de la qualité du faisceau gérée au quotidien par la salle de contrôle.



Figure 75 vue panoramique de la salle de contrôle

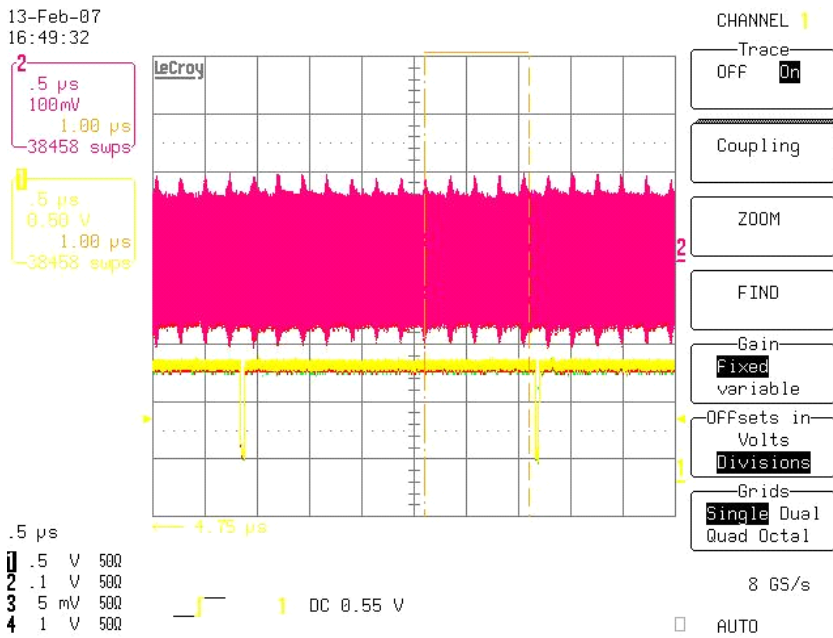
6.1 Les différents modes de faisceau en 2009.

Nous avons vu que dans l'anneau de stockage, il y a 992 'espaces' possibles pour y placer les électrons. De plus, grâce à un système de timing performant, on est libre de placer plus d'électrons dans un bunch que dans un autre. Depuis plus de 10 ans, beaucoup de discussions ont lieu avec les utilisateurs pour essayer de déterminer les modes les plus utiles à la majorité des scientifiques, sans oublier la 'minorité' qui a besoin de modes spéciaux pour d'autres types de recherche.

Ce paragraphe décrit sommairement les différents types de remplissage utilisés en 2007-2008.

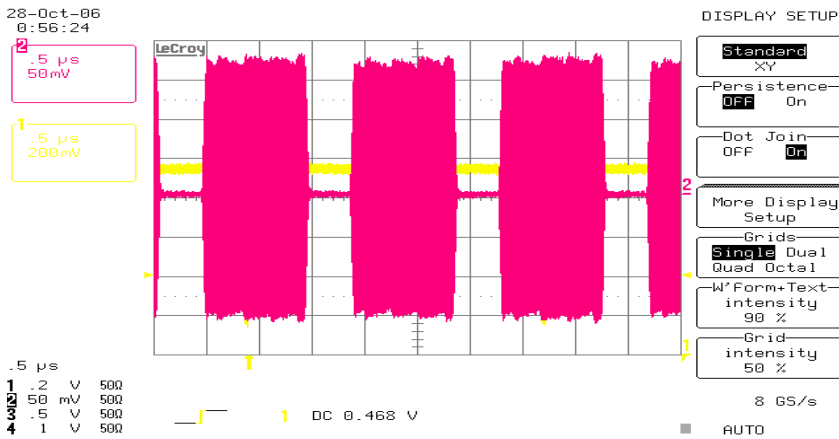
6.1.1 Le mode uniforme.

Il est le plus simple à décrire puisque dans ce cas, la totalité des buckets disponibles est occupée, soit 992 bunches. Il est délivré à 200 mA.



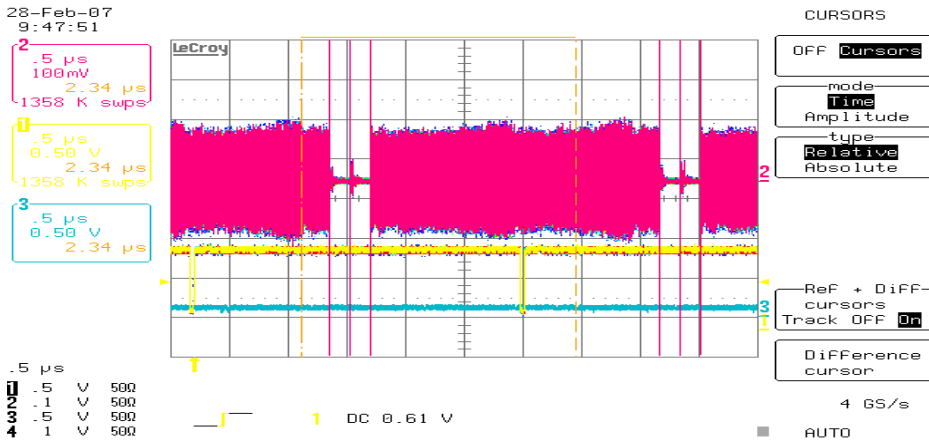
6.1.2 Le mode 2* 1/3

2 * 1/3 de la circonférence sont remplis. Ils sont séparés par 2 gaps vides (1/6 de la circonférence). La présence de ces gaps élimine les ions piégés par le faisceau lorsque les conditions de vide ne sont pas parfaites (ce qui n'est pas le cas du mode uniforme).



6.1.3 Le mode « 7/8 +1 »

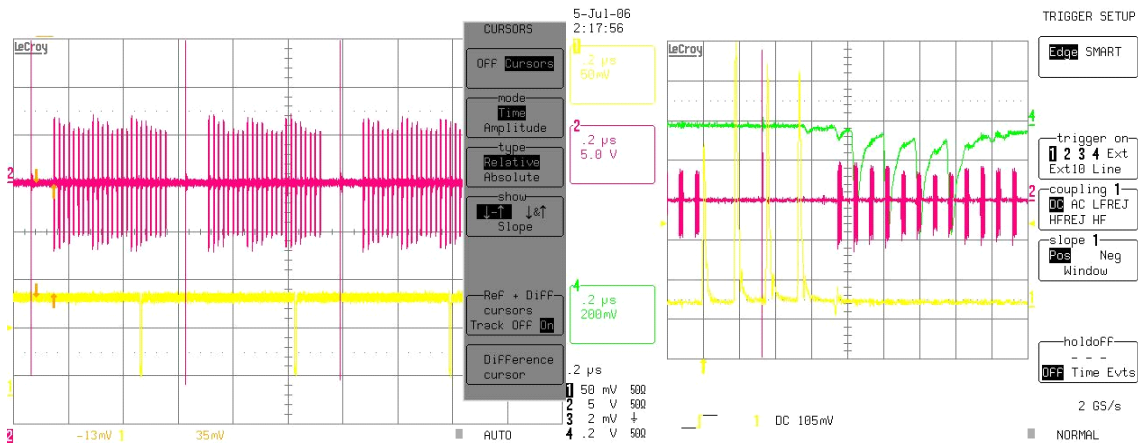
C'est un mode structuré en temps et de haute intensité. 7/8 de la circonférence est remplie d'électrons (c'est-à-dire 868 bunches – donc 0.23 mA / bunch). Le gap de 1/8 est rempli avec un bunch de 2 mA. L'objectif est de satisfaire tant les utilisateurs ayant besoin d'une grande intensité que ceux ayant seulement besoin d'un single bunch.



