

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL

Clermont-Ferrand

U.F.R. Sciences et Technologies

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE I.U.P. « GENIE DES SYSTEMES INDUSTRIELS »

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION
DU MASTER 2

Physique et Technologies des Rayonnements

MEDINA HUBERT

**ZBASE3 : LA NOUVELLE BASE DE DONNEES DE
L'IMPEDANCE DES ACCELERATEURS DU CERN.**

Date de soutenance : Jeudi 20 septembre 2007

Entreprise : CERN (GROUPE AB-ABP section LIS)

Remerciements

Ce stage a été réalisé au CERN dans le groupe AB-ABP section LIS, chargée d'étudier la dynamique des faisceaux de particules dans l'ensemble des accélérateurs du CERN.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Oliver S. BRUNING, chef du groupe AB-ABP, de m'avoir accueilli et permis d'effectuer mon stage de fin d'études au CERN. Je le remercie aussi de m'avoir consacré du temps pour me donner des informations sur ZBASE.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur Jean CASTOR et Monsieur Stéphane MAURY de m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce stage au CERN.

Je tiens particulièrement à remercier mon maître de stage, Monsieur Elias METRAL, de m'avoir encadré pendant ces cinq mois de stage. Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils avisés, sa pédagogie et sa bonne humeur. J'ai beaucoup appris en travaillant à ses côtés

Je remercie aussi Monsieur John JOWETT, pour son aide précieuse dans l'utilisation de *Mathematica*. Monsieur Benoît SALVANT pour sa disponibilité et son aide tout au long de mon stage. Monsieur Giovanni RUMOLO pour avoir modifié son programme HEADTAIL, pour lui permettre de lire en fichier d'entrée le fichier de sortie de ZBASE3

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Fabrice PODLYSKI, mon tuteur universitaire.

Enfin j'associe à ces remerciements mon camarade de bureau Simon WHITE ainsi que les norvégiens Paul LETNES et Yngve LEVINSEN qui m'ont permis de passer de bons moments au CERN.

Résumé de stage

Pendant mes cinq mois de stage au CERN, j'ai développé une nouvelle base de données de l'impédance des accélérateurs du CERN, appelée ZBASE3, en m'inspirant de celle créée par le passé (ZBASE).

ZBASE3 est une base de données programmée en langage Tcl/Tk donnant la possibilité de :

- calculer l'impédance transversale (horizontale et verticale) de paroi résistive,
- convertir une impédance en champ de sillage,
- convertir un champ de sillage en impédance,
- faire la somme des impédances et des champs de sillage.

Pour réaliser ces calculs, ZBASE3 est rattachée à des programmes écrits en *Mathematica*, permettant la réactualisation des valeurs d'impédance de paroi résistive d'un équipement dont certains paramètres auraient été modifiés. En particulier, l'impédance verticale totale du SPS due à ses nombreux kickers (20 en 2006) a été calculée, puis convertie en champ de sillage avant de servir de fichier d'entrée pour le code de simulation d'instabilité de paquet unique HEADTAIL. Le seuil d'instabilité obtenu avec ce dernier a été comparé à celui mesuré dans le passé ainsi qu'à celui obtenu à l'aide du programme MOSES.

Table des matières

Introduction	8
Contexte et objectifs du stage	8
1. Physique de l'impédance dans les accélérateurs	10
1.1. Dynamique transversale des faisceaux de particules.....	10
1.2. Les effets collectifs transversaux.....	13
1.3. Lien entre l'impédance et le champ de sillage (wakefield).....	14
2. Généralités	15
2.1. Le CERN.....	15
2.2. Les accélérateurs.....	15
2.3. Les détecteurs.....	16
3. Le Grand Collisionneur de Hadrons	17
3.1. Les aimants supraconducteurs du LHC.....	17
3.2. La chaîne d'injection du LHC.....	17
3.3. Les détecteurs du LHC.....	19
4. Le système de collimation du LHC	20
4.1. « Quench » des aimants supraconducteurs.....	20
4.2. Rôle du système de collimation.....	20
4.3. Conditions d'utilisation des collimateurs.....	21
4.4. Objectifs et contraintes des collimateurs.....	22
4.5. Description du système de collimation.....	23
4.6. Les sections de nettoyage du LHC.....	24
4.6.1. Disposition longitudinale des collimateurs.....	24
4.6.2. Localisation des collimateurs dans le LHC.....	25
4.6.3. Les différents types de collimateurs du LHC.....	26
5. Les kickers du SPS	27
5.1. La disposition de l'aimant kicker.....	27
5.2. Les techniques d'armatures ou de protections.....	28
5.3. L'insertion de bande en céramique.....	28

5.4.	L'application de bandes conductrices sur la ferrite	29
5.5.	Impédance dans le nouveau kicker d'extraction MKE	29
6.	ZBASE : Ancienne base de données de l'impédance	30
6.1.	ZBASE : Interface graphique de l'utilisateur	31
6.2.	ZBASE : Les différentes fonctionnalités	32
6.3.	TCL/TK : Langage utilisé pour programmer ZBASE	32
7.	ZBASE3 : La nouvelle base de données de l'impédance	33
7.1.	ZBASE3 : Fonctionnements de la base de données.....	34
7.1.1.	Le shell-script de ZBASE3	34
7.1.2.	Les différents répertoires de ZBASE3	34
7.1.3.	Création de nouveaux répertoires	35
7.1.4.	Ajout de fichiers d'entrée et de sortie dans les nouveaux répertoires.....	36
7.1.5.	Ajout de fichiers d'entrée dans la base de données	37
7.1.6.	Ajout de fichiers de sortie dans la base de données.....	38
7.1.7.	Ajout de fichiers de sommation dans la base de données.....	40
7.1.8.	Suppression d'un élément de la base de données	40
7.2.	ZBASE3 : Les différentes fonctionnalités	41
7.2.1.	Calcul de l'impédance.....	41
7.2.2.	Conversion de l'impédance en wakefield.....	43
7.2.3.	Conversion du wakefield en impédance	45
7.2.4.	Sommation de l'impédance ou du wakefield.....	46
7.2.5.	Visualisation de fichiers dans la base de données	47
7.3.	Les programmes de simulation d'instabilités de faisceau de paquet unique	48
7.3.1.	HEADTAIL : programme de simulation des instabilités dans un paquet unique de particules.....	48
7.3.2.	MOSES : programme de calcul d'instabilités de paquet unique de particules	49
	Conclusion et perspectives	50
	Bibliographie	51
	ANNEXE 1	52
	ANNEXE 2.....	54

Table des figures

Figure 1 : Système de coordonnées de Frenet-Serret utilisé pour décrire les trajectoires d'une particule.	11
Figure 2 : Chaîne d'injection du LHC.....	18
Figure 3 : Mesure de la température d'un collimateur en fonction de sa longueur et des matériaux qui le composent.	1
Figure 4 : Doigts radiofréquences (à gauche) et mâchoire d'un collimateur (à droite).	23
Figure 5 : Disposition des collimateurs pour un nettoyage de faisceau avant une collision à 7 TeV.	24
Figure 6 : Disposition longitudinal des collimateurs du LHC.	25
Figure 7 : Kicker MKE après assemblage des 7 cellules de ferrite (à gauche), coupe transversale d'un kicker MKE (à droite).	27
Figure 8 : Bandes de céramique (à gauche), disposées sur un kicker utilisé pour des tests de mesure (à droite).	28
Figure 9 : Impression de bandes métalliques sur les bloques de ferrite d'un kicker MKE.	29
Figure 10 : Résultats de mesures de l'impédance longitudinale réalisées sur une cellule de ferrite.	1
Figure 11 : Interface graphique du logiciel ZBASE.	31
Figure 12 : Interface graphique du programme ZBASE3.	33
Figure 13 : Organigramme de la base de données ZBASE3.	35
Figure 14 : Création de nouveaux répertoires par le programme ZBASE3.	36
Figure 15 : Interface graphique pour ajouter des fichiers d'entrée et de sortie.	36
Figure 16 : Interface graphique pour l'ajout de fichiers d'entrée dans la base de données.	37
Figure 17 : Fenêtre permettant la sélection des fichiers d'entrée.	37
Figure 18 : Fenêtre de confirmation du logiciel ZBASE3.	38
Figure 19 : Interface graphique pour l'ajout de fichiers de sortie dans la base de données.	38
Figure 20 : Interface graphique d'ajout de fichiers de sommation dans la base de données.	40
Figure 21 : Interface graphique de suppression d'un élément dans la base de données.	40
Figure 22 : Interface graphique dédiée aux calculs d'impédance.	41
Figure 23 : Exemple du fichier d'entrée DataMachine.dat pour la machine SPS.	41
Figure 24 : Exemple de fichier d'entrée pour un kicker du SPS.	42
Figure 25 : Table des valeurs (à gauche) et représentation graphique (à droite) de l'impédance du kicker MKE.41631 du SPS en 2007.	1
Figure 26 : Table des valeurs (à gauche) et représentation graphique (à droite) de l'impédance du collimateur TCDQA.4R6.B1 du LHC à top énergie en 2006.	43
Figure 27 : Interface graphique dédiée à la conversion de l'impédance en wakefield.	43
Figure 28 : Table des valeurs (à droite) et représentation graphique (à gauche) du champ de sillage du kicker MKE.41631 du SPS en 2007.	1
Figure 29 : Interface graphique dédiée à la conversion du wakefield à l'impédance.	45
Figure 30 : Interface graphique dédiée à la sommation de l'impédance ou du wakefield.	46
Figure 31 : Impédance totale des collimateurs du LHC à top énergie (à gauche) et des kicker du SPS en 2006 (à droite).	47
Figure 32 : Interface graphique dédiée à la visualisation des fichiers dans ZBASE3.	47
Figure 33 : Résultats avec le code de simulation HEADTAIL.	48

Figure 34 : Champ de sillage total des kickers en 2006 (courbe rouge continue) et fit en utilisant un résonateur (courbe noire pointillée). 49

Introduction

Contexte et objectifs du stage

Mon stage de fin d'étude a été réalisé au sein du groupe AB-ABP (Accélérateur and Beam Physics) du CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) où j'ai intégré la section LIS (LHC Injector & Synchrotrons).

Ce groupe est responsable de l'étude de la dynamique des faisceaux de l'ensemble des accélérateurs du CERN. Cette étude est importante dans le développement des accélérateurs du LHC (Large Hadron Collider) afin de prédire correctement les phénomènes physiques des accélérateurs. Un facteur important est à prendre en compte : **l'impédance**.

Dans un accélérateur une particule chargée est soumise à la force de Lorentz :

$$\vec{F}_{\text{ext}} = q (\vec{E}_{\text{ext}} + \vec{v} \times \vec{B}_{\text{ext}})$$

où q est la charge élémentaire, \vec{E}_{ext} est le champ électrique créé par les cavités radiofréquences pour accélérer la particule, \vec{v} la vitesse de la particule, et \vec{B}_{ext} le champ magnétique créé par les aimants dipôles et quadripôles pour guider la particule le long de l'orbite de design (= trajectoire idéale) et focaliser la particule autour de celle-ci.

Lorsqu'un faisceau de particules circule dans un accélérateur, l'interaction du faisceau avec son environnement crée un courant induit générant des champs électromagnétiques induits. Le faisceau est donc soumis à une nouvelle force induite parasite pouvant provoquer l'instabilité du faisceau, et limiter les performances de l'accélérateur.

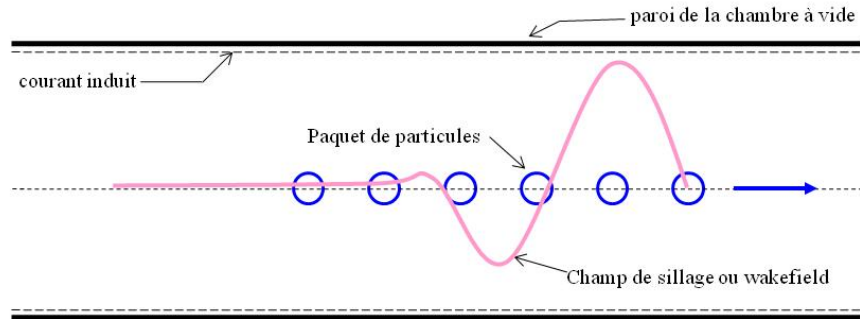
$$\vec{F}_{\text{induite}} = q (\vec{E}_{\text{induite}} + \vec{v} \times \vec{B}_{\text{induite}})$$

De cette force induite on peut déduire le champ de sillage (wakefield) :

$$W \propto F_{\text{induite}} \text{ en fonction du temps}$$

De cette force induite on peut déduire l'impédance :

$$Z \propto F_{\text{induite}} \text{ en fonction de la fréquence}$$



Des théories ont montré qu'une grande impédance est à prévoir lors de la mise en route du LHC, dans le LHC lui-même et son injecteur le SPS (Super Proton Synchrotron), en raison des :

- **9 kickers d'extraction du SPS** : aimants nécessaires pour extraire le faisceau du SPS au LHC, portant le nombre total des kickers dans le SPS à 20 en 2006.
- **44 collimateurs du LHC** : blocs de graphite utilisés pour la protection des aimants supraconducteurs du LHC.

Dans les années 90s, ZBASE a été créé permettant le calcul et le stockage des données d'impédance pour les accélérateurs du LEP (Large Electron Positron) du CERN. Il est constitué d'une base de données reliée à des programmes de calculs électromagnétiques et de simulation de dynamique des faisceaux. ZBASE n'a pas été utilisé pendant une longue période et certaines de ses applications n'ont pas été mises à jours, le laissant avec de multiples erreurs.

Au terme de l'installation du LHC, la question de l'impédance reste un problème majeur. La réactualisation de ZBASE est une étape indispensable.

Mon stage s'inscrit dans la détermination du groupe AB-ABP à développer une base de données fiable permettant l'étude de l'impédance. Ce nouveau programme se doit d'être :

- simple d'utilisation avec une interface graphique conviviale,
- relié à des logiciels permettant un calcul d'impédance et de wakefield rigoureux,
- une base de données évolutive permettant sa réactualisation.

ZBASE3, successeur de ZBASE a été créé. Sa réalisation repose sur :

- **La prise en main** de Tcl/Tk, langage utilisé pour le développement de ZBASE.
- **L'analyse** des principes de fonctionnement de ZBASE.
- **La prise en main** de *Mathematica*, logiciel permettant le calcul de l'impédance.

Ce rapport se divise en sept parties :

- La première partie explique brièvement le concept d'impédance dans un accélérateur de particules.
- La deuxième partie présente les généralités sur le CERN, les accélérateurs et les détecteurs.

- La troisième partie explique le fonctionnement du LHC et les différentes expériences effectuées.
- La quatrième partie détaille le système de collimation du LHC.
- La cinquième partie présente le fonctionnement des kickers dédiés à l'extraction du faisceau du SPS au LHC.
- La sixième partie expose le fonctionnement de l'ancienne base de données ZBASE.
- Enfin, la septième partie explique le fonctionnement des applications de la nouvelle base de données ZBASE3.

1. Physique de l'impédance dans les accélérateurs

Le calcul de l'impédance dans les accélérateurs étant un calcul complexe très spécifique, seules les formules importantes pour déterminer l'impédance transversale sont développées dans ce chapitre.

1.1. Dynamique transversale des faisceaux de particules

Une particule chargée dans un accélérateur est soumise à deux forces [1] : la force électrique \vec{E} , et la force magnétique \vec{B} .

Pour décrire le mouvement d'une particule, on utilise le système de coordonnées de Frenet-Serret : $[\vec{e}_x(s), \vec{e}_y, \vec{e}_z(s)]$ (voir Fig.1), s étant la coordonnée azimutale de la particule. Il s'agit d'un repère local associé à une particule décrivant une courbe. Ce repère permet de suivre la trajectoire idéale appelée « l'orbite de design » (= trajectoire idéale) d'une particule.

Le mouvement d'une particule chargée dans un accélérateur est calculé par l'équation de la Force de Lorentz avec la formule suivante :

$$\vec{F} = e \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right), \quad (1)$$

où \vec{F} est la force électromagnétique ou force de Lorentz (en newton), e est la charge de la particule (en coulomb), \vec{E} est le champ électrique (en volt par mètre), \vec{v} la vitesse de la particule (en mètre par seconde), et \vec{B} le champ magnétique (en tesla).

Le champ électrique \vec{E} accélère la particule chargée et agit sur la dynamique longitudinale du faisceau de particule définie sur l'axe e_z (voir Fig.1).

Le champ magnétique \vec{B} dévie la particule chargée et agit sur la dynamique transversale du faisceau de particule définie par le plan (e_x, e_y) (voir Fig.1).

La force magnétique est utilisée comme :

- force de courbure guidant les particules le long de la trajectoire idéale « orbite de design ».
- force de focalisation des particules à proximité de la trajectoire idéale, d'où les particules sont inévitablement déviées.

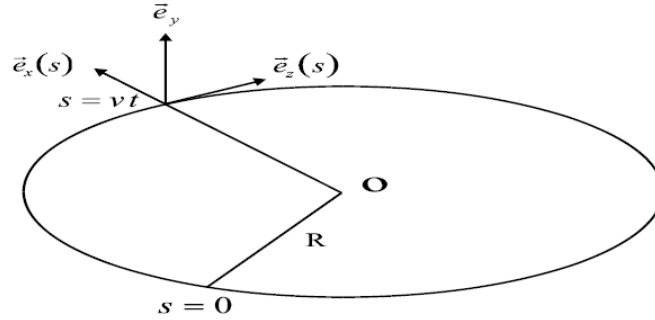


Figure 1 : Système de coordonnées de Frenet-Serret utilisé pour décrire les trajectoires d'une particule.

