

**Sûreté de fonctionnement dans les accélérateurs de particules : le système de protection
des éléments supraconducteurs dans le Large Hadron Collider du CERN**

F. Rodriguez Mateos¹, G. Rojat² et P. Venet²

¹ CERN-TS-HDO, Genève

² Université Claude Bernard, Villeurbanne

COMMUNICATION DANS LES JOURNEES DU CLUB EEA

« Diagnostic en Electronique, Electrotechnique et Automatique »

17-18 Mars 2005 Lyon

Titre

Sûreté de fonctionnement dans les accélérateurs de particules : Le système de protection des éléments supraconducteurs dans le Large Hadron Collider du CERN

Auteurs

Félix Rodríguez Mateos, CERN-TS-HDO, Genève, felix.rodriguezmateos@cern.ch
Prof. Gérard Rojat, Université Claude Bernard, Villeurbanne, rojat@cegely.univ-lyon1.fr

Pascal Venet, Université Claude Bernard, Villeurbanne, venet@cegely.univ-lyon1.fr

Lignes générales

Deux des caractéristiques du nouvel accélérateur nommé *Large Hadron Collider* (LHC, le collisionneur à protons en phase de construction au CERN, à Genève) sont la grande densité d'énergie présente dans les deux faisceaux de particules subatomiques, et l'immense quantité d'énergie stockée dans le système magnétique distribué autour des 27 km de tunnel souterrain à proximité de la frontière franco-suisse. Plusieurs systèmes assurent la protection des équipements très coûteux (des aimants supraconducteurs par exemple) situés autour des tubes où circulent les faisceaux. Parmi ces systèmes –qui seront brièvement énumérés- le QPS (acronyme de l'anglais pour *Quench Protection System*) a pour rôle de détecter les possibles transitions résistives (*quench*) dans les supraconducteurs et de garantir que la décharge d'énergie stockée dans les circuits électriques des aimants soit réalisée de façon sûre et fiable.

Après une introduction au LHC, les grandes lignes des composants du QPS seront présentées, en soulignant les aspects fondamentaux liés à la sûreté et la fiabilité. Quelques exemples illustreront le programme spécial de validation des composants électroniques mis en oeuvre pour étudier les aspects de tenue à la radiation et au vieillissement. Finalement, nous discuterons des aspects intéressants du diagnostic et de la maintenance d'un tel système.

Petite biographie

Félix Rodríguez Mateos

Ingénieur Supérieur (Techniques de l'Energie, Ingénierie Nucléaire) de l'Université Polytechnique de Barcelone, travaille au CERN depuis 1989 : d'abord comme ingénieur dans le domaine des aimants supraconducteurs, puis comme chef de

section et responsable du système QPS pour le LHC, et actuellement dans la coordination technique pour la mise en marche des systèmes de l'accélérateur.

Prof. Gérard Rojat

Docteur d'Etat Es-Sciences physiques et Professeur à l'Université Claude Bernard de Lyon depuis 1997, travaille sur la sûreté de fonctionnement des systèmes électriques, sur le stockage de l'énergie et sur les composants passifs et composants hybrides de l'Electronique de Puissance.

Pascal Venet

Docteur en Génie Electrique en 1993 et Maître de conférences à l'Université Claude Bernard de Lyon depuis 1995, travaille sur l'amélioration de la sûreté de fonctionnement (analyse des défaillances, du vieillissement et application à la maintenance prédictive) des convertisseurs statiques, des dispositifs de stockage d'énergie et en particulier sur les condensateurs et les supercondensateurs.

Mots-clés

Accélérateur de particules, systèmes de protection, sûreté, fiabilité, diagnostic, maintenance.