6.1.4 Le mode hybride 24 * 8 +1

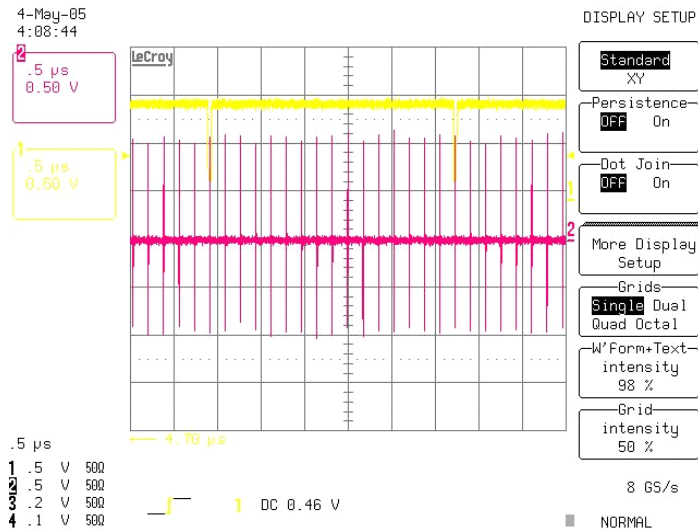
De plus en plus prisé, ce mode satisfait les utilisateurs ayant besoin d'intensité, ceux ayant besoin de structure en temps (24 paquets de 8 bunches) et ceux ayant seulement besoin d'un seul bunch.

24 paquets de 8 bunches sont répartis sur $\frac{3}{4}$ de la circonférence. Le quart restant est vide à l'exception d'un single bunch de 4 mA en son centre. L'intensité totale est de 200 mA.



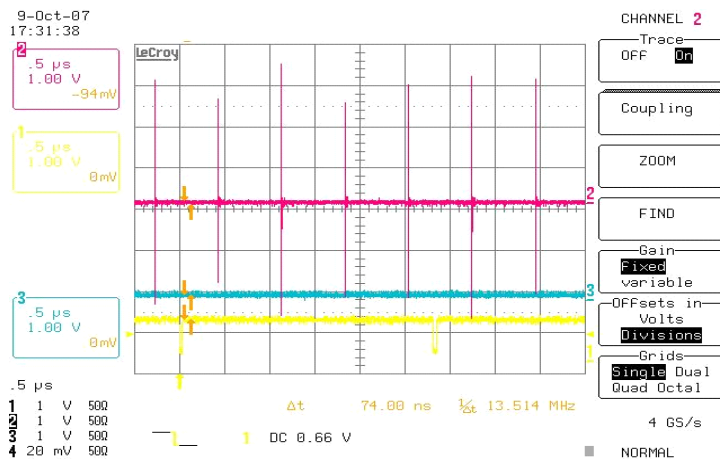
6.1.5 Le 16 bunch

Dans ce mode, 16 bunches sont répartis de manière équidistante sur les 844 mètres avec une intensité de 5.6 mA / bunch, soit un courant total de 90 mA.



6.1.6 Le 4*10 mA

Comme son nom l'indique, 4 bunches de 10 mA sont répartis uniformément sur la circonférence avec une intensité de 10 mA / bunch soit une intensité totale de 40 mA.



		Uniform	2*1/3	24 *8	7/8 +1	16 bunch	4 Bunch
Repartition of modes in 2007		44%	0%	5%		24%	6%
Hours		2583	1319	275		934	385
Refill Current	<i>mA</i>	204	204	200	200	92	43
Number of refills	<i>per day</i>	2	2	2	2	4	6
Current Decay between refills	<i>mA</i>	25	35	60		40	20
Average current	<i>mA</i>	185	180	160		70	30
Current / bunch	<i>mA</i>	0.21	0.29	1.04	0.23	5.75	10.75
Lifetime at refill current	<i>Hours</i>	80	65	30 (18)	72	12 (6h30)	6 (3h30)
Time structure	<i>F0=355 kHz</i>	12 F0	2F0	32 F0		16 F0	4F0
Number of bunches		992	704	192	1	16	4
Cleaning				in SR	in SR	in SR	in SR
Purity		\	1.E-10	1.E-10	1.E-10	1.E-10	1.E-10
H emittance	<i>nm</i>	4	4	4.2		4.5	4.5
V emittance (without white noise)	<i>pm</i>	30-40	25	70 (20)		70 (30)	70 (30)
Energy Spread	<i>x10-3</i>	1	1	1	1	1.2	1.5
Bunch length	<i>ps</i>	20	20	25	20	50	60
Phase variation	<i>deg</i>	0	0	0	0	-5	-20
Average refill time	<i>mn</i>	2.5	2.5	13		5	8
Injector mode (number of pulses)		Long	Long	Short (4)	Short(1)	Short(5)	Short(2)
Injection rate	<i>Hz</i>	1	1	10	10	10	10

Tableau 3 : résumé des paramètres principaux pour tous les modes de livraison

Notons que les planifications des modes se font 6 mois à l'avance et sont déterminées essentiellement par un comité d'utilisateurs. On le voit dans ce tableau, l'anneau de stockage est rempli entre 2 et 6 fois par jour en fonction du mode.

C'est une des tâches quotidiennes de l'opérateur que d'effectuer cette opération. La méthode de remplissage est parfois complexe (pour le 7/8 + 1 par exemple) et toutes font l'objet d'une procédure très détaillée.

6.2 Les critères de qualité du faisceau

6.2.1 La pureté

A l'exception du mode uniforme et 2 * 1/3, tous les autres modes demandent une étape supplémentaire appelée **cleaning** (nettoyage) décrite ci-dessous.

Lors du remplissage, il s'avère que certains bunches censés rester vides sont en fait pollués par quelques électrons, on les appelle bunches parasites. Pour certains types d'expériences, la présence indésirable de ces électrons parasites rend l'expérience tout simplement impossible !