La trajectoire d'une particule d'énergie constante soumise à la force magnétique centripète et la force centrifuge est un cercle de rayon de courbure ρ décrit par l'équation suivante

$$B \rho [\text{T m}] = 3.3356 p_0 [\text{GeV} / c]. \quad (2)$$

où B est l'induction magnétique (en tesla), ρ est le rayon de courbure (en mètre), et p_0 est la quantité de mouvement de la particule (en GeV/c).

Considérons le mouvement d'une particule sur le plan horizontal (la même analyse peut être appliquée sur le plan vertical). L'équation de mouvement linéaire horizontal d'une particule de quantité de mouvement p_0 , de fréquence angulaire Ω_0 , de rayon orbital R , et de coordonnée azimutale $s=R\Omega_0 t$ est donnée par la formule suivante

$$x'' + K_x(s) x = 0, \quad (3)$$

où x'' est la dérivée seconde de la coordonnée horizontale en fonction de s , $K_x(s)$ est un coefficient intégrant les forces de courbure et de focalisation périodique

$$K_x(s + C) = K_x(s), \quad (4)$$

où C est la circonférence avec $C = 2\pi R$.

L'Eq. (3) est appelé équation de Hill. La solution de l'équation de Hill est une oscillation pseudo-harmonique qui varie en amplitude et en fréquence, appelée « oscillation bêtatronique »

$$x(s) = a_x \beta_x^{1/2}(s) \cos[\mu_x(s) + \varphi_x], \quad (5)$$

où $\beta_x(s)$ est appelé fonction bêtatronique et $\mu_x(s)$ est la phase bêtatronique (a_x et φ_x étant des constantes).

La fonction bêatronique $\beta_x(s)$ est solution de l'équation différentielle suivante

$$\frac{1}{2}\beta_x \beta_x'' - \frac{1}{4}\beta_x'^2 + K_x(s)\beta_x^2 = 1. \quad (6)$$

Le nombre d'oscillations bêatroniques effectuées par une particule en un tour d'accélérateur est le nombre d'onde Q_x . Il est calculé par

$$Q_x = \frac{1}{2\pi} \int_0^c \frac{ds}{\beta_x(s)}. \quad (7)$$

Pour notre étude la fonction bêatronique Eq. (6) peut être approximée par une constante

$$\beta_x(s) \approx \bar{\beta}_x. \quad (8)$$

Les Eqs. (7) et (6) peuvent alors s'écrire de la façon suivante

$$\bar{\beta}_x \approx \frac{R}{Q_x}, \quad K_x(s) \approx \frac{1}{\bar{\beta}_x^2}. \quad (9)$$

Ainsi, l'équation de Hill Eq. (3) peut s'écrire en fonction du temps

$$\ddot{x} + Q_x^2 \Omega_0^2 x = 0. \quad (10)$$

où \ddot{x} est la dérivée seconde par rapport au temps. L'Eq. (10) décrit alors le mouvement d'un oscillateur harmonique.

1.2. Les effets collectifs transversaux

Dans l'équation du mouvement d'un faisceau dégroupé (c'est-à-dire que l'on considère seulement la dynamique transversale du faisceau), trois forces sont prises en compte pour décrire le mouvement bêtatronique horizontal (respectivement vertical) d'une particule :

- 1) **Les forces de focalisation externes** qui dépendent de la déviation horizontale x de la particule par rapport à une référence fixe (c'est-à-dire le centre de la chambre à vide). Le nombre d'ondes correspondant est Q_x et l'équation est donnée par Eq. (10).
- 2) **Les forces cohérente** qui dépendent de la déviation \bar{x} du centre du faisceau par rapport au centre de la chambre. Le déplacement du nombre d'ondes correspondant est $\Delta Q_{coh,x}$;
- 3) **Les forces incohérente** qui dépendent de la déviation $x - \bar{x}$ de la particule par rapport au centre de la chambre. Le déplacement du nombre d'ondes correspondant est $\Delta Q_{inc,x}$;

La prise en compte de ces trois forces permet d'étendre l'Eq. (10) à l'équation suivante

$$\ddot{x} + \Omega_0^2 \left(Q_x^2 + 2Q_x \Delta Q_{inc,x} \right) x = -2\Omega_0^2 Q_x \left(\Delta Q_{coh,x} - \Delta Q_{inc,x} \right) \bar{x}. \quad (11)$$

Dans l'Eq. (11) tous les termes donnés par le mouvement du centre du faisceau \bar{x} sont combinés dans le terme de droite de cette équation.

L'impédance de couplage horizontale s'écrit en fonction des forces cohérente $\Delta Q_{coh,x}$ et incohérente $\Delta Q_{inc,x}$ [2,3] :

$$Z_x(\omega) = \alpha \int_0^{2\pi R} F_x ds = \alpha -2\Omega_0^2 Q_x (\Delta Q_{coh,x} - \Delta Q_{inc,x}). \quad (12)$$

Une dérivation de l'impédance de paroi résistive d'une chambre à vide infiniment longue et composée de plusieurs couches concentriques est présentée en Réf. [4].

1.3. Lien entre l'impédance et le champ de sillage (wakefield)

Comme la conductivité, la constante diélectrique et la perméabilité d'un matériau dépendent en général de la fréquence, il est habituellement plus facile de traiter ce problème dans le domaine de fréquences. Mais pour les programmes de simulation de dynamique de faisceau il est plus facile de traiter ce problème dans le domaine du temps, on parle alors de **champ de sillage** (= **wakefield**). Le lien entre l'impédance et le champ de sillage (horizontal, par exemple) est le suivant (transformée de Fourier inverse)

$$W_x(t) = -\frac{j}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Z_x(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (13)$$

avec la condition de causalité $W_x(t) = 0$ pour $t \leq 0$ (c'est-à-dire devant le paquet, ultra-relativiste, il n'y a pas de champ de sillage) le passage entre le champ de sillage (wakefield) et l'impédance se fait à l'aide cette fois-ci de la transformée de Fourier

$$Z_x(\omega) = j \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (14)$$

Les impédances ont la particularité d'avoir une partie réelle impaire et une partie imaginaire paire. Les Eqs. (13) et (14) peuvent donc être réécrites (et c'est ainsi qu'elles sont programmées de les fichiers *Mathematica*)

$$W_x(t) = -\frac{j}{2\pi} \left\{ \int_{-\infty}^0 \{-\operatorname{Re}[Z_x(-\omega)] + j \operatorname{Im}[Z_x(-\omega)]\} e^{j\omega t} d\omega + \int_0^{+\infty} \{\operatorname{Re}[Z_x(\omega)] + j \operatorname{Im}[Z_x(\omega)]\} e^{j\omega t} d\omega \right\}, \quad (15)$$

$$Z_y(\omega) = j \int_0^{+\infty} W_y(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (16)$$

2. Généralités

2.1. Le CERN

Vers la fin des années 1940, suite à la seconde guerre mondiale, l'Europe fut confrontée à une fuite des cerveaux vers les Etats-Unis où les scientifiques européens purent bénéficier de meilleures conditions de travail pour conduire leurs recherches. Ainsi, pour arrêter cette fuite de cerveaux, le CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire) fut fondé en 1954 et comptait 12 Etats membres [5].

Aujourd'hui, le CERN est devenu un exemple éclatant de collaboration internationale comptant 20 Etats membres : Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse.

Les 20 Etats membres ont des devoirs et des privilèges spéciaux :

- Ils contribuent au budget et aux frais de fonctionnement des programmes du CERN.
- Ils sont représentés au Conseil et prennent part aux décisions concernant l'Organisation et les activités du CERN.

Certains états ne pouvant pas devenir membre, ont un statut d'observateur. Ce statut permet aux Etats non membres d'assister aux réunions du Conseil, sans prendre part aux décisions de l'organisation.

Des scientifiques de 220 instituts et universités d'états non membres utilisent également les installations du CERN. Ces universités sont responsables du financement, de la réalisation et de la mise en œuvre des expériences auxquelles ils collaborent.

Le CERN a donc été fondé grâce aux efforts conjoints de 12 états européens, donnant la chance à chacun des pays de pouvoir participer aux expériences de physique les plus avancées du monde, sans dépenser une part importante de leur budget dans la recherche scientifique.

Au delà d'innover en repoussant les frontières de la technologie et de l'ingénierie, le CERN a un rôle de formation des jeunes scientifiques et des ingénieurs de demain.

2.2. Les accélérateurs

Pour étudier l'infiniment petit, les scientifiques ont besoin d'accélérateur de particules. Ceux-ci amènent les particules à des énergies élevées avant de les précipiter sur une cible ou sur d'autres particules. Au niveau de ces points de collision les scientifiques montent leurs expériences et détecteurs pour observer et étudier l'infiniment petit.

Grâce aux collisions de particules à haute énergie, les physiciens peuvent étudier leurs compositions et créer de nouvelles particules, révélant ainsi la réelle nature de leurs interactions.

La disposition et les paramètres des accélérateurs peuvent changer en fonction de leur utilisation, mais leurs fonctionnements reposent sur des principes fondamentaux communs. Des particules chargées sont accélérées par un champ radiofréquence fournissant l'énergie nécessaire pour les amener à l'énergie désirée. Par l'intermédiaire d'aimants (appelés dipôles), un champ magnétique est appliqué sur ces particules afin d'assurer une trajectoire circulaire au faisceau. D'autres aimants (appelés quadripôles) sont utilisés pour garantir la focalisation du faisceau dans les accélérateurs. Ces particules doivent se déplacer dans une chambre à vide afin d'éviter tout risque de collision entre un gaz ou des molécules, entraînant une perte de focalisation et un risque de perte du faisceau.

D'autres éléments sont aussi indispensables pour le fonctionnement d'un accélérateur :

- des aimants affinant la trajectoire ou la focalisation,
- des éléments d'injection ou d'éjection du faisceau pour le passage d'un accélérateur à un autre,
- des appareils de mesure procurant aux opérateurs des informations sur le comportement du faisceau,
- des éléments de sécurité.

2.3. Les détecteurs

Les accélérateurs sont utilisés pour faire interagir les particules les unes contre les autres dans le but de révéler leur structure interne. L'énergie de ces collisions est utilisée pour « créer » de nouvelles particules. Les physiciens ont besoin d'instruments sensibles appelés détecteurs pour les observer. Ces détecteurs sont formés de différents types d'équipements, dont chacun est capable de reconnaître et de mesurer les différentes propriétés des particules, tels que la charge, la masse et l'énergie.

Les détecteurs utilisés par les physiciens sont :

- Les chambres à traces : elles sont utilisées pour visualiser le parcours des particules afin de connaître leur masse et de déterminer leur impulsion (quantité de mouvement égale au produit de la masse par la vitesse).
- Les calorimètres : ils mesurent l'énergie perdue par la ou les particules qui les traversent. Ils sont généralement conçus pour absorber la plupart des particules créées lors d'une collision.
- Les détecteurs de muons : Les muons interagissent très peu avec la matière et peuvent donc passer inaperçus à travers les calorimètres. Ces détecteurs sont constitués d'une chambre remplie d'un gaz détectant le passage de particules chargées.

3. Le Grand Collisionneur de Hadrons

Pour la recherche en physique des particules, disposer de niveaux d'énergie plus élevés est un facteur-clé, pour déterminer l'origine de la masse des particules et établir si les neutrinos sont réellement dépourvus de masse.

Le Grand Collisionneur de Hadrons est un accélérateur de particules qui sondera la matière plus profondément que jamais. Avec une circonférence d'environ 27 km, il est à ce jour le plus grand accélérateur du monde. Dans le LHC, deux faisceaux de protons de 7 TeV chacun entreront en collision, produisant une énergie disponible (pour créer de nouvelles particules) dans le centre de masse de 14 TeV. Des faisceaux de noyaux de plomb seront également accélérés pour entrer en collision à une énergie de 1150 TeV (dans le centre de masse).

3.1. Les aimants supraconducteurs du LHC

Le fonctionnement du LHC ne peut se faire sans l'utilisation de la supraconductivité. En effet, maintenir les faisceaux du LHC en orbite requiert des champs magnétiques d'une grande intensité. Seule la supraconductivité permet de créer de tels champs magnétiques.

La supraconductivité est la capacité de certains matériaux (à très basse température) à conduire l'électricité sans aucune résistance ou perte d'énergie. Le LHC fonctionnera à 1,9°K (c'est-à-dire à environ -271° Celsius), ce qui fera de lui la plus grande installation supraconductrice du monde.

Les principaux éléments magnétiques supraconducteurs présents dans le LHC sont les dipôles et les quadripôles. Ceux-ci auront la particularité de pouvoir faire circuler dans un sens opposé les deux faisceaux de protons. Ces aimants seront refroidis à l'aide d'Hélium superfluide porté à une température de 1,9°K.

3.2. La chaîne d'injection du LHC

La ligne d'injection du LHC est composée de plusieurs éléments. Tout d'abord, les protons de 90 KeV (énergie cinétique) sont produits par une source appelée duoplasmatron. Ceux-ci sont accélérés par un accélérateur linéaire (LINAC) pour atteindre une énergie cinétique de 50 MeV. Pour être portés à une énergie de 1,4 GeV, les protons sont injectés dans un accélérateur circulaire (Proton Synchrotron Booster). Les protons sont ensuite amenés à l'énergie d'injection du LHC (450 GeV/c), par deux accélérateurs circulaires. Le PS (Proton Synchrotron) accélérant les protons jusqu'à 26 GeV/c puis le SPS (Super Proton Synchrotron) permettant d'atteindre l'énergie d'injection du LHC. Enfin, le LHC accélérera le faisceau de protons de 450 GeV/c à 7 TeV/c. Toutes ces étapes sont reliées par des lignes de transfert pour passer d'un accélérateur à un autre (voir Fig.2).

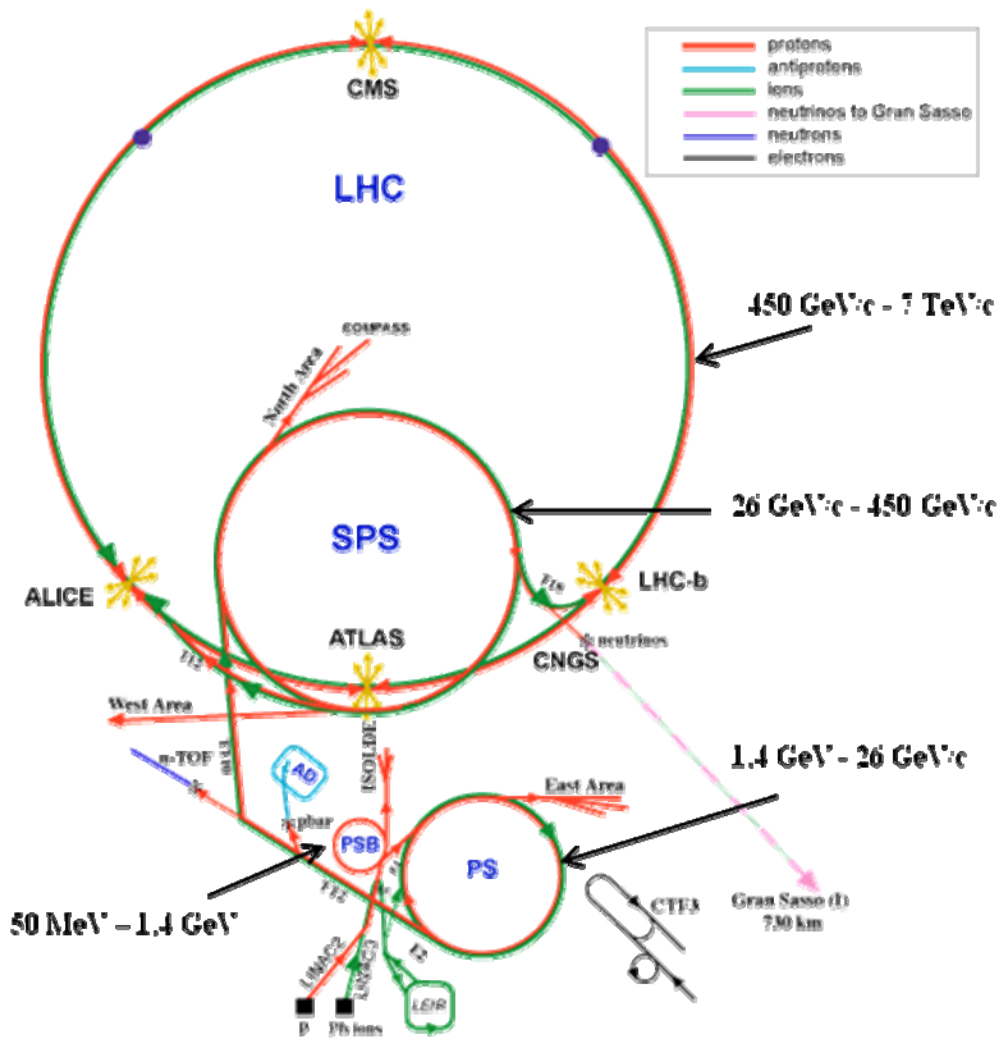
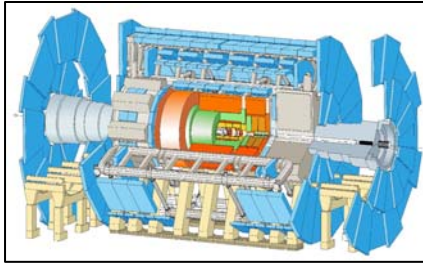


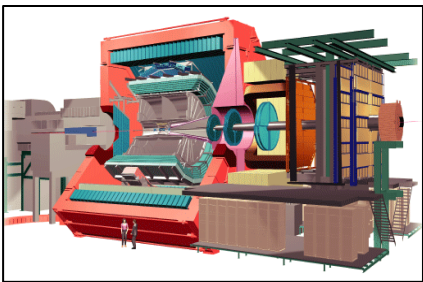
Figure 2 : Chaîne d'injection du LHC.