Index

1. Introduction aux accélérateurs de particules : le Large Hadron Collider
2. La sûreté dans les accélérateurs : pourquoi a-t-on toujours besoin de systèmes plus sophistiqués et performants
3. Le système *Quench Protection* de protection des aimants supraconducteurs en cas de transition résistive
4. La validation de composants électroniques utilisés pour le QPS
5. Aperçu sur l'opération et la maintenance du système QPS : contraintes et diagnostic permanent

Conclusions

Remerciement

1. Introduction aux accélérateurs de particules : le Large Hadron Collider

1.1. Les accélérateurs de particules

La connaissance de la matière est un aspect important de la recherche fondamentale. Elle recouvre les propriétés de l'atome, du noyau et des nucléons, la découverte et les caractéristiques des particules élémentaires, la nature et les propriétés des forces en jeu. Un des objectifs de la physique des hautes énergies est la mise au point d'une grande théorie unifiant les quatre forces primordiales qui sont : l'interaction forte, l'interaction faible, l'électromagnétique et la gravitation. Les accélérateurs des particules fournissent les projectiles indispensables aux expériences qui permettront de confirmer ou infirmer les théories existantes et d'en élaborer de nouvelles [1].

La physique nucléaire se contente, pour l'étude du noyau et de sa structure, de projectiles de quelques dizaines de MeV. La physique des hautes énergies, traitant l'ensemble des particules élémentaires, exige en revanche des énergies supérieures au GeV. Ces énergies sont nécessaires pour la découverte et la production en nombre suffisant de particules élémentaires de plus en plus lourdes et de courte durée de vie. C'est donc la physique des hautes énergies qui justifie la construction d'accélérateurs avec des énergies de plus en plus élevées.

La construction d'accélérateurs de particules visant à obtenir des faisceaux intenses et contrôlables de projectiles d'énergie connue a débuté en 1930. Des progrès considérables ont été réalisés depuis cette date. Un des premiers accélérateurs, construit en 1932 par Cockroft et Walton, accélérât des particules sous 600 keV. Aujourd'hui des protons sont accélérés à des énergies autour de 1 TeV au Laboratoire Fermi près de Chicago et au Laboratoire DESY à Hambourg. Pour sa part, le CERN se prépare à faire fonctionner à partir de 2007 l'accélérateur nommé Large Hadron Collider (LHC).

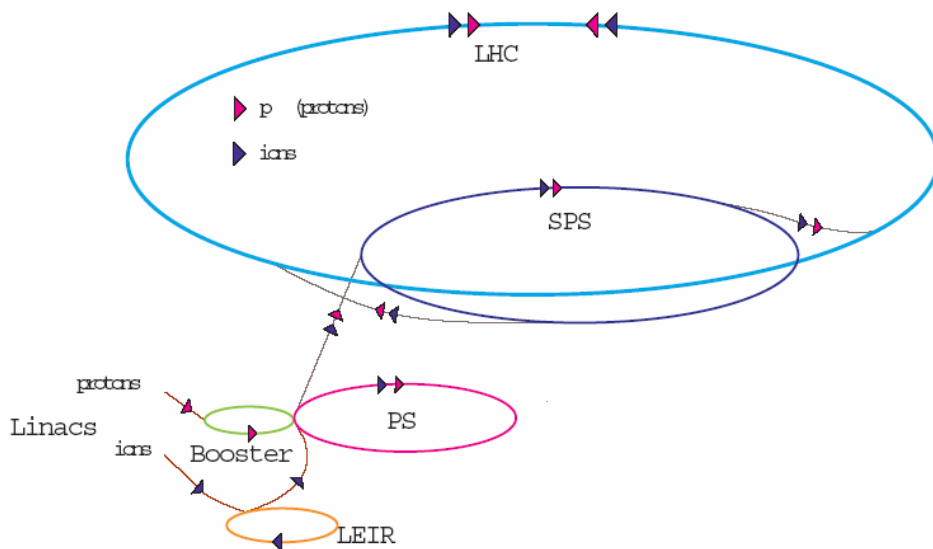


Figure 1 – La chaîne des accélérateurs au CERN : protons et ions lourds peuvent être accélérés depuis les accélérateurs linaires jusqu'à l'anneau principal. Deux faisceaux de particules tournent en sens opposé dans ce dernier