Comme le point de fonctionnement (Q_x, Q_z), c-à-d la fréquence bêatronique, dépend de l'intensité, il s'avère que la fréquence des paquets parasites (peu intenses) est différente de la fréquence bêatronique des paquets principaux. La méthode de cleaning va donc consister à exciter les paquets parasites avec une fréquence qui va les faire résonner, c-à-d qu'on va augmenter considérablement leur dimension, et pendant ce temps, on va

fermer des scrapers à une distance juste suffisante pour intercepter ces paquets excités sans intercepter les paquets principaux qui ne ressentent pas l'excitation. Il est fréquent d'arriver à des niveaux de pureté de l'ordre de 10^{-10} , autrement dit, à peine 1 électron dans les bunches voisins des paquets principaux !

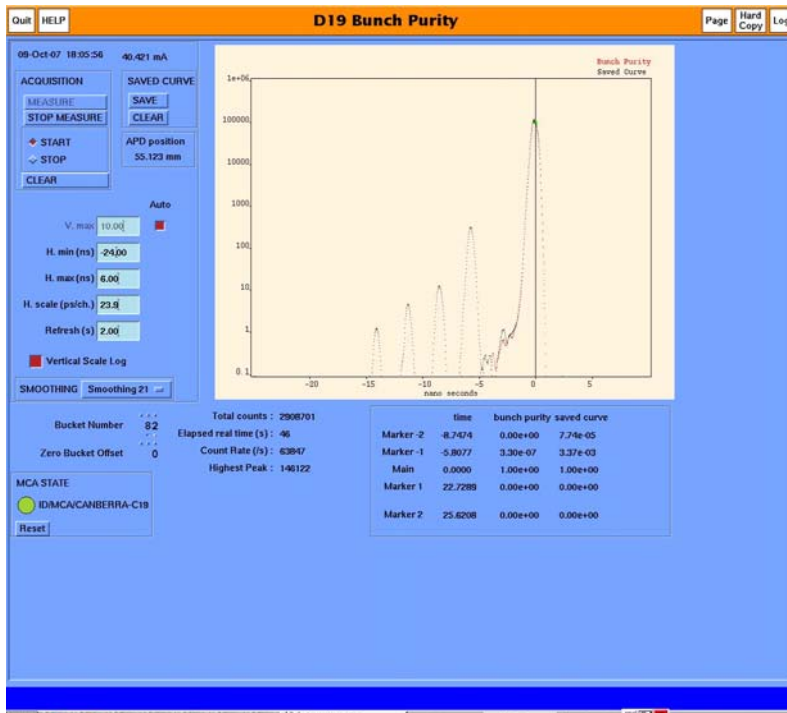


Figure 76 : copie d'écran de l'application mesurant la pureté des bunches du faisceau

On voit sur la figure ci-dessus, le taux de comptage dans chaque bunch avant le processus de cleaning (courbe noire) et après (courbe rouge) où l'on n'observe plus de comptage dans les paquets adjacents.

Ce paramètre de faisceau est appelé la **pureté** et est capitale pour certaines expériences.

6.2.2 Le temps de vie (lifetime) du faisceau.

Les paramètres qui vont déterminer le temps de vie du faisceau feraient l'objet d'un cours de dynamique de faisceau, hors du cadre de ce cours. Nous ne citerons ici que les paramètres sur lesquels les opérateurs peuvent agir au quotidien.

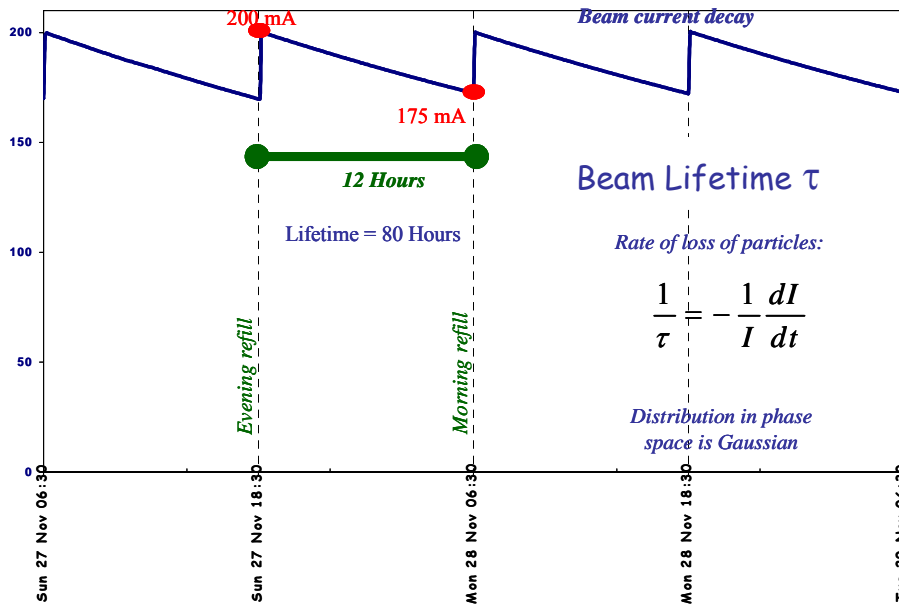


Figure 77 : visualisation du temps de vie sur la décroissance de l'intensité du faisceau

- Les corrections de résonance.

Chaque semaine, lorsqu'un mode est testé avant d'être livré la semaine suivante aux utilisateurs, les opérateurs effectuent une **correction de résonance**.

Il est enseigné dans d'autres cours que lorsque les points de fonctionnement du faisceau approchent certaines lignes de résonances critiques, celui-ci peut devenir couplé, voir sa taille grandir dans un plan ou tout simplement éclater jusqu'à le perdre ! N'oublions pas que le point de fonctionnement dépend de l'intensité. Donc, même lors d'une décroissance régulière, il faut tenir compte du fait que les tunes du faisceau peuvent s'approcher d'une ligne de résonance...

La correction consiste donc à approcher volontairement les tunes du faisceau près de ces lignes de résonance et même, sur les résonances (ce qui se fait très facilement en changeant finement la valeur d'un seul quadrupole) afin de trouver le réglage des correcteurs qui vont permettre au faisceau de survivre près de ces lignes de résonance. Résumons en disant que ces correcteurs ont pour but de générer volontairement des imperfections de champ magnétique qui compensent quasi parfaitement les imperfections magnétiques des aimants principaux ou aussi leurs défauts d'alignement.

A l'ESRF, 5 résonances sont couramment corrigées : 2 résonances quadrupolaires (ordre 2), 2 résonances de couplage (ordre 2) et une résonance sextupolaire (ordre 3).

La qualité avec laquelle cette correction aura eu lieu influencera le temps de vie, la vitesse d'injection, la saturation possible de l'injection du faisceau à des intensités élevées et aussi les tailles de faisceau (les émittances).