3.3. Les détecteurs du LHC

Les deux faisceaux de protons tourneront dans des directions opposées à l'intérieur de deux gaines à ultra-vide se croisant à quatre emplacements. C'est au niveau de ces points d'intersection que les détecteurs des expériences, ATLAS, ALICE, CMS, et LHCb observeront les collisions.



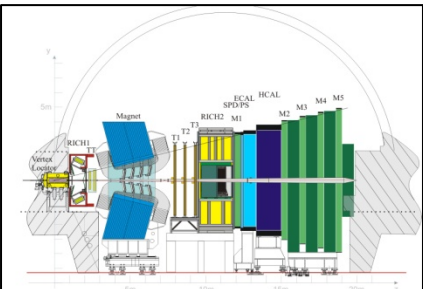
Le détecteur **ATLAS** est destiné à explorer de nouveaux domaines de la physique fondamentale des particules. Ce détecteur combine les dernières technologies dans différents secteurs, allant des micros-détecteurs, aux traitements de données ultra-rapides, jusqu'au plus grand aimant supra conducteur jamais construit. L'expérience ATLAS mesurera l'énergie des particules créées lors des collisions entre les protons du LHC [6].



ALICE est un détecteur consacré aux ions lourds afin d'exploiter le potentiel unique de la physique des interactions noyaux-noyaux. Le but d'ALICE est d'étudier la matière à de très fortes densités d'énergie, où la formation d'une nouvelle phase de matière (le plasma de quark-gluon) est prévue. Ensuite, ALICE sera utilisé pour une étude plus complète des hadrons, des électrons, des muons et des photons issus de la collision des noyaux lourds [7].



CMS (Compact Muon Solenoid : solénoïde compact à muons) est un détecteur de particules qui aura pour but de découvrir le boson de Higgs ainsi que différentes particules supersymétriques. Toutes ces particules sont prédites par différentes théories, mais n'ont jamais été observées expérimentalement à ce jour [8].



[9].

LHCb est destiné à l'étude de la violation de CP (C = charge, P = parité) et à la recherche de désintégrations rares pouvant faire ressortir une nouvelle physique dans le secteur du quark « beauté ». L'analyse des données portera largement sur les mésons beaux (contenant un quark b ou un anti-quark b). LHCb se distingue par l'utilisation de deux détecteurs RICH (détecteur de rayonnement Tchénkov) pouvant séparer les pions, les kaons et les protons de certaines désintégrations

4. Le système de collimation du LHC

4.1. « Quench » des aimants supraconducteurs

Les faisceaux du LHC vont être accélérés à une énergie de 7 TeV/c par les cavités radiofréquences. Pour dévier la trajectoire du faisceau de proton d'une énergie de 7 TeV/c, les dipôles du LHC doivent fournir un champ magnétique nominal de 8,33 Tesla car d'après l'Eq. (2) et le Tableau 1 :

$$B\rho [Tm] = 9,956 p_0 [GeV/c] \quad (2)$$

	LEP	LHC
ρ (m)	3096,175	2803,95
p_0 (GeV/c)	104	7000
B (T)	0,11	8,33

Table 1 : Comparaisons des caractéristiques entre le LEP et le LHC.

Pour obtenir un tel champ magnétique, le fonctionnement des dipôles doit se faire à des températures cryogéniques de 1,8 K et 4,5 K. Chaque aimant supraconducteur est alors particulièrement sensible à la moindre source de chaleur. A un certain niveau d'échauffement de l'aimant, les câbles de courant perdent leurs propriétés de supraconductivité et redeviennent résistants. Ce changement d'état est alors appelé « quench » [10].

Le LHC a été conçu pour conférer une stabilité maximale à chacun des deux faisceaux de protons. Les protons peuvent être conservés pendant plusieurs heures. Cependant, même dans ces conditions, si des protons venaient à être perdus dans l'un des aimants supraconducteurs, le dépôt d'énergie occasionné serait toujours suffisant pour provoquer un quench et par conséquent, induire l'arrêt de la machine.

Dans le LHC, le niveau des pertes de faisceau dans les aimants supraconducteurs doit être infime. Un système de collimation du faisceau est donc obligatoire afin de réduire le niveau de pertes protoniques qui auront nécessairement lieu au cours des opérations de la machine.

4.2. Rôle du système de collimation

La collimation du faisceau dans le cadre du LHC doit remplir plusieurs objectifs :

- Empêcher tout quench d'aimant supraconducteur pendant l'utilisation de la machine,
- Protéger tous les éléments de l'anneau contre les pertes de faisceau, qu'elles soient propres au fonctionnement de la machine ou accidentelles,
- Permettre un certain niveau de contrôle sur le bruit de fond dans les détecteurs.
- Limiter le niveau de radiation reçu par les divers équipements électroniques et magnétiques de la machine.

La collimation de faisceau dans les accélérateurs circulaires est généralement réalisée par un système mécanique. Ce système est composé de plusieurs blocs de matière placés entre le faisceau et l'ouverture géométrique de la machine afin d'intercepter les pertes du faisceau. Ces blocs de matière sont communément appelés des collimateurs.

La distance entre la surface des mâchoires et le centre du faisceau est appelée la demi ouverture des collimateurs (collimator half-opening). Un collimateur peut être constitué d'une seule ou de deux mâchoires (c'est le cas du LHC). Le matériel sélectionné pour un collimateur doit être suffisamment robuste pour résister à toutes les contraintes listées ci-dessus, sans pour autant affecter les conditions normales des opérations.

4.3. Conditions d'utilisation des collimateurs

Produire un faisceau de haute énergie sans que celui-ci détériore les éléments supraconducteurs de la machine, impose lors de la conception du système de collimation à respecter des conditions très précises :

- les mâchoires des collimateurs doivent être solides pour résister aux impacts de faisceaux dont l'énergie peut aller jusqu'à 360 MJ,
- le système doit avoir une grande efficacité de nettoyage du faisceau,
- la surface des collimateurs faisant face au faisceau de protons doit être uniformément plate (écart accepté entre 10-25 μm),
- le choix de la matière pour les collimateurs doit être pris en compte en fonction du facteur d'impédance,
- le système de collimation pouvant atteindre un niveau de radiation élevé, la manipulation des collimateurs doit être faite à distance.

Le choix d'un matériel lourd (Z très élevé) pour les collimateurs absorbe le faisceau facilement, mais induit une forte radiation endommageant les équipements alentours. A l'opposé, le choix d'un matériel avec un Z faible, réduit considérablement la dose, mais est très peu efficace pour la protection du matériel.

4.4. Objectifs et contraintes des collimateurs

La conception du système de collimation fait face à de nombreuses contraintes pour être réellement efficace. Le rôle principal d'un collimateur est d'éliminer les pertes du faisceau de protons pouvant induire le quench des aimants supraconducteurs. Un collimateur doit être composé d'un élément répondant aux trois critères suivants :

- 1) une grande solidité pour résister aux impacts du faisceau,
- 2) un bon pourcentage d'absorption pour un nettoyage efficace,
- 3) une grande conductivité électrique pour réduire l'impédance.

Malheureusement, ces trois conditions ne peuvent pas être remplies par une seule matière. Une matière robuste (ex : graphite) est un trop mauvais conducteur et obligerait le LHC à fonctionner avec une intensité faible et/ou une taille de faisceau large. D'un autre côté, une matière conductrice (ex : cuivre) serait très vite endommagée, après seulement quelques heures d'utilisation, entraînant une chute significative de l'efficacité de nettoyage.

Pour déterminer une matière adaptée aux collimateurs, différents cas d'accidents de pertes de faisceau ont été simulés. Ces simulations ont montré que les matériaux les plus appropriés à résister aux très hautes températures sont le béryllium et le graphite (voir Fig.3). D'autres calculs basés sur des scénarios de pertes de faisceaux ont montré que le graphite est dix fois plus solide que le béryllium.

Cependant, avec le graphite, l'impédance demeure une question non résolue, mais des solutions existent pour répondre à ce problème. Ces solutions sont détaillées dans le paragraphe suivant.

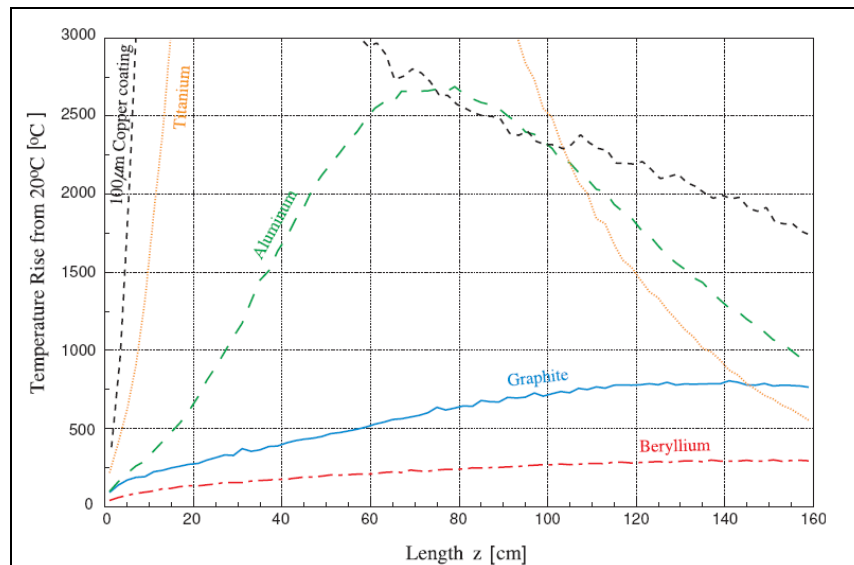


Figure 3 : Mesure de la température d'un collimateur en fonction de sa longueur et des matériaux qui le composent.

4.5. Description du système de collimation

La création d'un courant induit peut causer un risque d'échauffement s'élevant de 240 W/m à l'injection à 1000 W/m à l'énergie de collision. Une fine couche de cuivre déposée sur la surface en graphite des collimateurs permettrait d'abaisser l'échauffement à 8 W/m à l'injection et à 32 W/m à l'énergie de collision, mais cette solution n'a pas été retenue pour l'instant.

Les mâchoires se déplacent en fonction de la taille du faisceau. Il est donc obligatoire d'assurer le contact radiofréquence avec les chambres à vides de chaque côté des collimateurs, tout en évitant l'augmentation de l'impédance. Ceci est rendu possible par l'ajout de « doigts » en cuivre aux deux extrémités du collimateur. Pour minimiser l'impédance due aux changements de géométrie un « tapering » (angle effilant) est introduit à l'extrémité de chaque collimateur (voir Fig.4).

Dans le cas du LHC, la longueur des collimateurs primaires est de 60 cm tandis que les mâchoires secondaires mesurent 1m. Le but des mâchoires secondaires est d'absorber le halo de protons issu de la collimation primaire.

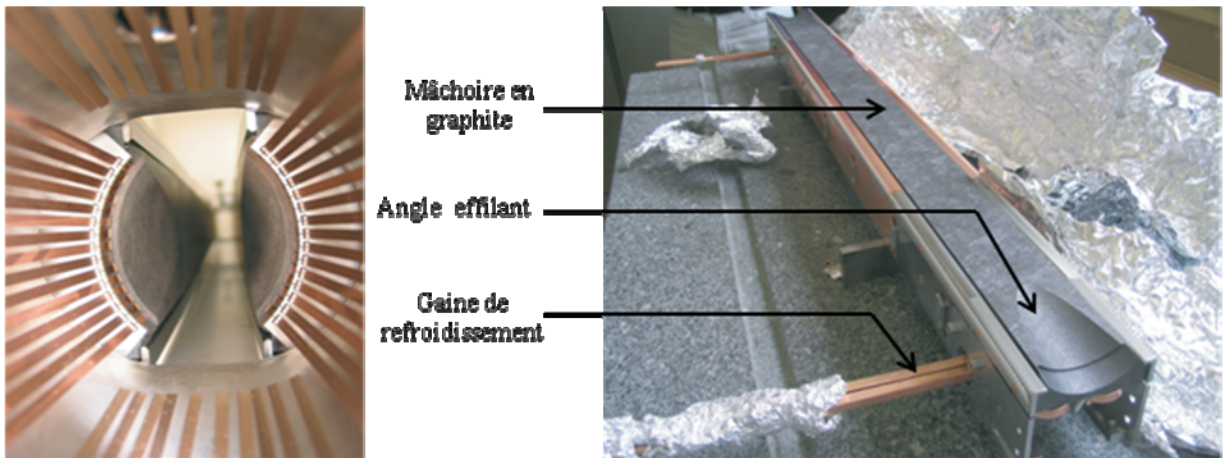


Figure 4 : Doigts radiofréquences (à gauche) et mâchoire d'un collimateur (à droite).

4.6. Les sections de nettoyage du LHC

Deux sections de droites, aussi appelées insertions de nettoyage, sont consacrées à la collimation dans l'anneau du LHC. La disposition des insertions de nettoyage doit être conforme à plusieurs contraintes de conception.

4.6.1. Disposition longitudinale des collimateurs

Le système de collimation du LHC est conçu comme un système à plusieurs étages (voir Fig.5) :

- les collimateurs primaires interceptent le premier halo de faisceau, et génèrent un second halo de protons,
- ce halo de protons secondaire est absorbé par les mâchoires secondaires créant aussi un halo de protons tertiaire,
- le halo tertiaire est, soit arrêté par les absorbeurs, soit perdu dans l'ouverture froide (cold aperture) de la machine. Idéalement, le nombre de protons dans le halo tertiaire doit être faible pour éviter tout risque de « quench » des aimants supraconducteurs.

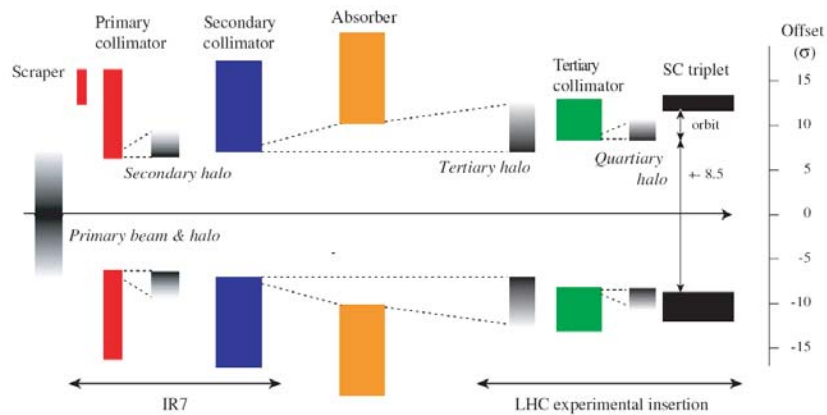


Figure 5 : Disposition des collimateurs pour un nettoyage de faisceau avant une collision à 7 TeV.

4.6.2. Localisation des collimateurs dans le LHC

Le nombre et la disposition des collimateurs ont été optimisés afin d'assurer la plus grande protection possible. La position des collimateurs a été étudiée en fonction des valeurs de la fonction β , afin d'obtenir une grande ouverture réduisant le problème d'impédance. Les collimateurs sont placés dans les régions non supraconductrices (c.à.d. régions chaudes) et en amont de chaque dipôle chauds (ayant une conduction normale) (voir Fig.6).

En effet, les aimants chauds peuvent mieux tolérer les pertes locales de faisceaux, comme celles induites à la sortie des collimateurs. De plus, les aimants chauds peuvent rediriger ces pertes de protons vers les collimateurs, limitant ainsi leurs propagations dans le reste de l'anneau.