1.2. Le Large Hadron Collider

Le LHC fera collisionner deux faisceaux de protons avec une énergie de 7 TeV chacun. Cette nouvelle machine est en cours d'installation dans un tunnel existant d'une circonférence de 26,8 km à environ 100 m sous terre. Le rayon de l'anneau définit le champ magnétique que doivent fournir les aimants dipolaires qui maintiennent les faisceaux dans leur trajectoires circulaires : 8.33 T. Pour fournir cet énorme champ magnétique en respectant les dimensions imposées par le tunnel existant, seule la technologie de la supraconductivité apporte une réponse satisfaisante. Le LHC est donc – au niveau du système magnétique - une machine fondamentalement supraconductrice.

Par tradition au CERN chaque accélérateur d'une nouvelle génération utilise les infrastructures existantes comme injecteurs. Ainsi le LHC –comme décrit dans la Fig. 1- utilise le PS et le SPS comme pré-accelerateurs dans la chaîne d'injection pour les protons. Le LHC pourra aussi accélérer des ions lourds jusqu'au plomb à une énergie de 5.5 TeV/nucléon.

La luminosité est un autre paramètre qui accompagne l'énergie des particules dans la définition de la performance d'un accélérateur. Ce concept est lié au nombre de particules qui traversent une section unitaire par unité de temps. Par exemple, la valeur que l'on cherche à obtenir pour le LHC est de 10^{34} protons/cm² s⁻¹.

La machine LHC est subdivisée en huit secteurs contenant chacun une zone courbée (arc) et une zone droite à chaque extrémité. Ces secteurs sont séparés par huit points d'accès. Quatre de ces points abritent des cavernes dans lesquelles sont installés les expériences et leurs gigantesques détecteurs (ALICE, ATLAS, CMS et LHC-B) comme indiqué dans la Fig. 2. Dans les quatre autres points on trouve les systèmes techniques nécessaires à l'accélération, à l'extraction du faisceau vers un bloc de dissipation et au maintien des propriétés des faisceaux intègres pour leur exploitation.

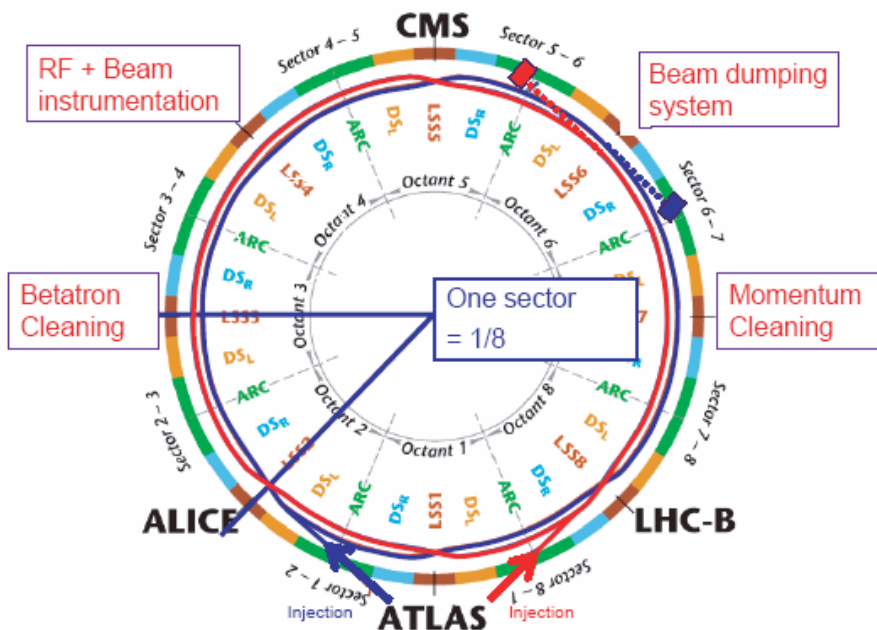


Figure 2 – Schéma de configuration de l'accélérateur LHC

Les arcs ont une longueur d'environ 2452 m et les sections droites d'environ 269 m de part et d'autre des points d'interaction.