- Le point de fonctionnement

Après le remplissage, lorsque le courant est maximum, l'opérateur doit veiller à ce que les points de fonctionnement à cette intensité soient conformes à la procédure. Comme nous venons de l'expliquer, c'est un point qui est censé procurer un bon temps de vie et qui, lorsqu'il va varier en fonction de la décroissance du courant, va être aussi éloigné que possible des lignes de résonance.

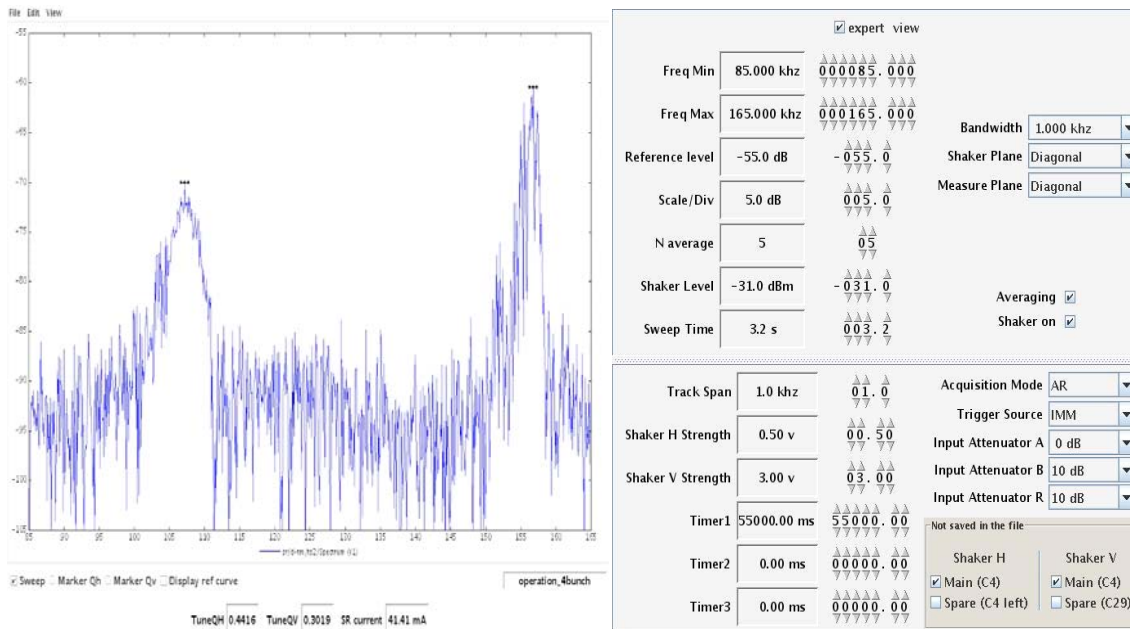


Figure 78 : Les tunes verticaux et horizontaux du faisceau mesurés par les striplines

- Le vide dans l'anneau de stockage.

Le niveau de vide dans l'anneau de stockage a une incidence directe sur le temps de vie du faisceau. Après une période de maintenance où plusieurs cellules ont été remises à l'air, il est justifié que le vide ait besoin de temps pour revenir à son meilleur niveau (de l'ordre de 2 à 3 semaines). Par contre, passée cette période et dans des conditions nominales, un accident de temps de vie ou une dégradation lente pourraient indiquer les prémices d'une fuite de vide.

A ce moment, plusieurs outils existent pour détecter un endroit éventuel où le vide pourrait se détériorer :

Une lecture directe des jauges de vide avec une mémorisation des points les plus hauts depuis X minutes dans un but de comparaison :

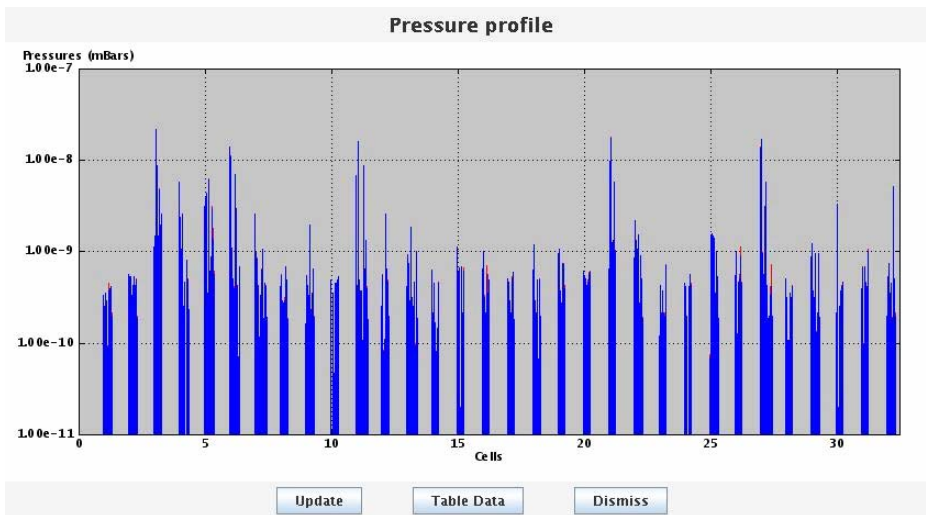


Figure 79 : une vue synthétique de pression dans les 32 cellules de l'anneau de stockage

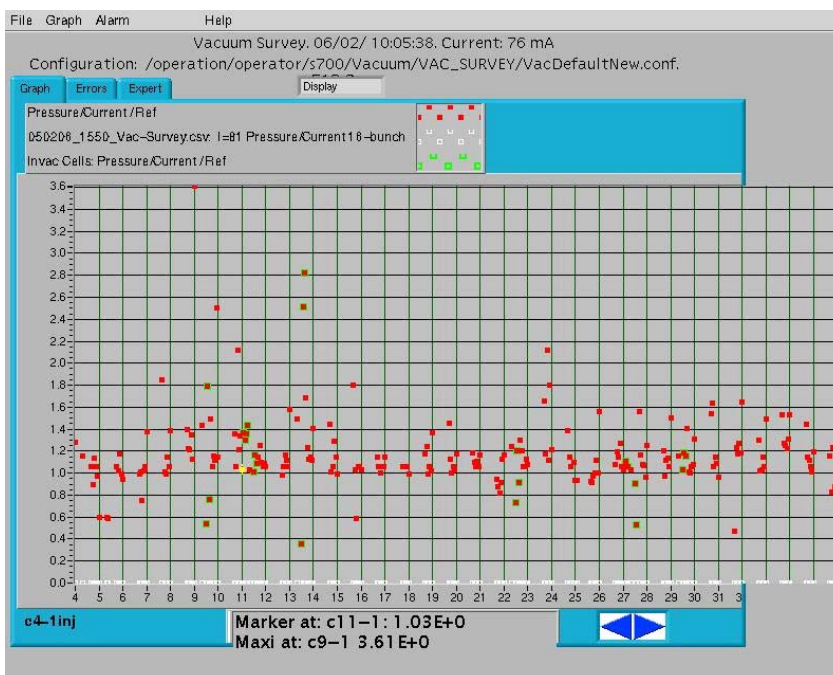


Figure 80 : vue synthétique de la pression normalisée par rapport à une référence dans les 32 cellules