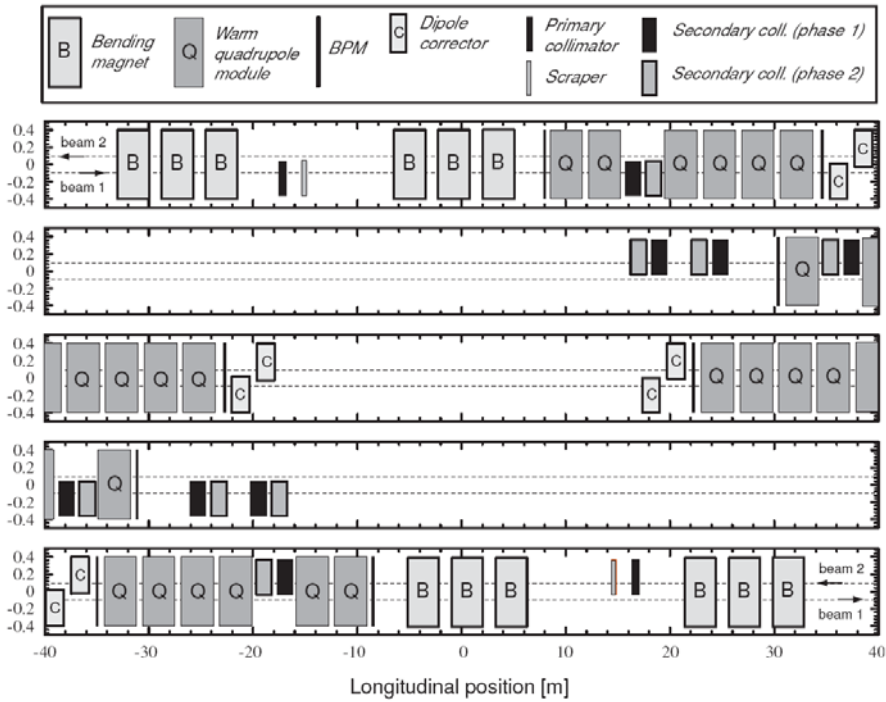


Figure 6 : Disposition longitudinale des collimateurs du LHC.

4.6.3. Les différents types de collimateurs du LHC

En plus des collimateurs primaires et secondaires présents dans les sections de nettoyage, des éléments additionnels sont placés à des endroits caractéristiques de l'anneau :

- les absorbeurs actifs et passifs, placés immédiatement en aval de l'insertion de nettoyage,
- les collimateurs tertiaires placés aux points expérimentaux pour la protection de l'aimant,
- les collimateurs spéciaux d'injection protégeant l'anneau d'éventuelles erreurs d'injection,
- les collimateurs de débris de collision protégeant la machine contre les pertes de particules induites par les sections expérimentales.

Le tableau suivant (voir Tab.2), présente les caractéristiques de fonctionnement des collimateurs du LHC :

- TCP = collimateurs primaires,
- TCSG = collimateurs secondaires,
- TCLA = absorbeurs,
- TCT = collimateurs tertiaires.

Parameter	TCP	TCSG	TCLA/TCT
Material	C or C-C	C or C-C	W
Effective jaw length [m]	0.6	1.0	1.0
Jaw dimensions [mm ²]	65 × 25	65 × 25	65 × 25
Jaw tapering [cm]	2 × 10	2 × 10	2 × 10
Surface flatness [μ m]	25	25	25
Maximum gap [mm]	60	60	60
Minimum gap [mm]	0.5	0.5	0.5
Gap size precision [μ m]	50	50	50
Jaw position control [μ m]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Jaw-beam angle control [μ rad]	≤ 15	≤ 15	≤ 15
Reproducibility [μ m]	20	20	20
Position installation precision [μ m]	100	100	100
Angular installation precision [μ rad]	150	150	150

Table 2 : Conditions de fonctionnement des principaux collimateurs pour le système de nettoyage du LHC.

5. Les kickers du SPS

En 2003, l'échauffement de l'aimant kicker d'extraction MKE a été confirmé par les mesures avec un faisceau de type LHC (c.-à-d. un faisceau du type que l'on enverrait au LHC lorsque ce dernier entrera en fonction en 2008). La puissance dissipée par le faisceau était telle que cela compromettrait sérieusement le bon fonctionnement du kicker. En effet, le passage du faisceau dans le kicker conduit à une élévation de la température au dessus de celle de Curie, induisant la perte des propriétés magnétiques de ce dernier. Ce changement d'état magnétique étant réversible, le kicker retrouve ses propriétés quand sa température redescend sous celle de Curie [11].

5.1. La disposition de l'aimant kicker

Les kickers MKE sont des aimants très rapides (c.-à-d. bien inférieur au tour machine) utilisés pour l'extraction du faisceau du SPS vers le LHC. Ils ont la forme d'un C et sont composés de ferrite excitée par un courant pulsé. La ferrite est une céramique ferromagnétique à grande perméabilité. Les kickers sont composés de 7 cellules de ferrite séparées par une structure métallique. Ces cellules de ferrite sont logées à l'intérieur des chambres à vide. La longueur totale d'un kicker est de 2,2 m et son ouverture est variable en fonction des différents types (environ 150 par 35 mm) (voir Fig.7).

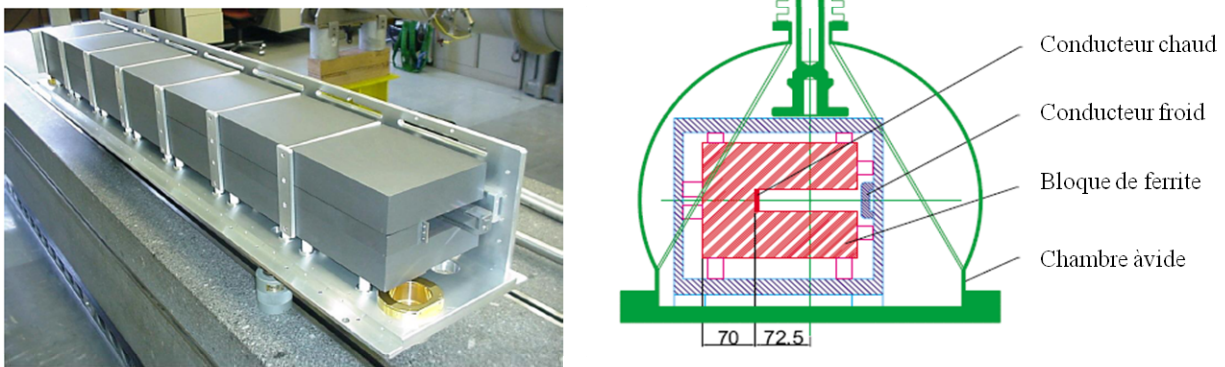


Figure 7 : Kicker MKE après assemblage des 7 cellules de ferrite (à gauche), coupe transversale d'un kicker MKE (à droite).

5.2. Les techniques d'armatures ou de protections

Lorsque le faisceau passe aux travers d'un kicker, celui-ci crée un champ magnétique se concentrant dans la ferrite. Dans une gamme de fréquence élevée (supérieur à 1 GHz), la ferrite perd ses propriétés de polarisation (ou d'aimantation), entraînant une augmentation de la partie réelle de l'impédance. Ceci provoque un échauffement très significatif du kicker.

Afin de réduire l'impédance, le champ magnétique induit par le faisceau ne doit pas pénétrer dans la ferrite. Une solution simple est d'installer un blindage conducteur entre le faisceau et la ferrite. Pour être efficace, ce blindage doit remplir les conditions suivantes :

- Il ne doit pas court-circuiter l'impulsion haute tension de l'extraction,
- Il ne doit pas atténuer de manière significative le champ d'extraction par un impact faible sur les champs magnétiques rapides,
- Il ne doit pas réduire l'ouverture des kickers,
- Idéalement, ce blindage doit pouvoir être appliqué sur les kickers déjà existants sans occasionner de trop grandes modifications,
- L'élément conducteur doit avoir un bon contact thermique avec la structure du kicker,
- Les conditions d'ultra vide doivent être respectées.

Pour répondre à toutes ces conditions, deux méthodes peuvent être envisagées :

- L'insertion de bande en céramique par un enduit métallique sur les kickers.
- L'application de bandes métalliques placées directement sur la ferrite.

5.3. L'insertion de bande en céramique

L'ouverture d'un kicker MKE étant de forme plate, des bandes en céramique peuvent être positionnées sur chaque cellule de ferrite (voir Fig.8). Ces bandes de céramique sont connectées électriquement au début et à la fin de chaque cellule, permettant le passage du courant dans chacune d'entre elles. Cependant, l'efficacité de cette méthode est limitée car le blindage ne peut pas être installé au centre du kicker sans modification de l'ouverture.

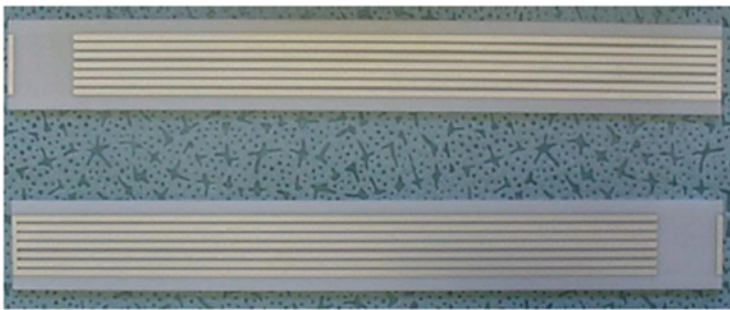


Figure 8 : Bandes de céramique (à gauche), disposées sur un kicker utilisé pour des tests de mesure (à droite).

5.4. L'application de bandes conductrices sur la ferrite

Une autre solution est d'appliquer des enduits de basse impédance directement sur la ferrite (voir Fig.9). Un conducteur d'une épaisseur de 30 μm est placé par une méthode d'impression. Cette méthode permet d'obtenir un enduit d'épaisseur uniforme dont la forme est reproductible. Chaque bande conductrice est reliée électriquement aux extrémités du bloque de ferrite. La géométrie des bandes a été choisie afin de fournir un espace suffisant entre les lignes conductrices pour résister, autant que possible, à une haute tension.

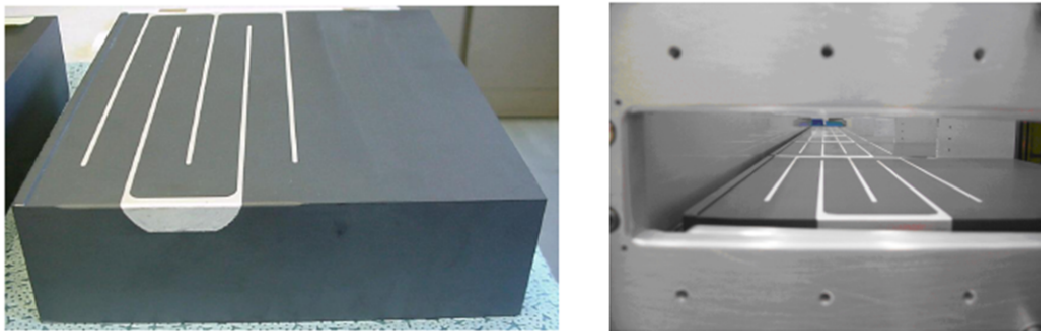


Figure 9 : Impression de bandes métalliques sur les bloques de ferrite d'un kicker MKE.

5.5. Impédance dans le nouveau kicker d'extraction MKE

Après une étude poussée de ces deux méthodes, la solution apparaissant comme la plus prometteuse fut celle de l'impression de bandes conductrices sur la ferrite des kickers. Successivement un kicker utilisé pour la future extraction du faisceau entre le SPS et le LHC a été équipé et soumis aux mesures d'impédance.

Une réduction de l'échauffement par un facteur quatre a été obtenue pour un faisceau de type LHC. De plus, il a été constaté que les bandes de conduction ont un effet positif pour des fréquences supérieures à 200 MHz. Mais, à basse fréquence, il a été observé une augmentation de l'impédance probablement due aux résonances générées par les bandes conductrices (voir Fig.10). Le problème de l'impédance dans les kickers du SPS reste toujours d'actualité dans le plan transversal car la réduction d'impédance a été surtout réalisée en longitudinal.

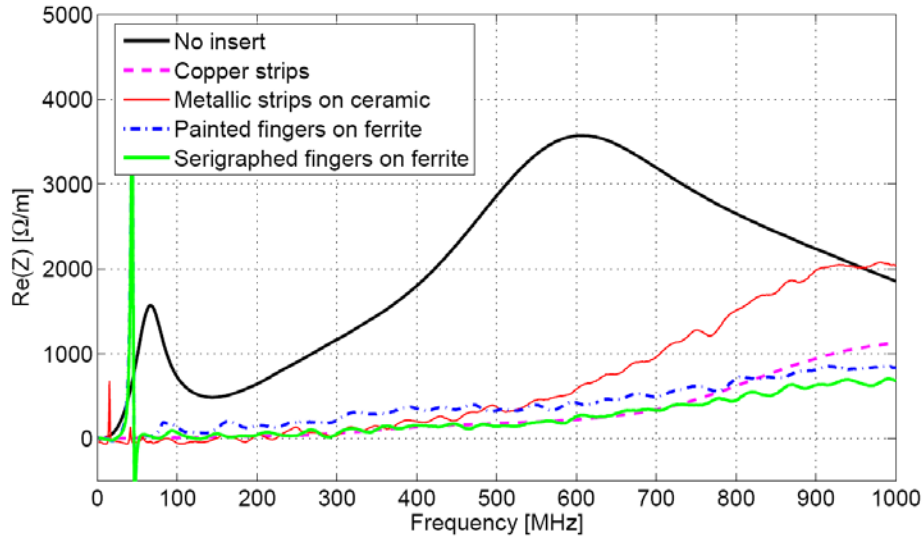


Figure 10 : Résultats de mesures de l'impédance longitudinale réalisées sur une cellule de ferrite.

6. ZBASE : Ancienne base de données de l'impédance

Le développement d'une base de données sur l'impédance des accélérateurs du CERN a été réalisé dans le but de stocker et de calculer l'impédance du LEP puis du LHC. Pour le LHC, les impédances sont continuellement recalculées en raison des nombreux changements géométriques de ses composants [12].

Le développement du programme ZBASE a été motivé pour répondre à quatre objectifs. ZBASE devait :

- rassembler toutes les informations liées à l'impédance, dans un format standard et facile d'accès,
- collecter tous les renseignements nécessaires pour estimer l'impact de l'impédance sur la dynamique de faisceau,
- fournir une interface graphique conviviale pour une utilisation simple des programmes employés pour le calcul d'impédance,
- fournir les données de chaque élément du LHC pour le calcul automatique d'impédance. Par exemple pour le LHC, la géométrie de chaque composant étant toujours en processus d'étude, une mise à jour des valeurs d'impédance est indispensable.

6.1. ZBASE : Interface graphique de l'utilisateur

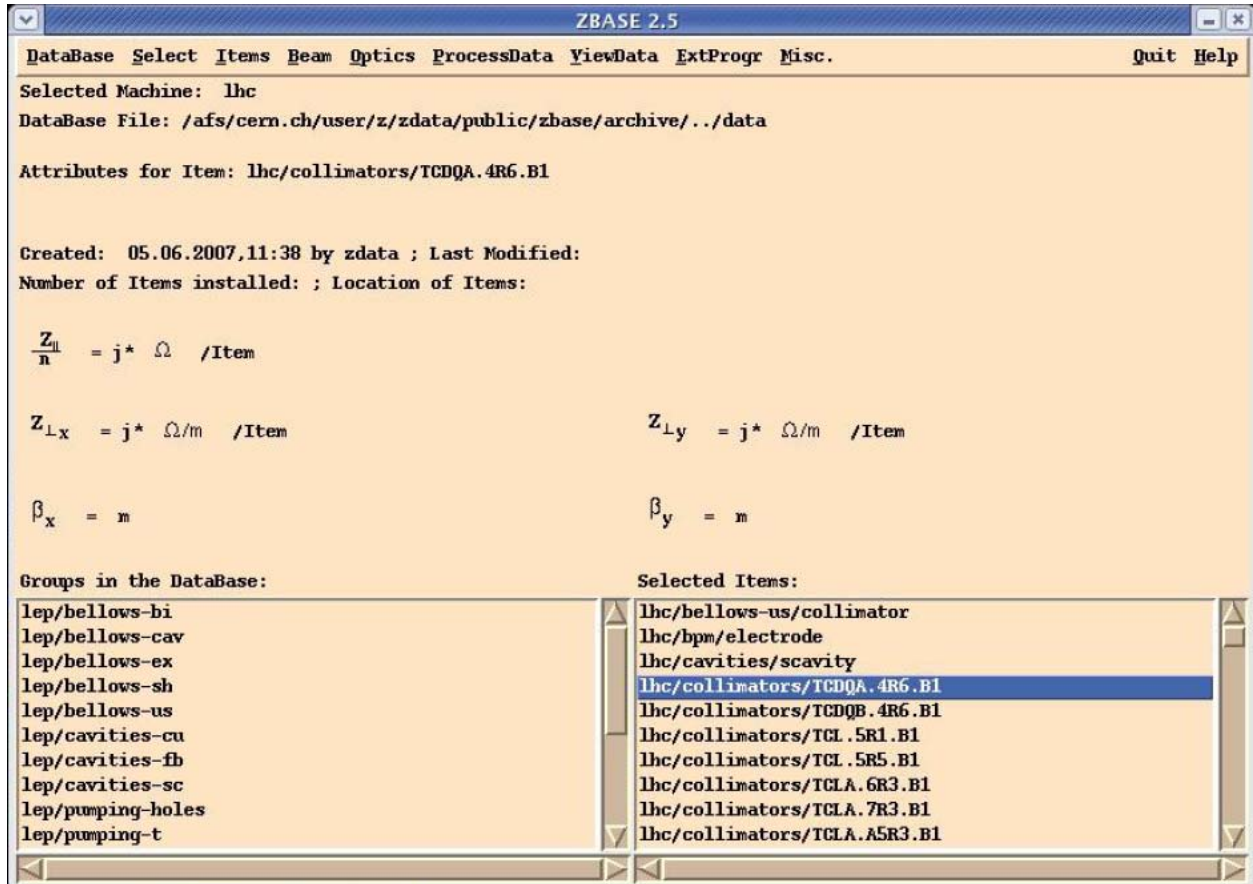


Figure 11 : Interface graphique du logiciel ZBASE.