Compte tenu du fait que deux faisceaux de protons circuleront en sens inverse, deux tubes à faisceaux sont nécessaires. A titre d'exemple dans le cas des aimants dipolaires (voir Fig. 3), les deux tubes à faisceaux traversent des champs magnétiques opposés. De même le concept du LHC est « deux accélérateurs en un ». Deux faisceaux sont accélérés et guidés en même temps pour leur permettre de se croiser ou d'entrer en collision à des endroits très précis.

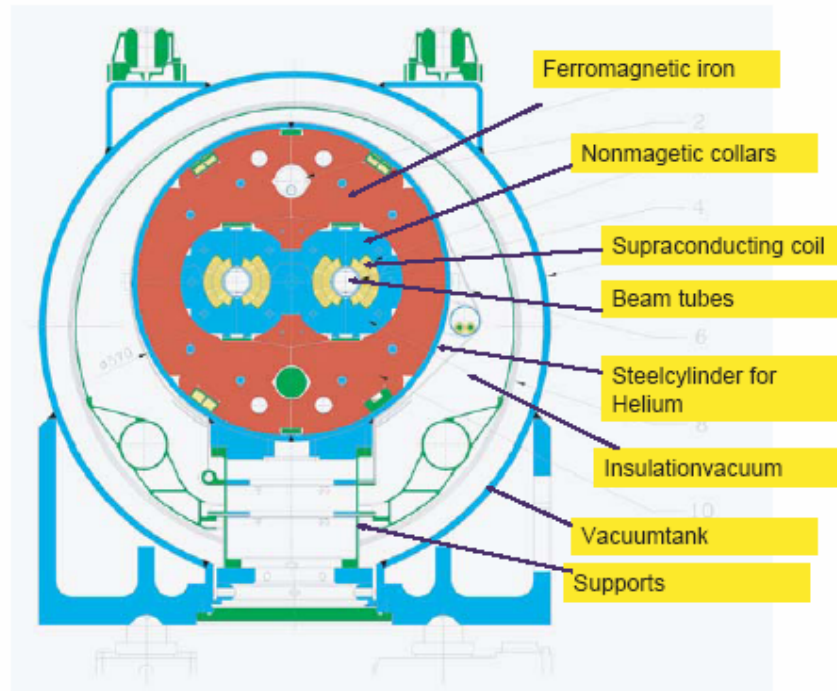


Figure 3 – Section d'un dipôle supraconducteur du LHC. Le LHC comporte 1232 unités comme celle-ci d'une longueur de 15,2 m

Un faisceau de protons « rentre » perpendiculairement au plan du papier par un des tubes de faisceau (*beam tubes*), et l'autre « sort » perpendiculairement par l'autre tube. Les champs magnétiques (verticaux, dans le plan du papier) sont dirigés en sens opposé dans les deux tubes: un vers le haut de la page, l'autre vers le bas.

Chaque arc contient 23 cellules. Chaque cellule contient six dipôles et deux quadripôles à double ouverture. On trouve aussi d'autres aimants spéciaux pour corriger dans le champ magnétique les erreurs des aimants principaux. La Fig. 4 montre la configuration magnétique d'une cellule.

Une particularité importante de cet accélérateur est la production de très basses températures pour l'opération des aimants supraconducteurs. Les bobinages des aimants du LHC sont construits à base d'un alliage de niobium-titane et cuivre qui exige une température de fonctionnement de 1.9 K.