La figure ci-dessous illustre un de ces accidents de temps de vie. La chute est corrélée avec une remontée de pression en aval de la section droite de la cellule 10 :

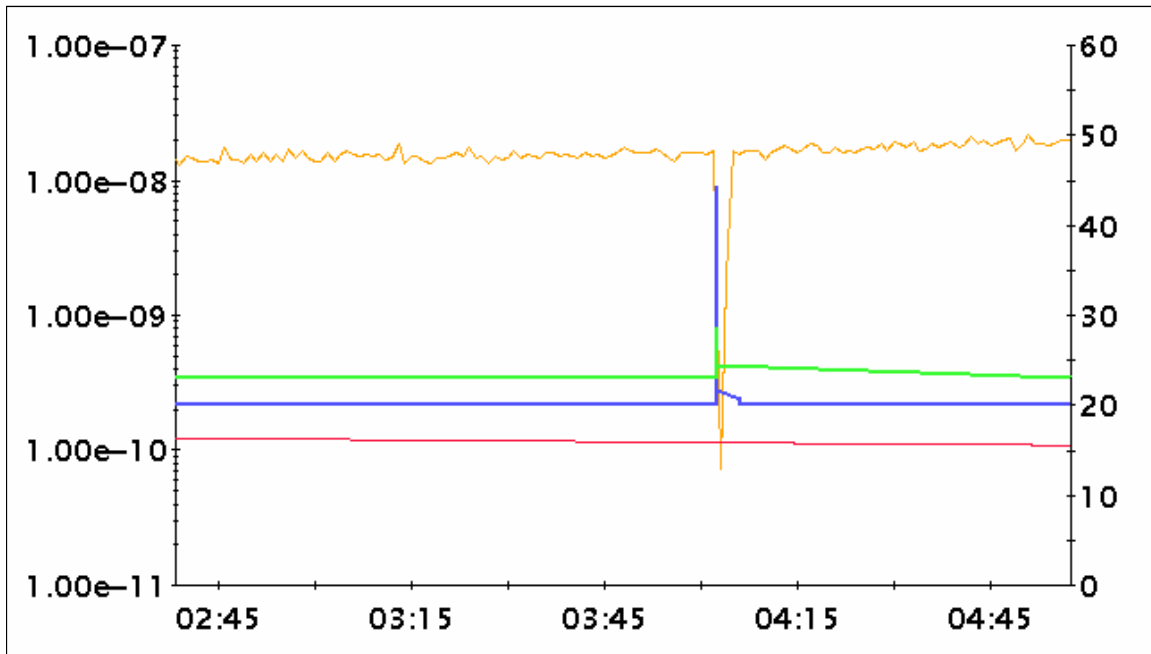


Figure 81 : exemple de corrélation entre chute du temps de vie et remontée de pression en un endroit précis

- Les mouvements de gaps des éléments d'insertion.

Il peut arriver que des mouvements de grande ampleur des mâchoires magnétiques de certains éléments perturbent fortement le temps de vie du faisceau. L'exemple ci-dessous illustre un cas où le temps de vie a chuté de 50 % lors de la fermeture d'un élément d'insertion sous vide (gap = 6 mm) :

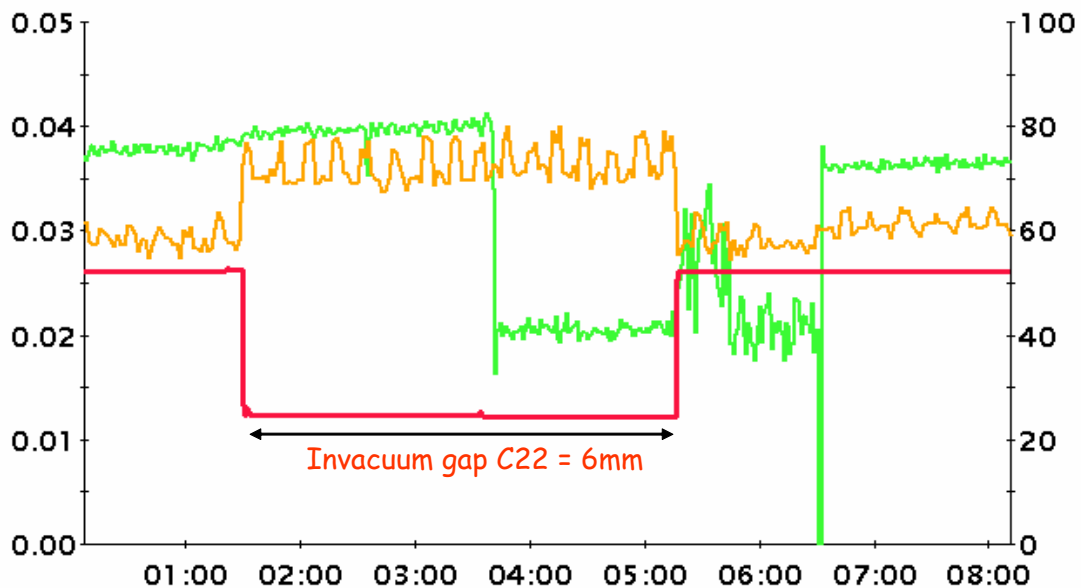


Figure 82 : exemple de chute de temps de vie suite à la fermeture d'un gap, qui révélera plus tard une anomalie à un autre endroit.

De manière générale, des outils très performant pour l'aide au diagnostic sont les détecteurs de perte de rayonnement. Dans le cas de la figure ci-dessus, la chute de temps de vie lors de la fermeture a permis de déceler un problème qui se passait ailleurs et qui a pu être localisé rapidement grâce aux détecteurs de perte :