L'interface graphique de ZBASE est composée d'une barre menu et de trois zones d'affichage (voir Fig.11) :

- la première zone montre les différentes informations concernant l'élément sélectionné dans la base de données,
- la deuxième zone d'affichage (en bas à gauche) liste tous les groupes d'impédances disponibles dans la base de données,
- la troisième zone d'affichage (en bas à droite) montre l'élément sélectionné pour être utilisé dans d'autres procédures.

6.2. ZBASE : Les différentes fonctionnalités

La barre menu permet à l'utilisateur de modifier et traiter les données de ZBASE. Elle offre ainsi onze menus différents (voir Fig.11) :

- le menu **DataBase** permet à l'utilisateur de créer une nouvelle base de données, et de sauver, d'effacer, ou de modifier des fichiers,
- le menu **Select** permet de choisir les fichiers pouvant être utilisés par des programmes externes,
- le menu **Item** donne permet à l'utilisateur de regarder et de modifier le nombre d'éléments installés,
- le menu **Beam** permet à l'utilisateur de regarder et de modifier les paramètres du faisceau de la machine,
- le menu **Optics** permet à l'utilisateur de regarder, calculer et modifier les valeurs des fonctions optiques stockées,
- le menu **ProcessData** permet de traiter les données d'impédance,
- le menu **ViewData** permet à l'utilisateur de regarder les paramètres d'un élément de la base de données,
- le menu **ExtProgr** permet à l'utilisateur une interface graphique pour utiliser des programmes externes tels que MAFIA, ABCI, URMEL ou MAD,
- le menu **Misc.** permet de sélectionner une imprimante ou un éditeur de texte,
- le menu **Help** fournit les pages d'aides du programme ZBASE.

ZBASE est donc un logiciel complet permettant de regarder, modifier, calculer, sauver chaque fichiers de la base de données. Malheureusement, ZBASE n'étant pas réactualisé depuis plusieurs années, de nombreux problèmes de fonctionnement sont apparus.

6.3. TCL/TK : Langage utilisé pour programmer ZBASE

Le langage utilisé pour écrire ZBASE est le Tcl/Tk. Le Tool Command Language (abréviation : Tcl) est un langage de script initialement conçu en 1988 par John Ousterhout et son équipe à l'université de Berkeley s'inspirant principalement des langages C, Shell. Ce langage est multiplateforme, extensible, facile à apprendre et repose sur onze règles syntaxiques. En 1990, John Ousterhout développe une extension pour Tcl appelé Tk. Cette extension est utilisée pour la création d'interfaces graphiques.

Pour développer ZBASE et ses nombreuses applications, il a fallu écrire environ 13000 lignes de code. Pendant une très longue période, ZBASE n'a plus été utilisé. Sa réactualisation par rapport aux mises à jour n'a pas été faite, le laissant avec de multiples erreurs.

Au terme de la fabrication du LHC, la question de l'impédance reste un problème majeur en raison de la mise en place des collimateurs et des kickers. ZBASE étant hors d'usage, un nouveau logiciel reposant sur de mêmes bases, devait être créé. Ce nouveau programme,

spécialement dédié aux calculs de l'impédance, se doit d'être simple d'utilisation, rapide et efficace.

7. ZBASE3 : La nouvelle base de données de l'impédance

La nouvelle base de données de l'impédance est programmée, comme son prédécesseur, en Tcl/Tk. Le fait d'utiliser un langage similaire a permis de s'inspirer de la structure du code de ZBASE. Bien que ZBASE3 soit une version simplifiée de ZBASE, il donne la possibilité de calculer l'impédance transversale et longitudinale, les wakefields correspondants et de faire la somme de tous ceux-ci. Pour réaliser ces calculs, ZBASE3 est rattaché au logiciel *Mathematica* [13].



Figure 12 : Interface graphique du programme ZBASE3.

L'interface graphique de ZBASE3 est composée d'une barre « Menu » et d'une zone d'affichage (voir Fig.12). La zone d'affichage permet à l'utilisateur de naviguer dans la base de données afin de sélectionner un fichier d'entrée (input) d'un élément et d'en calculer son impédance ou son wakefield.

La barre menu de ZBASE3 offre 6 options à l'utilisateur :

- le menu **NewData** permet de créer de nouveaux répertoires, d'ajouter ou d'effacer des éléments dans la base de données,
- le menu **Impedance** permet de calculer l'impédance d'un élément,
- le menu **ImpedToWake** permet de transformer l'impédance d'un élément en wakefield,
- le menu **WakeToImped** permet de passer de l'impédance d'un élément au wakefield,
- le menu **Sum** permet de faire des sommations d'impédance et de wakefield,
- le menu **ViewData** permet de visualiser les tables de valeurs ou les courbes.

ZBASE 3 sera dans la future rattaché aux programmes HEADTAIL et MTRISIM permettant de simuler la dynamique des faisceaux de paquets uniques ou de paquet couplés.

7.1. ZBASE3 : Fonctionnements de la base de données

La base de données est écrite en Tcl /Tk pour que ZBASE3 soit disponible sous différents systèmes d'exploitation. Le langage Tcl/Tk est réputé pour être un langage rapide à maîtriser et facile d'usage pour créer une interface graphique.

Le shell-script qui lance ZBASE3 évalue dans un premier temps les variables d'environnement du programme avant de démarrer le principal shell-script « zbase3.tk ».

7.1.1. Le shell-script de ZBASE3

Le shell-script de ZBASE3 est un fichier comprenant environ 2500 lignes de codes. Ce shell-script est composé de diverses procédures utilisées lors fonctionnement de ZBASE3. Les principales procédures composant le shell-script sont newmachine, newitementry, adinputfile, adoutputfile, adsummation, remitem, selectfile, creatalist, removealist, copybox, listsum, summationsel, fdisplay, lview. Les fonctionnalités des procédures sont développées dans les paragraphes suivants.

7.1.2. Les différents répertoires de ZBASE3

ZBASE3 est une base de données conçue pour stocker l'information sur l'impédance des différents éléments des accélérateurs du CERN. Pour que cette base de données soit organisée de façon logique, un organigramme sur la structure de ZBASE3 a été mis en place (voir Fig.13).

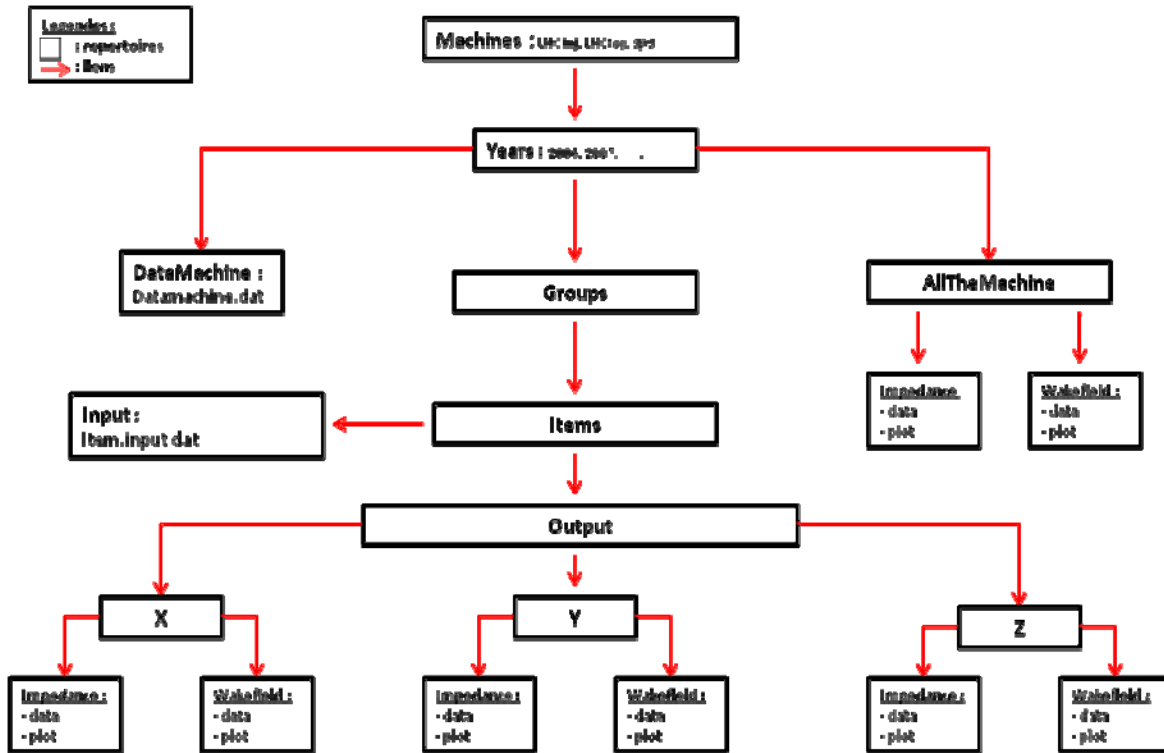


Figure 13 : Organigramme de la base de données ZBASE3.

La structure de ZBASE3 est composée de plusieurs répertoires permettant un classement logique des données sur l'impédance :

- **Machine** : contient le nom des différents accélérateurs du CERN,
- **Years** : permet de classer les données en fonctions des années,
- **Groupe** : classe les éléments en fonction du groupe auquel ils appartiennent (collimateurs, kickers ...),
- **DataMachine** : répertoire contenant les données propres de la machine,
- **AllTheMachine** : répertoire regroupant les fichiers concernant l'impédance et le wakefield total,
- **Items** : répertoire concernant tous les éléments appartenant à un groupe,
- **X, Y, Z** : trois répertoires contenant les données sur l'impédance et le wakefield en fonction du plan transversal (X ou Y) et longitudinal (Z).

7.1.3. Création de nouveaux répertoires

ZBASE3 donne la possibilité à l'utilisateur de mettre à jour la base de données sur l'impédance. Pour ajouter de nouveaux éléments dans la base de données, l'utilisateur doit cliquer sur **NewData** puis sur **Create New Item** (voir Fig.14).

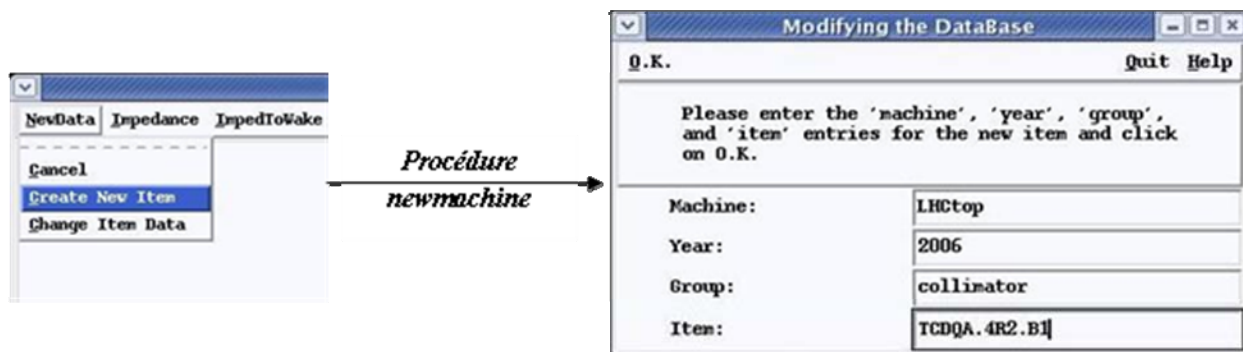


Figure 14 : Création de nouveaux répertoires par le programme ZBASE3.

La procédure *newmachine* permet de créer une fenêtre où l'utilisateur peut entrer le nom de la machine, la date, le groupe, ainsi que le nom du nouvel élément à ajouter. Si un de ces attributs ne correspond pas à ceux déjà présents dans la base de données, le programme crée automatiquement les nouveaux répertoires.

7.1.4. Ajout de fichiers d'entrée et de sortie dans les nouveaux répertoires

Une fois les nouveaux répertoires générés, l'utilisateur doit ajouter les fichiers d'entrée et de sortie par le biais de la fenêtre **Changing the Entries of an Item**. Cette fenêtre s'ouvre automatiquement après la création des nouveaux répertoires, ou bien en cliquant sur **Change Item Data** (voir Fig.15).

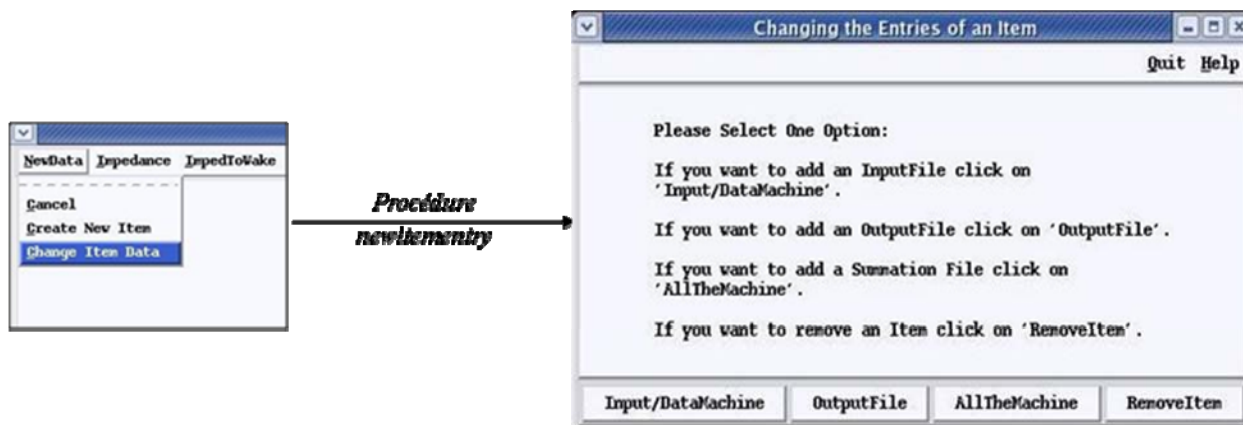


Figure 15 : Interface graphique pour ajouter des fichiers d'entrée et de sortie.

Cette fenêtre propose trois options différentes pour copier correctement des fichiers dans les bons répertoires de la base de données et une option pour effacer plusieurs éléments.

7.1.5. Ajout de fichiers d'entrée dans la base de données

Cette fenêtre se compose de quatre espaces d'entrées où l'utilisateur précise le nom de la machine, l'année, le groupe et l'élément (voir Fig.16). Ensuite, il doit indiquer si le fichier d'entrée est :

- spécifique à la machine, pour cela l'utilisateur sélectionner le bouton **DataMachine**.
- spécifique à un élément, pour cela l'utilisateur sélectionner le bouton **Inputfile**.

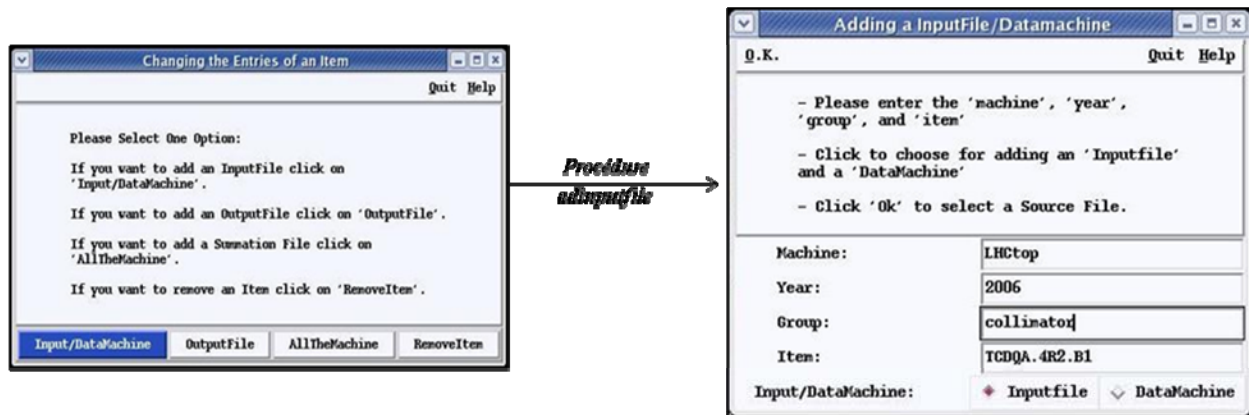


Figure 16 : Interface graphique pour l'ajout de fichiers d'entrée dans la base de données.

Le bouton **DataMachine** ajoute un fichier appelé *Datamachine.dat* dans le répertoire DataMachine. Le bouton **Inputfile** ajoute un fichier dont le nom sera généré en fonction de l'élément et du suffixe '*inputfile.dat*'. Ce fichier sera copié dans le répertoire Input de l'élément. Lorsque toutes ces étapes ont été respectées, l'utilisateur peut cliquer sur le bouton ok ouvrant une nouvelle fenêtre accédant aux fichiers d'entrée préalablement enregistrés dans l'ordinateur (voir Fig.17).



Figure 17 : Fenêtre permettant la sélection des fichiers d'entrée.

Une fois le fichier d'entrée trouvé, l'utilisateur double clique sur celui-ci afin de le copier dans le répertoire sélectionné. Une fenêtre apparaît alors (voir Fig.18) donnant la possibilité à l'utilisateur de :

- Visualiser le répertoire où le fichier va être copié.
- Confirmer ou abandonner la copie de ce fichier d'entrée.

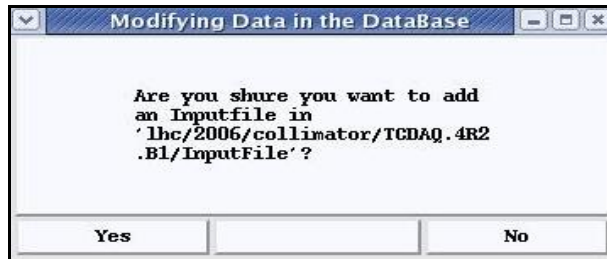


Figure 18 : Fenêtre de confirmation du logiciel ZBASE3.

7.1.6. Ajout de fichiers de sortie dans la base de données

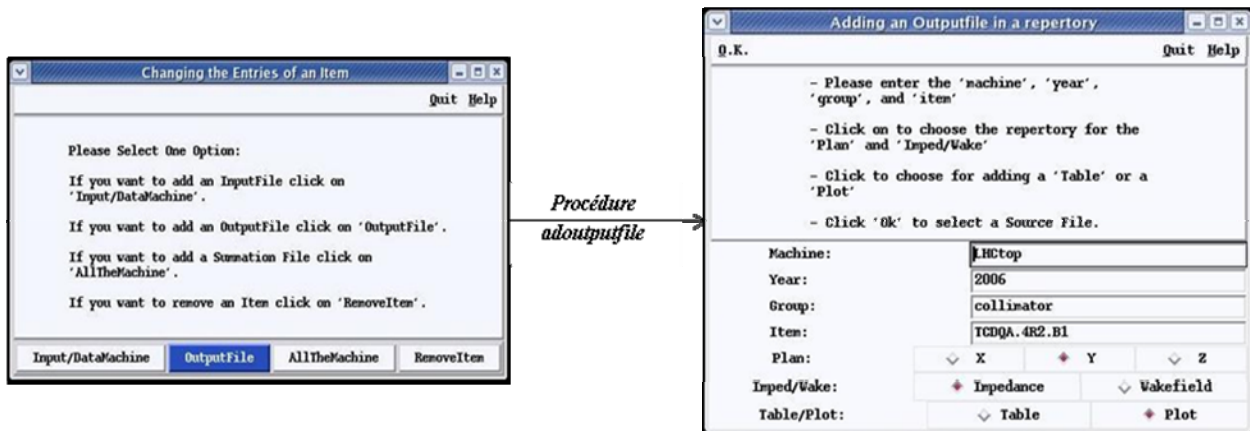


Figure 19 : Interface graphique pour l'ajout de fichiers de sortie dans la base de données.

Adding an Outputfile in a repertory est une fonction où l'utilisateur choisi un répertoire pour ajouter les fichiers de sortie. Pour placer correctement les fichiers de sortie dans

la base de données ZBASE3, l'utilisateur doit entrer le nom de la machine, l'année, le groupe et l'élément (voir Fig.19).

Il doit ensuite indiquer si ce fichier de sortie est :

- un calcul effectué dans le plan transversal X, Y, ou longitudinale Z,
- un calcul d'impédance ou de wakefield,
- un fichier texte Table ou un fichier image Plot.

Ces indications vont permettre de placer le fichier de sortie dans le bon répertoire. Le nom du fichier sera généré en fonction du nom de l'élément, du plan, du type de calcul et de la forme du fichier de sortie. Une fois toutes ces opérations exécutées, l'utilisateur clique sur le bouton **Ok** ouvrant ainsi une fenêtre permettant de sélectionner et de copier le fichier de sortie. Une nouvelle fenêtre de confirmation apparaît afin que l'utilisateur valide son choix.

7.1.7. Ajout de fichiers de sommation dans la base de données

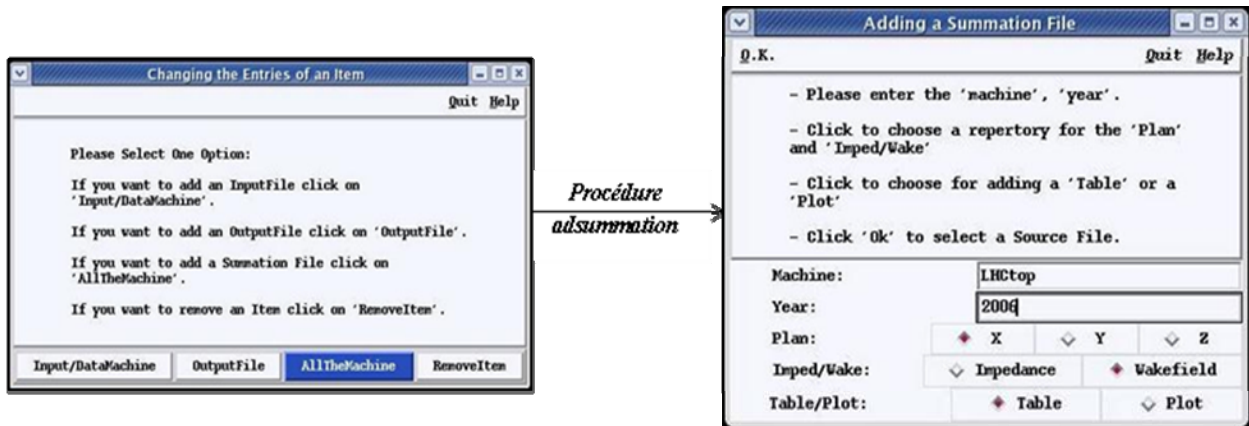


Figure 20 : Interface graphique d'ajout de fichiers de sommation dans la base de données.

Adding a summation File permet à l'utilisateur de copier des fichiers de sortie, d'un calcul de sommation de l'impédance ou du wakefield, dans le répertoire AllTheMachine (voir Fig.20). Pour entrer convenablement les fichiers de sortie l'utilisateur doit :

- indiquer le nom de la machine ainsi que l'année,
- spécifier si le fichier de sortie est une somme dans le plan transversal ou longitudinal,
- préciser si le fichier de sortie est une somme d'impédance ou de wakefield,
- définir si le fichier est une table de données ou une courbe.

Lorsque toutes ces opérations ont été réalisées, le fichier de sortie sera copié dans le répertoire AllTheMachine. Le nom de ce fichier sera généré automatiquement en fonction du nom de la machine, de l'année, du plan, du type de calcul et du format du fichier de sortie.

7.1.8. Suppression d'un élément de la base de données

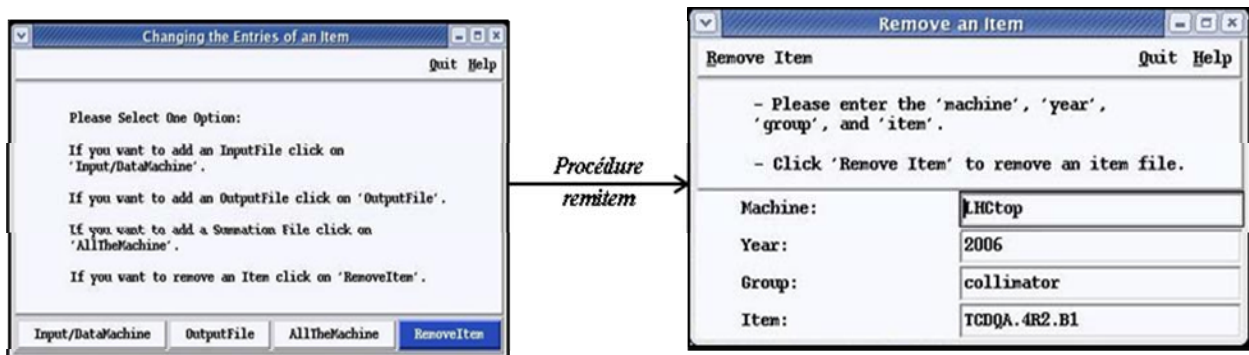


Figure 21 : Interface graphique de suppression d'un élément dans la base de données.

La fenêtre **Remove an item** donne la possibilité à l'utilisateur d'enlever un élément de la base de données. Cette option efface le répertoire de l'élément entraînant la suppression de tous les fichiers d'entrée et de sortie de ce dernier. L'utilisateur doit indiquer le nom de la machine, la

date, le groupe ainsi que l'élément qui va être enlevé puis il clique sur le bouton **Remove Item** (voir Fig.21). Une fenêtre demandant une confirmation sur l'élément à enlever apparaît alors.

7.2. ZBASE3 : Les différentes fonctionnalités

7.2.1. Calcul de l'impédance

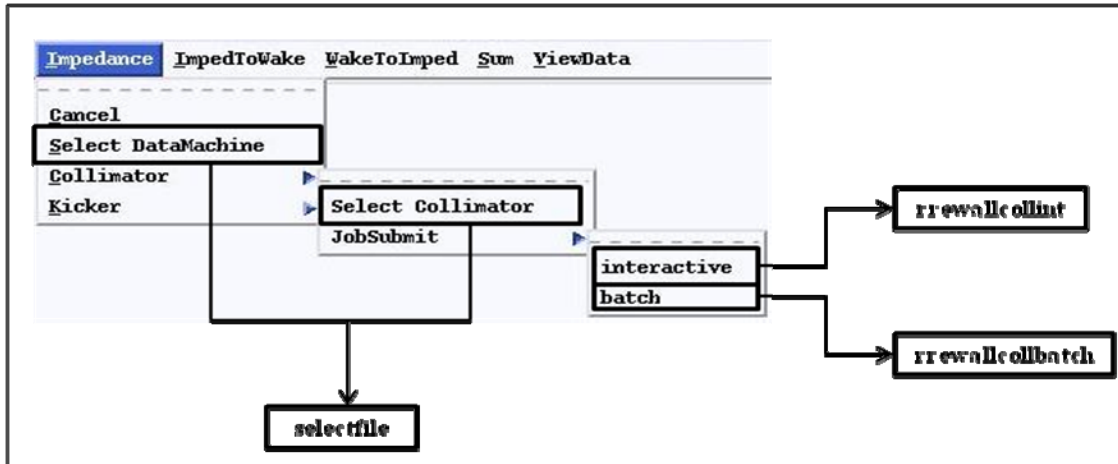


Figure 22 : Interface graphique dédiée aux calculs d'impédance.

Pour calculer l'impédance d'un élément du LHC, ZBASE3 fait appelle à plusieurs procédures comme indiqué par la (voir Fig.22). Dans un premier temps, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton **Impedance** pour faire apparaître le sous-menu suivant :

- **Select DataMachine** : ce bouton permet de naviguer dans la base de données à travers ZBASE3 puis de sélectionner le fichier *DataMachine.dat* désiré et de le copier dans le répertoire InputCalculation (voir Fig.23).

Average machine radius [m]	Beam momentum [GeV/c]	Horizontal tune	Vertical tune
1100	26	26.13	26.18

Figure 23 : Exemple du fichier d'entrée *DataMachine.dat* pour la machine SPS.

- **Collimator** : Ce bouton fait apparaître une cascade de sous-menu afin de choisir le fichier d'entrée du collimateur et de le copier dans le répertoire InputCalculation.
- **Kicker** : Ce bouton fait apparaître une cascade de sous-menu pour choisir le fichier d'entrée du kicker et de le copier dans le répertoire InputCalculation (voir Fig.24).

Name	Length of the ferrite [m]	Vertical betatron function [m]	Half distance to the ferrite [m]	Yokoya factor
MKDH.11751	1.280	67.276	0.03	0.82

Figure 24 : Exemple de fichier d'entrée pour un kicker du SPS.

Ces trois opérations sont réalisées grâce à la procédure *selectfile* (voir Annexe.1).

Ensuite, l'utilisateur clique sur **JobSubmit** donnant le choix entre deux modes de calculs :

- soit le calcul sera exécuté de façon **interactive**, c'est-à-dire qu'il sera effectué en local, empêchant toute autre opération,
- soit le calcul sera exécuté en mode **batch** (voir annexe.2), c'est-à-dire qu'il sera réalisé par des serveurs dédiés aux calculs de simulations.

Ces deux opérations sont possibles par le biais de shellscripts lançant automatiquement les fichiers *Mathematica* dédiés aux calculs d'impédance.

Par exemple, le shellscript **rrewallcollint** lance le fichier *Mathematica ReWallCollimator.m*.

Celui-ci lit automatiquement le fichier *DataMachine.dat* et *Inputcoll.dat* du répertoire *InputCalculation* et génère les fichiers de sortie suivants (voir Fig.25 et Fig.26) :

- une table de valeurs donnant l'impédance (partie réelle et imaginaire) en fonction de la fréquence,
- une représentation graphique de cette table de valeurs.

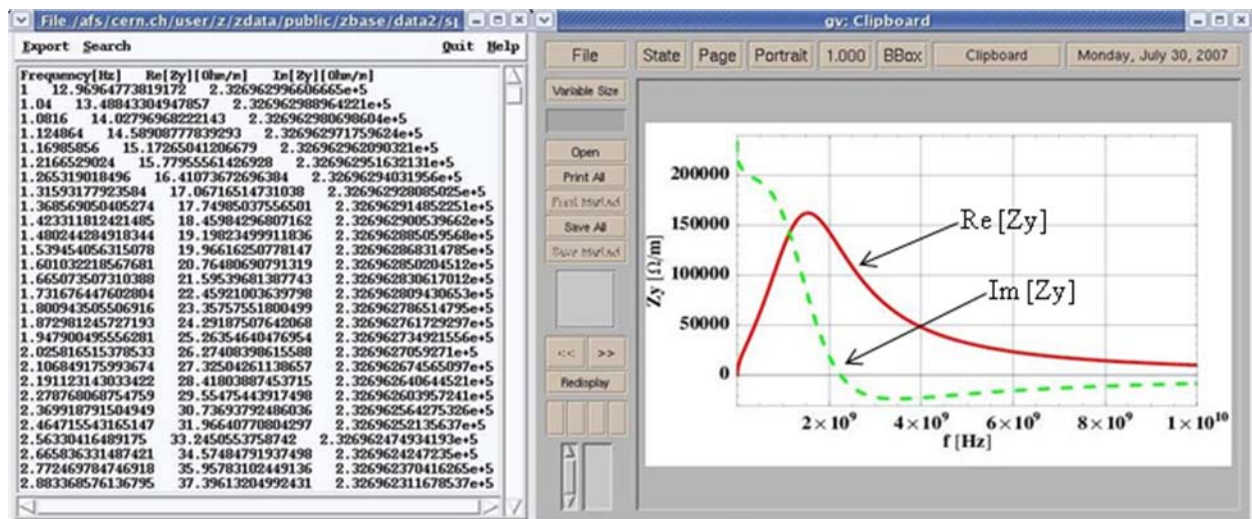


Figure 25 : Table des valeurs (à gauche) et représentation graphique (à droite) de l'impédance du kicker MKE.41631 du SPS en 2007.

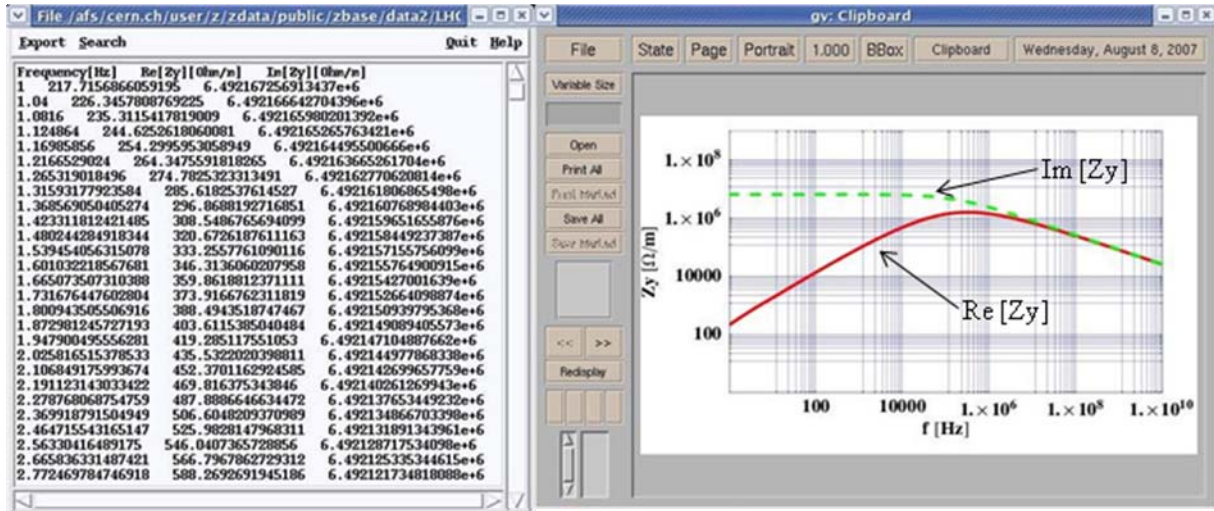


Figure 26 : Table des valeurs (à gauche) et représentation graphique (à droite) de l'impédance du collimateur TCDQA.4R6.B1 du LHC à top énergie en 2006.