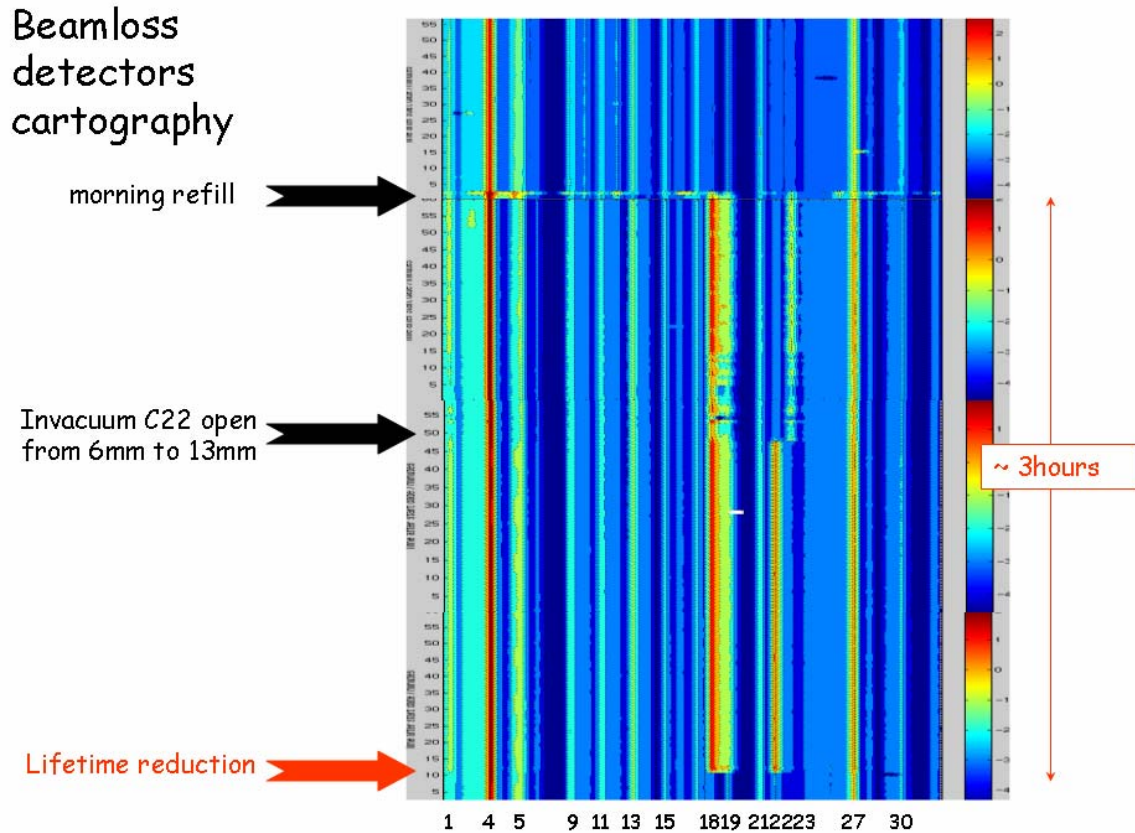


Figure 83 : exemple de pertes observées lors d'un accident de temps de vie

6.2.3 La stabilité du faisceau.

Presque aussi critique que la fiabilité du faisceau est la stabilité du faisceau. Ce critère de qualité est essentiel pour la majorité des utilisateurs.

Rappelons tout d'abord le niveau de tolérance qui a été défini lors de la construction des accélérateurs quant à la stabilité du faisceau.

Il a été convenu que le grossissement en émittance (emittance growth) ne devait pas dépasser 20 %, c-à-d, qu'on tolère 10 % de variation par rapport à la position du faisceau et 10 % par rapport à sa divergence.

Cela se représente aussi par la figure suivante :

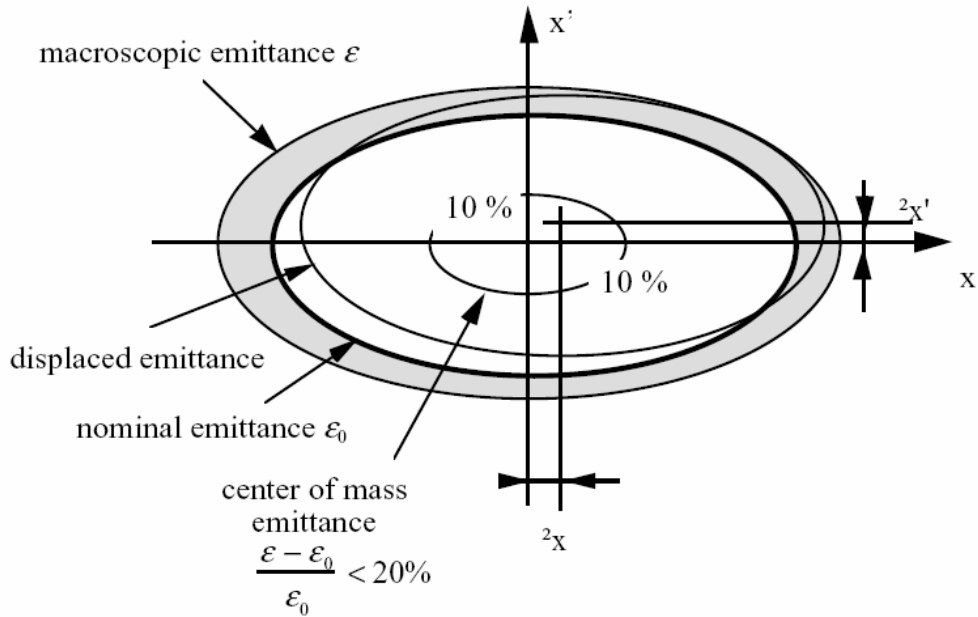


Figure 84 : visualisation du grossissement toléré par rapport au grossissement de base.

Connaissant les fonctions β aux différents points sources de l'anneau de stockage et l'émittance mesurée, on en déduit aisément les tailles de faisceau à ces endroits et donc, la tolérance acceptée.

Le tableau suivant résume les tolérances pour les sections high β , low β et pour chaque plan :

	<i>Horizontal</i>		<i>Vertical</i>
Emittances	4 nm		30 pm
β function	2.5	35	2.5
Beam size	45 μm	380 μm	9 μm
Required stability	4.5 μm	38 μm	0.9 μm

Tableau 4 : Déduction du critère de stabilité par rapport aux tailles faisceau dans 2 types de section différentes

La position du faisceau étant mesurée par 224 Beam Position Monitors répartis le long des 844 mètres de l'anneau de stockage, regardons d'emblée si ces critères sont respectés !