7.2.2. Conversion de l'impédance en wakefield

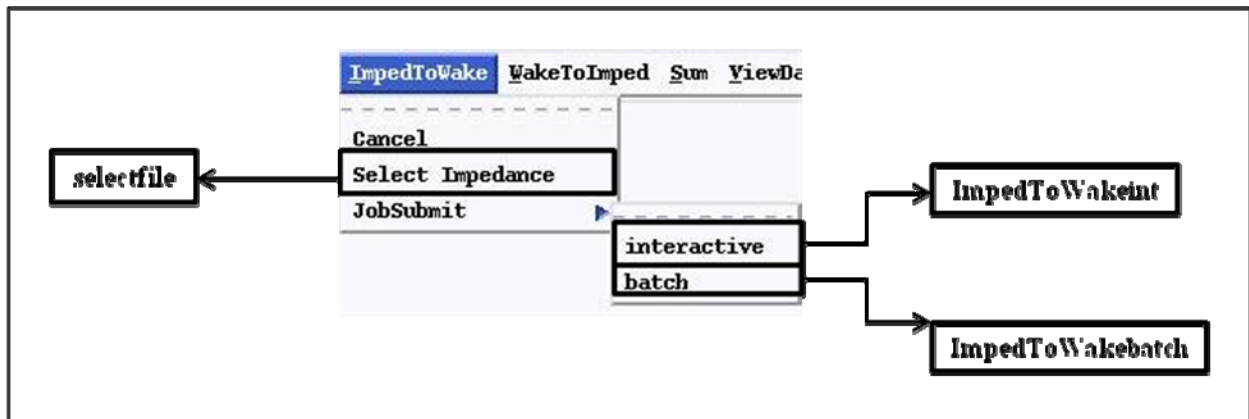


Figure 27 : Interface graphique dédiée à la conversion de l'impédance en wakefield.

Pour calculer le champ de sillage (ou wakefield) d'un élément des accélérateurs du CERN, ZBASE3 fait appelle à diverses procédures (voir Fig.27).

Dans un premier temps, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton ImpedToWake pour faire apparaître le sous-menu suivant :

- **Select Impedance** : ce bouton permet à l'utilisateur de naviguer dans la base de données puis de sélectionner un fichier de sortie (table de valeurs) issu d'un calcul d'impédance et de le copier de le répertoire InputCalculation,
- **JobSubmit** : ce bouton fait apparaître un sous-menu proposant de lancer le calcul en mode **interactif** ou **batch**.

Le fichier *Mathematica* convertissant l'impédance en wakefield (*WakeToImpedConversion.m*) lit la table de valeurs de l'impédance et génère deux fichiers de sortie (voir Fig.28) :

- une table de valeurs donnant le wakefield en fonction du temps,
- une représentation graphique de cette table de valeurs.

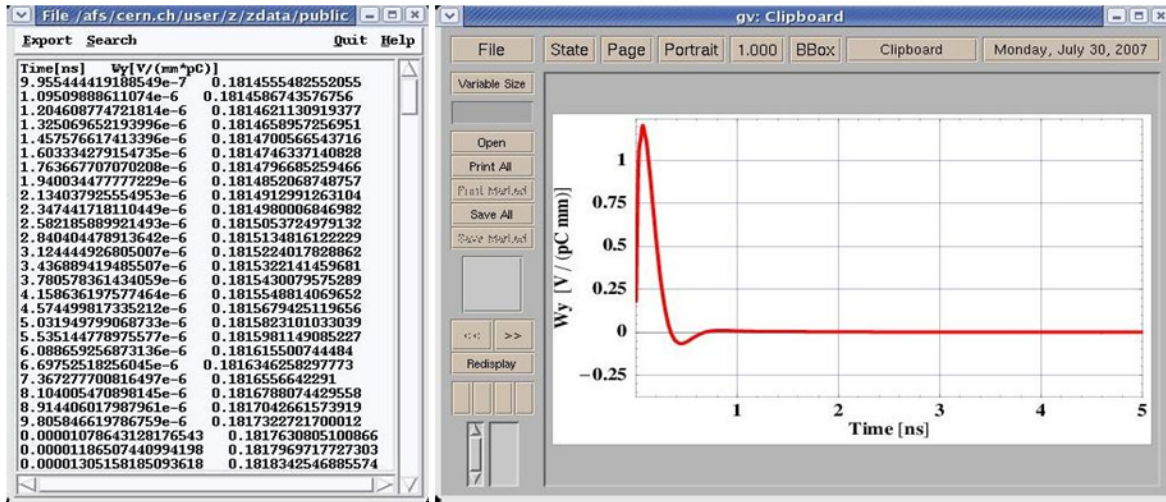


Figure 28 : Table des valeurs (à droite) et représentation graphique (à gauche) du champ de sillage du kicker MKE.41631 du SPS en 2007.

Pour le moment, seul le passage de l'impédance au wakefield est possible avec les kickers. En effet des difficultés ont été rencontrées pour convertir l'impédance des collimateurs en wakefield. Ceci est dû à la forme très piquée de l'impédance à basses fréquences empêchant d'avoir un bon calcul par *Mathematica*. Une solution est en cours d'investigation.

7.2.3. Conversion du wakefield en impédance

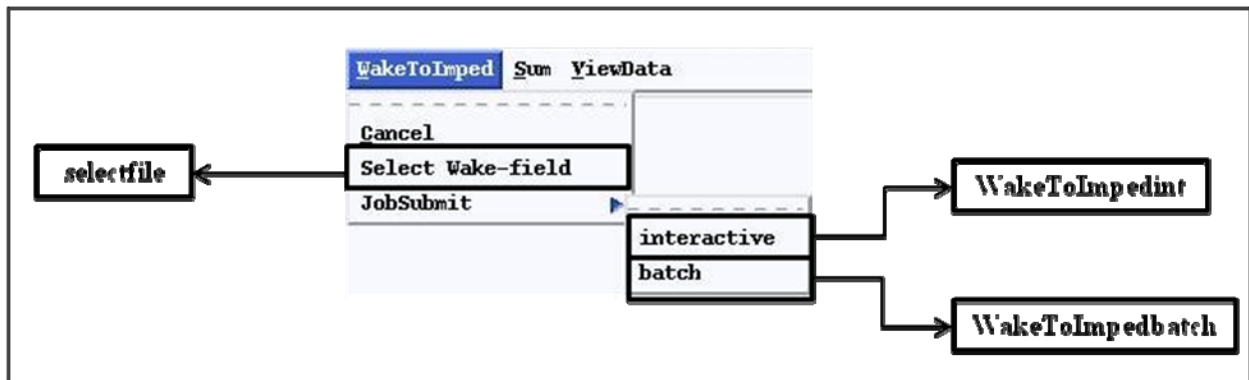


Figure 29 : Interface graphique dédiée à la conversion du wakefield à l'impédance.

La conversion du wakefield en impédance par ZBASE3 se fait grâce au fichier *Mathematica WakeImpedConversion.m*. Celui-ci lit la table de valeurs du wakefield et génère deux fichiers, une table de valeurs et un graphique. Pour lancer cette application, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton **WakeToImped** pour faire apparaître le sous-menu suivant (voir Fig.29) :

- **Select Wakefield**: ce bouton permet à l'utilisateur de naviguer dans la base de données puis de sélectionner un fichier de sortie (table de valeurs) issu d'un calcul de wakefield et de le copier de la répertoire InputCalculation,
- **JobSubmit** : ce bouton fait apparaître un sous-menu donnant le choix de lancer le calcul en mode **batch** ou **interactif**.

7.2.4. Sommation de l'impédance ou du wakefield

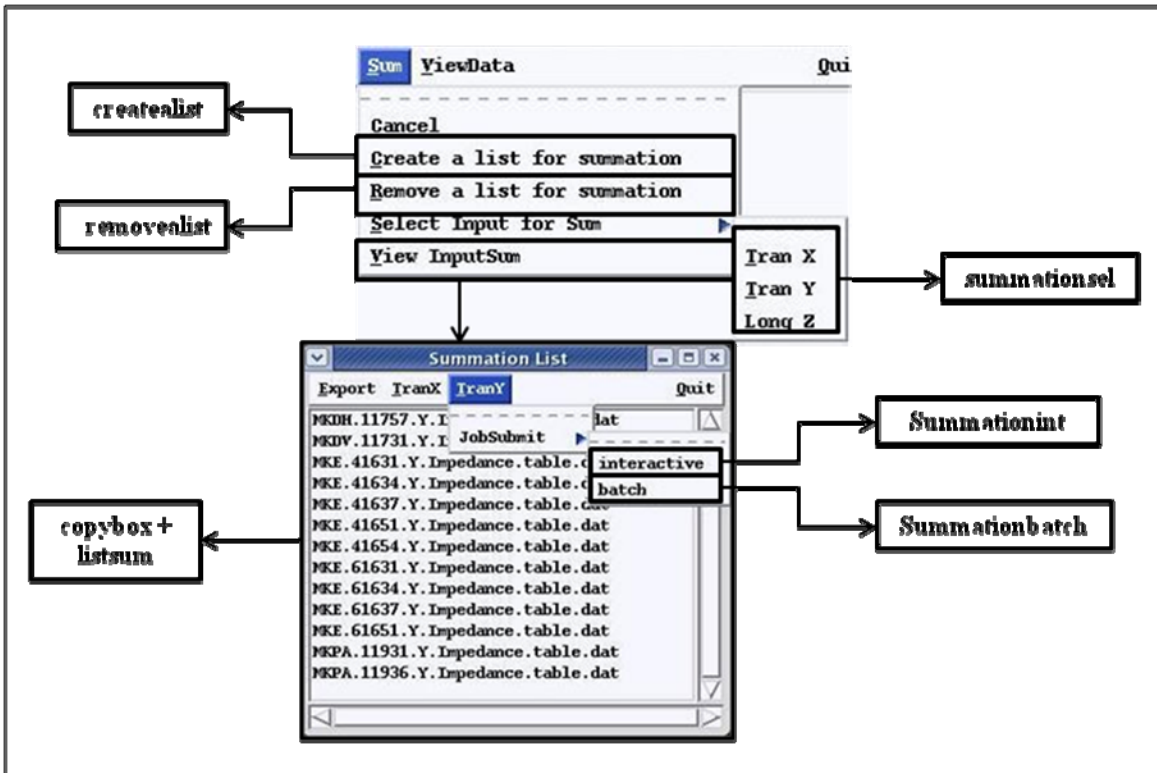


Figure 30 : Interface graphique dédiée à la sommation de l'impédance ou du wakefield.

Cette option de ZBASE3 donne la possibilité à l'utilisateur de réaliser une somme d'impédances ou de wakefields (voir Fig.30). Pour faire cela, il doit procéder à plusieurs étapes :

- tout d'abord, l'utilisateur doit créer une liste où il pourra faire la somme des différents éléments. Cette liste est créée par le bouton **Create a list for summation** faisant appel à la procédure *createalist* du programme ZBASE3,
- ensuite, l'utilisateur choisit les différents éléments à sommer en cliquant sur **Select Input for Sum**. Celui-ci fait apparaître un sous-menu donnant la possibilité de sélectionner l'impédance ou le wakefield dans le plan transversal X,Y et longitudinal Z,
- pour visualiser la liste générée automatiquement par les procédures *copybox* et *listsum*, l'utilisateur clique sur **View Input Sum**,
- pour lancer le calcul de sommation, l'utilisateur clique sur le boutons **TranX** ou **TranY**. Ceux-ci sont reliés à la commande **JobSubmit** donnant la possibilité de lancer le calcul soit en locale, soit sur un serveur dédié aux calculs de simulation. Les fichiers de sommation *Mathematica*, *Summationx.m* et *Summationy.m*, lisent la liste d'impédance ou de wakefields et produisent de nouveaux fichiers (table de valeurs et graphiques) (voir Fig.31).

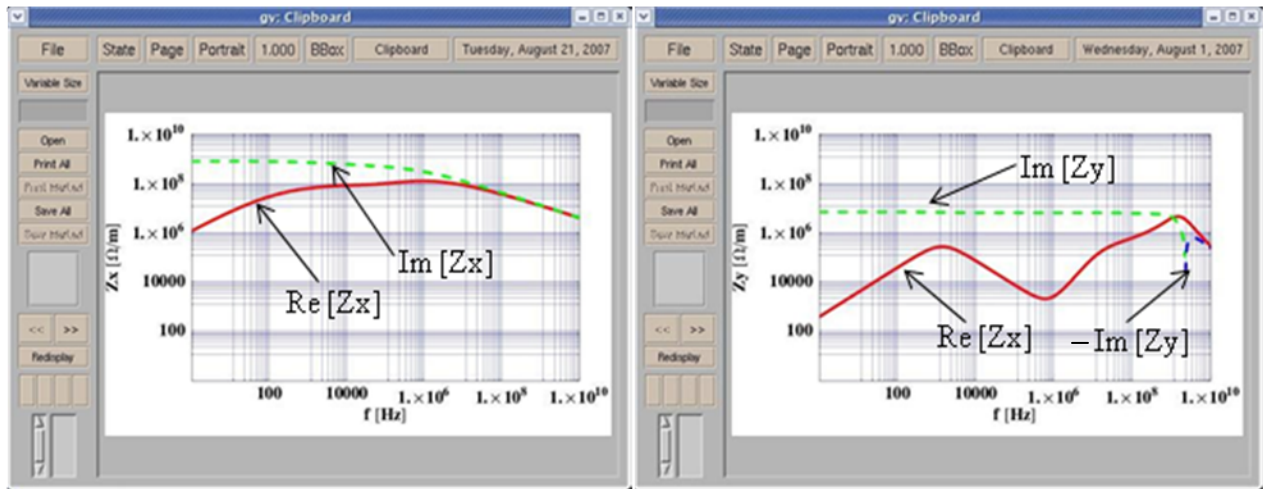


Figure 31 : Impédance totale des collimateurs du LHC à top énergie (à gauche) et des kicker du SPS en 2006 (à droite).

Cette option est très utile pour connaître l'impédance totale du LHC ou du SPS. De plus, les valeurs de la sommation des wakefields seront utilisées par les programmes de simulation HEADTAIL et MTRISIM.

7.2.5. Visualisation de fichiers dans la base de données

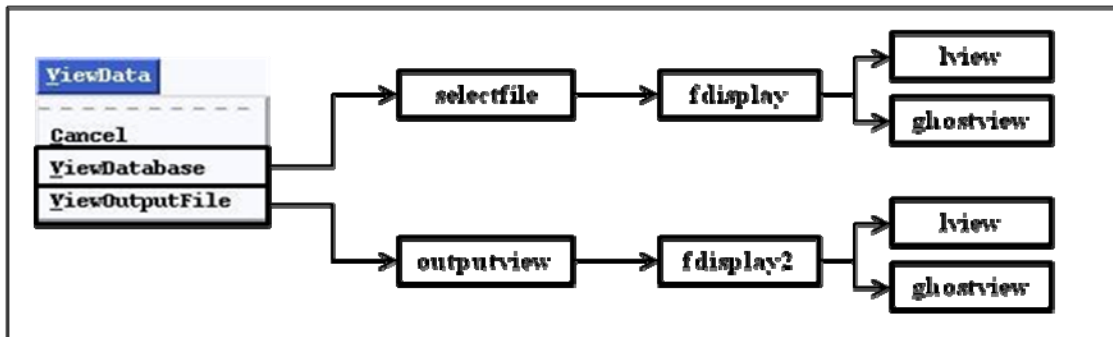


Figure 32 : Interface graphique dédiée à la visualisation des fichiers dans ZBASE3.

Pour visualiser les fichiers de la base de données ZBASE3, l'utilisateur va dans le menu **ViewData**. Un sous-menu s'affiche proposant deux options (voir Fig.32) :

- **ViewDatabase** : option donnant la possibilité à l'utilisateur de se déplacer dans la base de données grâce à la procédure **selectfile**,
- **ViewOutputFile** : option permettant de visionner les fichiers de sortie obtenus après un calcul dans le répertoire OutputCalculation.

Une fois le fichier choisi, l'utilisateur double-clique sur ce dernier pour visualiser les tables de valeurs et les courbes. Cette action est possible par la procédure **fdisplay** rattachée à deux autres procédures :

- **lview** : utilisé pour visionner les fichiers textes (.dat),
- **ghostview** : programme utilisé pour lire des fichiers postscripts (.ps).

7.3. Les programmes de simulation d'instabilités de faisceau de paquet unique

7.3.1. HEADTAIL : programme de simulation des instabilités dans un paquet unique de particules

HEADTAIL est un programme simulant les phénomènes d'instabilités dans un paquet unique de particules [14]. Ce code utilise pour le calcul d'instabilité le wakefield (ou champ de sillage)¹. Les résultats de dynamique de faisceau obtenus pour le cas du SPS en 2006 en sommant les wakefields des 20 kickers dans le plan vertical avec HEADTAIL sont les suivants (voir Fig.33) :

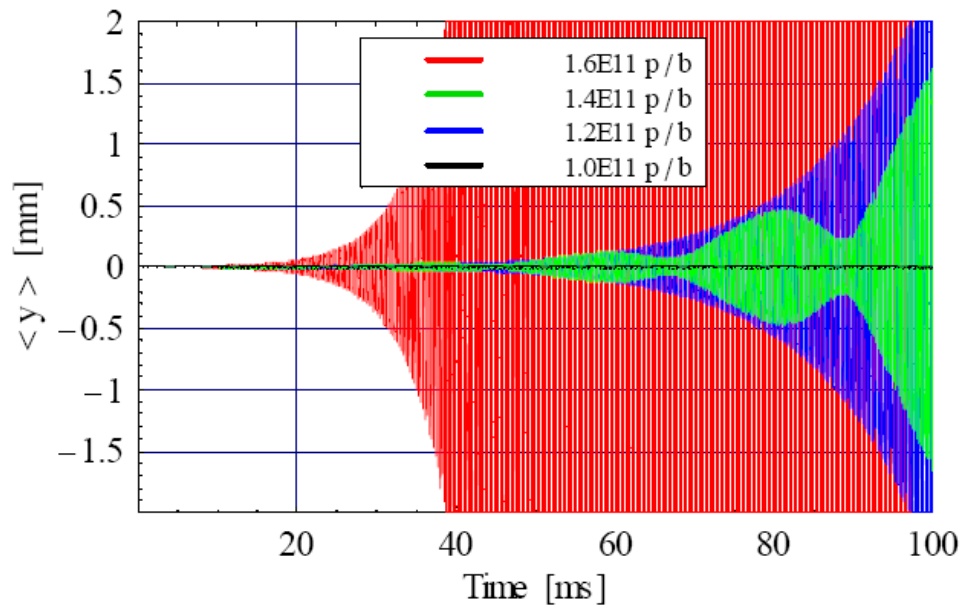


Figure 33 : Résultats avec le code de simulation HEADTAIL.

Le code HEADTAIL montre que le centre de masse du faisceau de particules ($\langle y \rangle$) est instable dans le SPS lorsque le nombre de protons par paquet est supérieur à $\sim 1,1.10^{11}$ p/b. Cette valeur est appelée le seuil d'instabilité.

¹ G.Rumolo a modifié son programme HEADTAIL pour pouvoir lire des tables de wakefield au lieu d'utiliser une formule analytique comme c'était le cas avant.

7.3.2. MOSES : programme de calcul d'instabilités de paquet unique de particules

MOSES est un programme qui résout des équations analytiques pour le calcul d'instabilités de paquet unique [15]. Un fit du champ de sillage total des kickers du SPS en 2006 par un résonateur (c'est-à-dire une formule analytique) a été utilisé pour les simulations avec MOSES (voir Fig.34).

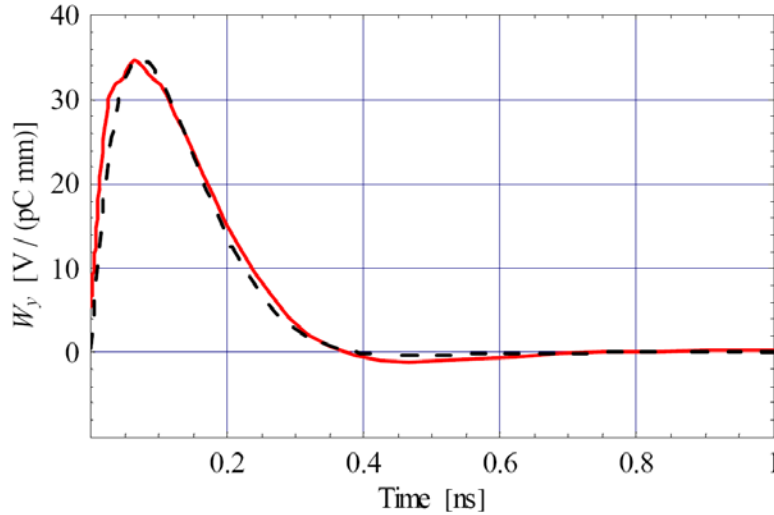


Figure 34 : Champ de sillage total des kickers en 2006 (courbe rouge continue) et fit en utilisant un résonateur (courbe noire pointillée).

Le champ de sillage du résonateur utilisé pour le fit est donné par Eq. (17)

$$W_y(t) = \frac{\omega_r R_y}{Q_r S} e^{-\varepsilon t} \sin(S \omega_r t), \quad (17)$$

où t est le temps (en seconde), $\varepsilon = \omega_r / (2Q_r)$ est la caractéristique d'atténuation d'un résonateur et $S = [1 - 1/(4Q_r^2)]^{1/2}$. Dans le fit, $R_y = 3,5 \text{ M}\Omega/\text{m}$ est l'impédance shunt vertical, $Q_r = 0.6$ est le facteur de qualité et $\omega_r = 2\pi f_r$ avec $f_r = 2.3 \text{ GHz}$ la fréquence de résonance.

En utilisant le fit, le résultat de MOSES pour le seuil d'instabilité est $\sim 1,15 \cdot 10^{11}$ p/b. Ce résultat est donc en très bon accord avec le résultat de HEADTAIL. De plus des mesures effectuées au SPS dans le passé ont révélé un seuil d'instabilité à $\sim 0.6 \cdot 10^{11}$ p/b. L'impédance des kickers semble donc contribuer pour $\sim 50\%$ de l'impédance totale du SPS responsable de cette instabilité. Le fait que l'impédance totale des kickers (en 2006) contribue pour $\sim 50\%$ de l'impédance totale est en bon accord avec d'autres estimations et mesures.

Conclusion et perspectives

Ce stage de cinq mois effectué au sein du groupe AB-ABP avait pour objectif principal : **la création d'une nouvelle base de données, ZBASE3, permettant l'étude de l'impédance sur l'ensemble des accélérateurs du CERN.** Après avoir pris en main le langage Tcl/Tk, ainsi que le logiciel *Mathematica* et analysé les principes de fonctionnement de ZBASE, j'ai pu élaborer la nouvelle base de données ZBASE3.

ZBASE3 remplit les conditions établies par le groupe AB-ABP :

- elle possède une interface graphique conviviale simple d'utilisation,
- elle est reliée au logiciel *Mathematica* pour les calculs d'impédance de paroi résistive et la conversion en wakefield (champ de sillage),
- elle est une base de données évolutive pouvant être réactualisée.

Les données sur les collimateurs du LHC et des kickers du SPS ont été entrées par l'interface graphique de ZBASE3.

L'impédance transversale (X, Y) totale de chaque élément, (des collimateurs du LHC et des kickers du SPS) a été calculée puis convertie en wakefield (champ de sillage) par le logiciel *Mathematica*. Ce wakefield peut être utilisé par le programme HEADTAIL pour simuler la dynamique du faisceau à l'intérieur d'un paquet de particules. Les résultats obtenus par ZBASE3 sur l'impédance transversale totale du SPS sont en accord avec les calculs théoriques et les mesures expérimentales. Toutefois, certains fichiers issus de *Mathematica* sont encore en phase d'étude. Des problèmes sont apparus lors de la conversion de l'impédance des collimateurs du LHC en wakefield. Une solution est en cours d'investigation.

Prochainement, un programme écrit en *Mathematica* calculant l'impédance longitudinale sera relié à ZBASE3. Ainsi, l'impédance totale transversale et longitudinale pourra être calculée sur l'ensemble des accélérateurs du CERN. Les programmes HEADTAIL et MTRISIM (simulant les instabilités de paquets couplés) seront liés à ZBASE3. L'utilisateur pourra par l'interface graphique réaliser des simulations de dynamique du faisceau.

Ce stage effectué au CERN m'a permis d'approfondir mes connaissances sur les accélérateurs de particules et de découvrir l'importance des moyens mis en œuvre lors du développement et de la construction du LHC. D'un point de vue technique, ce stage a été une expérience très enrichissante. L'élaboration d'un logiciel m'a permis de mettre en pratique mes connaissances acquises en programmation à l'IUP.

D'un point de vue relationnel, l'évolution dans un centre européen m'a donné la possibilité de pratiquer l'anglais régulièrement et de rencontrer des personnes me faisant découvrir de nouvelles cultures.

Bibliographie

- [1] M. MARTINI, An Introduction to Transverse Beam Dynamics in Accelerator, CERN/PS 96-11 (PA), [<http://doc.cern.ch/archive/electronic/cern/preprints/ps/ps-96-011.pdf>].
- [2] D. Möhl, On Landau Damping of Dipole Modes by Non-Linear Space Charge and Octupoles, CERN/PS 95-08 (DI), 1995.
- [3] M.H Blewett (ed.), Theoretical Aspects of the Behaviour of Beams in Accelerators and Storage Rings : International School of Particle Accelerators of the 'Ettore Majorana' Centre for Scientific Culture, 10-22 November 1976, Erice, Italy, Cern report 77-13 (1977).
- [4] E. Métral et al., Resistive Wall Impedance of an Infinitely Long Multi-Layer Cylindrical Beam Pipe, Proc. PAC2007, Albuquerque, New Mexico, USA, June 25-29, 2007.
- [5] <http://public.web.cern.ch/public/Welcome-fr.html>. CERN informations.
- [6] <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/index.html>. ATLAS informations.
- [7] <http://aliceinfo.cern.ch/>. ALICE informations.
- [8] <http://cms.cern.ch/>. CMS informations.
- [9] <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>. LHCb informations.
- [10] Robert-Demolaize, G. Design and Performance Optimization of the LHC Collimation System, CERN-THESIS-2006-069, 2006.
- [11] T. Kroyer et al., Longitudinal and Transverse Wire Measurements for the Evaluation of Impedance Reduction Measures on the MKE Extraction Kickers, AB-Note-2007-028, 2007.
- [12] Brüning Oliver S, ZBASE User's Guide Version 1.2 An Impedance DATA BASE Program, CERN SL (AP), 1996.
- [13] Wolfram Research, Inc., The Mathematica book Edition 5th ed., Imprint Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2003. - 1464 p.
- [14] G. Rumolo and Zimmermann, Practical User Guide for HEADTAIL, CERN-SL-Note-2002-036 AP.
- [15] Y.H. Chin, User's Guide for New MOSES Version 2.0 (Mode-coupling Single bunch instability in an Electron Storage ring), CERN/LEP-TH:88-05, 1988.

ANNEXE 1

Exemple de la procédure *selectfile* permettant de naviguer dans la base de données ZBASE3 :

```
#####
# Listing the items in the display window for selection in the Rewall Interface:
#####
proc selectfile {entry1} {
    global LIN BIN DATA2 SCRTPM TMP ZBASE HOME NOSEL DIR SOURCE OUTPUTFILE machine group item
    ifile EDITOR sselectfile stitle

    .disp.msg delete 0 end
    set sselectfile $entry1
    set stitle $entry1

    set list [exec $BIN/ls $DATA2]
    if {$stitle == 3}{.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Collimator"}
    if {$stitle == 8}{.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Kicker " }
    if {$stitle == 5}{.disp.msg insert end "Choose File to convert Impedance to WakeField " }
    if {$stitle == 6}{.disp.msg insert end "Choose File to convert WakeFiled to Impedance " }
    if {$stitle == 9}{.disp.msg insert end "ViewFile" }
    if {$stitle == 10}{.disp.msg insert end "Choose the DataMachine to compute Impedance"}
        foreach i $list {
            .disp.msg insert end $i
        }

    bind .disp.msg <Double-Button-1> {
        set path [selection get]
        set list [exec $BIN/ls $DATA2/$path]
        .disp.msg delete 0 end
        if {$stitle == 3}{.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Collimator"}
        if {$stitle == 8}{.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Kicker " }
        if {$stitle == 5}{.disp.msg insert end "Choose File to convert Impedance to WakeField " }
        if {$stitle == 6}{.disp.msg insert end "Choose File to convert WakeFiled to Impedance " }
        if {$stitle == 9}{.disp.msg insert end "ViewFile" }
        if {$stitle == 10}{.disp.msg insert end "Choose the DataMachine to compute Impedance"}
            wm title . "File Entries: $path"
            .disp.msg insert end ".."
            foreach i $list {
                .disp.msg insert end $i
            }
        bind .disp.msg <Double-Button-1> {
            set item [selection get]
            if {[file isdirectory $DATA2/$path/$item] == 1} {
                set path $path/$item
                set icount [expr [string length $DATA2]+1]
                set path [string range $DATA2/$path $icount end]
                if {[file isdirectory $DATA2/$path] != 1} {
                    set list [exec $BIN/ls $DATA2/$path]
                    .disp.msg delete 0 end
                }
            }
            if {$stitle == 3}{.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Collimator"}
            if {$stitle == 8}{.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Kicker " }
            if {$stitle == 5}{.disp.msg insert end "Choose File to convert Impedance to WakeField " }
            if {$stitle == 6}{.disp.msg insert end "Choose File to convert WakeFiled to Impedance " }
            if {$stitle == 9}{.disp.msg insert end "ViewFile" }
```

```

if {$stitle == 10}{.disp.msg insert end "Choose the DataMachine to compute Impedance"}
  wm title . "File Entries: $path"
  if {[file isdirectory $DATA2/$path/./data] != 1} { .disp.msg insert end ".." }
    foreach i $list {
      .disp.msg insert end $i
    }

    if {[file isdirectory $DATA2/$path] == 1} {
      set list1 [exec $BIN/ls $DATA2/$path]
      .disp.msg delete 0 end
    }
}

if {$stitle == 3}{.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Collimator"}
if {$stitle == 8}{.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Kicker " }
if {$stitle == 5}{.disp.msg insert end "Choose File to convert Impedance to WakeField " }
if {$stitle == 6} { .disp.msg insert end "Choose File to convert WakeFiled to Impedance " }
if {$stitle == 9} { .disp.msg insert end "ViewFile" }
if {$stitle == 10}{.disp.msg insert end "Choose the DataMachine to compute Impedance "}
  wm title . "File Entries: $path"
  if {[file isdirectory $DATA2/$path/./data] != 1} { .disp.msg insert end ".." }
    foreach i $list1 {
      .disp.msg insert end $i
    } }

if {$sselectfile == 3} {
if {[file isfile $DATA2/$path/$item] == 1} {
.disp.msg delete 0 end
.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Collimator "
.disp.msg insert end "copy InputFile"
.disp.msg insert end ".."
exec $BIN/cp $DATA2/$path/$item $SOURCE/InputCalculation/Inputcoll.dat
}
}

if {$sselectfile == 5} {
if {[file isfile $DATA2/$path/$item] == 1} {
.disp.msg delete 0 end
.disp.msg insert end "Choose File to convert Impedance to WakeField "
.disp.msg insert end "copy Input for ImpedToWake"
.disp.msg insert end ".."
exec $BIN/cp $DATA2/$path/$item $SOURCE/InputCalculation/Impedance.dat
}
}

if {$sselectfile == 6} {
if {[file isfile $DATA2/$path/$item] == 1} {
.disp.msg delete 0 end
.disp.msg insert end "Choose File to convert WakeField to Impedance "
.disp.msg insert end "copy Input for WakeToImped"
.disp.msg insert end ".."
exec $BIN/cp $DATA2/$path/$item $SOURCE/InputCalculation/Wakefield.dat
}
}

if {$sselectfile == 8} {
if {[file isfile $DATA2/$path/$item] == 1} {
.disp.msg delete 0 end
.disp.msg insert end "Choose InpuFile to compute Impedance for the Kicker "
.disp.msg insert end "copy Input for Kicker Impedance"
.disp.msg insert end ".."
exec $BIN/cp $DATA2/$path/$item $SOURCE/InputCalculation/Inputkicker.dat
}
}

if {$sselectfile == 9} {
if {[file isfile $DATA2/$path/$item] == 1} {
fdisplay $path $item
}
}

```

```

    }
  }
  if {${sselectfile} == 10} {
  if {[file isfile $DATA2/$path/$item] == 1} {
    .disp.msg delete 0 end
    .disp.msg insert end "Choose the DataMachine to compute Impedance for the Kicker "
    .disp.msg insert end "copy DataMachine for Kicker Impedance"
    .disp.msg insert end ".."
    exec $BIN/cp $DATA2/$path/$item $SOURCE/InputCalculation/DataMachine.dat
  }
}
} } }

```

ANNEXE 2

Exemple d'un shellscript utilisé pour lancer un fichier *Mathematica* en batch :

```

#!/usr/local/bin/tcsh

cd /afs/cern.ch/user/z/zdata/public/tmp/ImpedanceKickers
set TARGETDIR = /afs/cern.ch/user/z/zdata/public/tmp/ImpedanceKickers
if ( -f mtrack1.job ) then
rm mtrack1.job
endif
cat > mtrack1.job <<endofmyjob
#
# Now for some reason your batch job will run in a temporary
# directory (I could of course just cd somewhere but.....)
# this means we have to copy the input to it
# However your output files are all returned automatically
# even the input file as well unless we remove it.....
#
# get the input file
echo "I have started on `hostname`"
set verbose
#
cp
${TARGETDIR}/afs/cern.ch/eng/lhc/impedance/zbase/source/rewall/ReWallKicker.m
.
/afs/cern.ch/project/parc/bin/math52 <
/afs/cern.ch/eng/lhc/impedance/zbase/source/rewall/ReWallKicker.m
endofmyjob
# THE END OF YOUR JOB
set STAT = $?
# above checks that the cat worked.
# the line endofmyjob is vital to terminate the cat
# (no trailing spaces either!)
if ( ! ${STAT} == 0 ) exit 99
#
chmod 744 mtrack1.job
fs flush mtrack1.job
bsub -J ImpedanceKicker -e error1.out -q lnh mtrack1.job
# all done; maybe we check our status
bjobs
echo " You can use bjobs or bjobs -l for details "
echo " or bpeek <job id> to look at the output"

```

```
echo " while your job is running."  
echo " use bkill to kill jobs "
```