D'abord sur un **court terme**

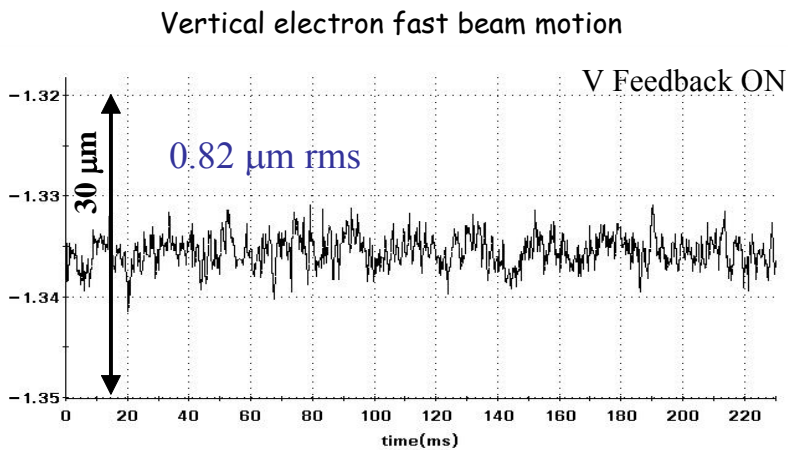
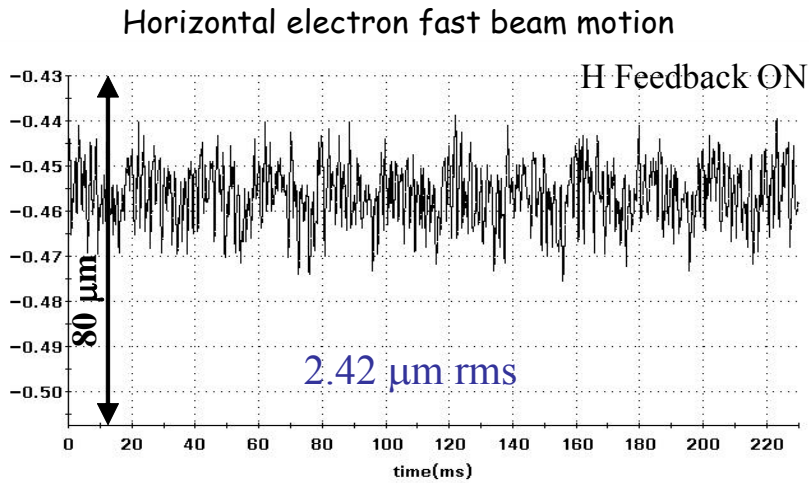
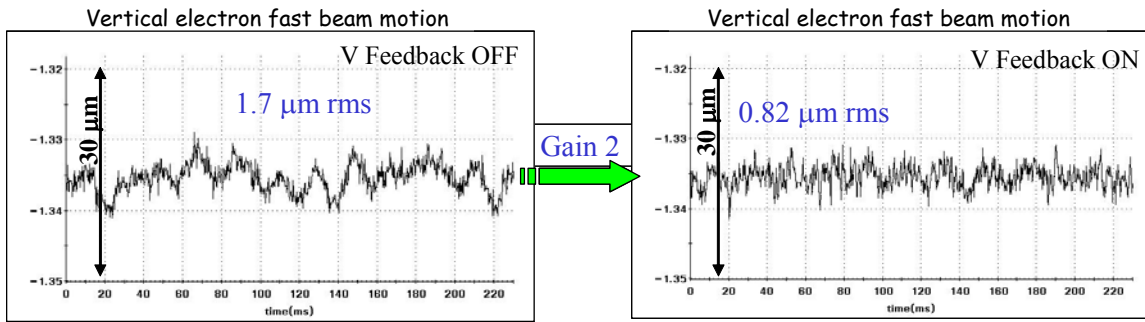


Figure 85 : stabilité observée sur du très court terme dans chaque plan.

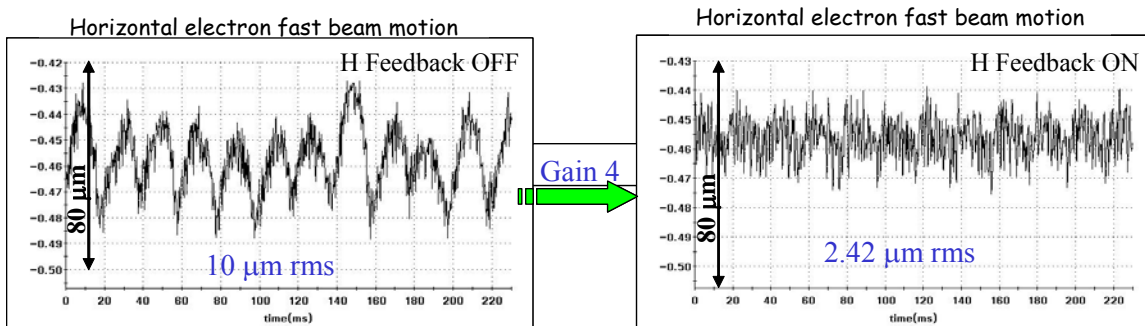
Grâce à un système de feedback agissant dans chaque plan, le critère est très largement respecté dans le plan horizontal et à la limite dans le plan vertical...

Ce feedback est constitué de 32 BPMs, 24 correcteurs corrigeant la position à une fréquence de 4.4 kHz ! Ce, sur une bande en fréquence allant de 0 à 150 Hz.

Dans le plan vertical, le feedback permet de gagner un facteur 2.



Dans le plan horizontal, le feedback permet de gagner un facteur 4



Sur le **moyen terme** ...

Citons d'abord les causes de dérives:

La stabilité du faisceau est essentiellement affectée par la variation de charge thermique due au changement d'intensité du faisceau pendant sa décroissance. Les chambres à vide subissent des contraintes thermiques et déplacent d'autant les quadrupôles.

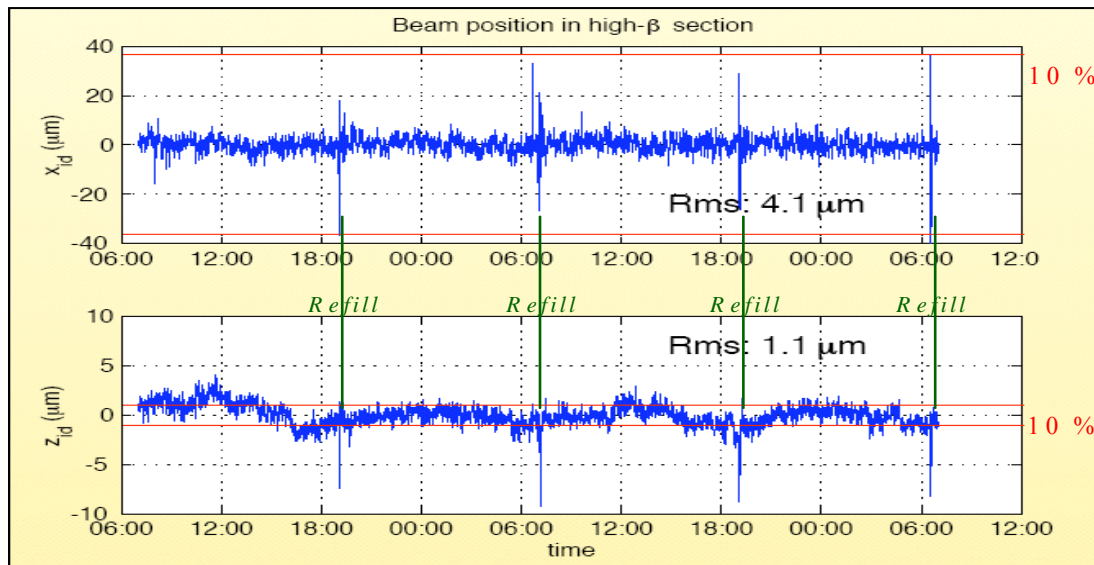
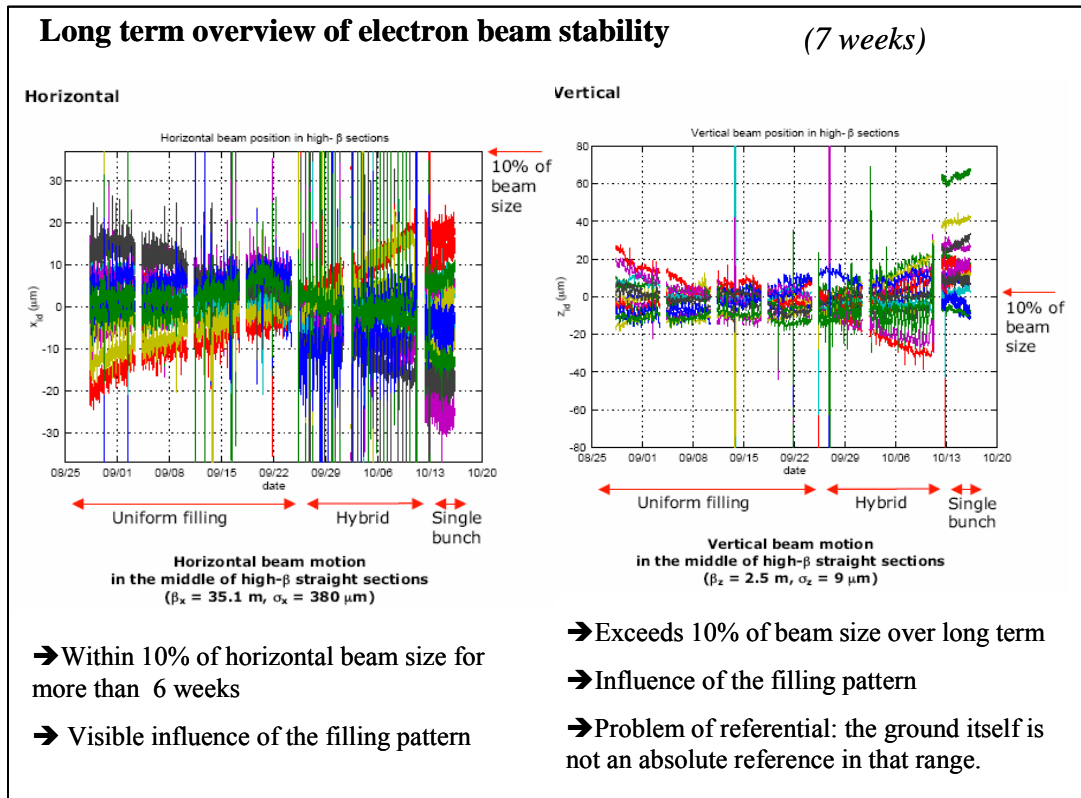


Figure 86 : stabilité observée sur du moyen terme (quelques heures)

Sur une durée de 2 jours, le critère est à nouveau largement respecté dans le plan horizontal et limite dans le plan vertical.

Pour corriger ces dérives, une correction automatique est appliquée toutes les 30 secondes (méthode SVD).

Sur un **long terme (plusieurs semaines)** :



Le critère est toujours respecté dans le plan horizontal mais plus dans le plan vertical. De plus, cela dépend essentiellement du mode de remplissage.

Le tableau suivant résume les variations réellement mesurées sur différentes périodes de temps.

	<i>Horizontal</i>	<i>Vertical</i>
10% Beam size	38 μm	0.9 μm
<i>One week</i>	11 μm	8 μm
<i>One day</i>	5 μm	2 μm
<i>One hour</i>	5 μm	2 μm
<i>One minute</i>	5 μm	2 μm
<i>One second</i>	2 μm	1 μm

On peut donc conclure que les dérives en position sont dominées par des mouvements très lents.

7 CONCLUSIONS

L'objectif a été de montrer que l'opération des accélérateurs au quotidien ne se définit pas de manière intrinsèque.

Elle est la conséquence de contraintes imposées par l'excellence de la recherche effectuée sur les accélérateurs.

De ces contraintes, découleront un cadre de travail pour l'opération au quotidien. Bien sûr, même si les contraintes sont respectées, on cherchera toujours à améliorer les performances.

L'objectif a également été de montrer que l'opération au quotidien n'est viable que si des tâches de fond – long terme – sont entreprises sans cesse pour améliorer la fiabilité des accélérateurs et les outils de diagnostic qui permettront d'anticiper les pannes au plus tôt.

Et finalement, ... même si le ciel nous tombe sur la tête :



.....

Les opérateurs sont toujours fidèles au poste !!



8 REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier très sincèrement tous les collègues de l'ESRF qui ont permis la réalisation de ce document.

Pour la relecture, l'aide à la traduction, le formatage de ce document et les très nombreuses corrections : Anne Dély, Philippa Gaget, Kirstin Colvin et les opérateurs de la salle de contrôle (ainsi qu'Isabelle Parat) qui ont eu la gentillesse de relire ce document et y ajouter des remarques et des corrections : G. Chazot, S. Chiappinelli, P. Henrissat, P. Jodar, B. Joly, B. Ledrappier, C. Niclas, M. Paulin et aussi P. Roussely.

Je suis très reconnaissant à Pascal Elleaume, Directeur de la Division Accélérateurs et Sources pour ses nombreuses suggestions qui ont apporté plus de clarté à ce cours.

Merci en particulier à Jean-Luc Revol qui m'a permis de reprendre de nombreux tableaux ou figures qu'il avait réalisés lui-même lors de présentations précédentes.

Merci également à toutes les personnes qui m'ont autorisées à prendre des parties de leur présentations / papiers ou qui m'ont transmis des informations / photos / utiles à la réalisation de ce document. En particulier :

Le Service Communication,
Le bureau d'Études,
Jean-Marc Filhol (The ESRF accelerator complex – formation donnée en 1994)

Paul Tafforeau
Jean-François Bouteille,
Jean-Marc Koch,
Eric Fené,
Philippe Falaise,
Pascal Eleaume,
Joel Chavanne,
Graham Naylor,
Kees Scheidt,
Eric Plouviez,
Laurent Farvacque,
Jean-Claude Biasci,
Philippe Duru
Philippe Roussely,
Jorn Jacob,
Jean-Maurice Mercier
Hervé Delamare,
Michael Hahn,
Isabelle Parat,

Une partie importante du chapitre 2.1 provient de Wikipedia.