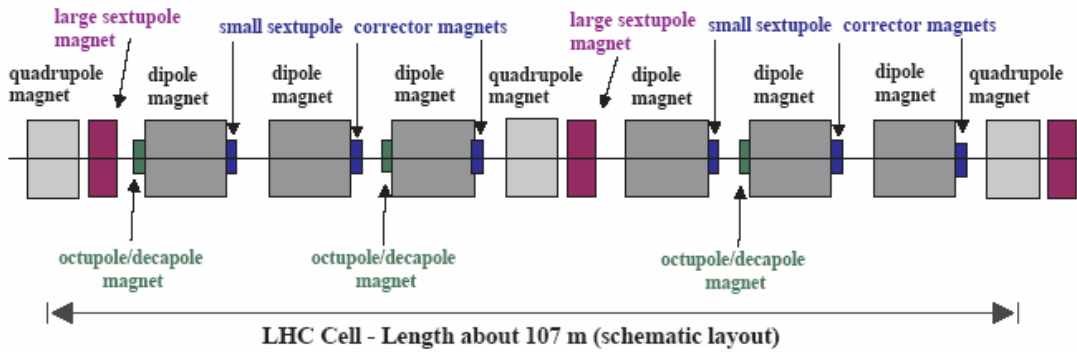


Figure 4 – Configuration d'une cellule régulière dans l'optique du LHC

De manière générale, les aimants appartenant à un arc sont tous connectés en série, ce qui permet de les alimenter en utilisant un seul convertisseur de puissance localisé dans une des extrémités du secteur. A titre d'exemple, tous les dipôles supraconducteurs de la Fig. 4 sont alimentés en série, ce qui donne pour un secteur un total de 154 aimants dans la même chaîne électrique. Dans d'autres cas, l'alimentation peut être fournie à un seul aimant ou à un nombre réduit d'aimants.

2. La sûreté dans les accélérateurs : pourquoi a-t-on toujours besoin de systèmes plus sophistiqués et performants.

2.1. Systèmes de protection

Au cours de ces dernières années l'aspect protection est devenu un sujet de recherche important dans le domaine des accélérateurs [2]. Ceci est dû à l'augmentation continue de l'énergie et de la luminosité (puissance) des faisceaux. D'une part plus l'énergie des particules est élevée et plus la connaissance de la matière peut être approfondie. D'autre part plus l'énergie des particules sera intensifiée et plus les champs magnétiques pour les guider devront être importants. Cette argumentation nous amène aux deux points suivants pouvant être constatés dans l'évolution des accélérateurs :

- a) L'énergie et la puissance liées aux faisceaux deviennent toujours plus grandes, et
- b) L'énergie magnétique stockée dans les circuits des aimants devient toujours plus élevée.

Dans le cas du LHC, l'énergie stockée dans les deux faisceaux de protons est de 700 MJ (équivalente à 130 kg de TNT !). L'énergie magnétique stockée dans les quelque 8000 aimants supraconducteurs (plus de 1600 circuits) est de l'ordre de 10 GJ (suffisante pour faire fondre 12 tonnes de cuivre !).

L'opération d'une telle machine exige :

- d'une part, une quantité non négligeable de systèmes complexes qui doivent assurer la fonction de protection des équipements installés¹ (onéreux et difficiles à remplacer).
- d'autre part, un taux élevé de fiabilité et de disponibilité dans les composants intégrant ces systèmes de sécurité.

Nous allons maintenant énumérer les systèmes de protection les plus importants avec quelques explications succinctes sur leurs fonctions (la terminologie anglaise est conservée pour leur dénomination) :

¹ Les aspects relatifs à la protection de personnes ne sont pas traités dans ce document.

- *Quench Protection System (QPS)* et *Energy Extraction (EE)*

Ces systèmes font l'objet d'une description plus détaillée dans le chapitre suivant.

- *Power Interlock Controller (PIC)*

Cet élément est l'interface entre le QPS et les convertisseurs de puissance qui alimentent les chaînes d'aimants. Sa fonction primordiale est de faire dissiper d'une manière sûre et fiable l'énergie stockée dans ces chaînes.

- *Beam Dumping System (BDS)*

Il s'agit du système qui extrait le faisceau de sa trajectoire circulaire et l'amène vers un bloc en graphite avec un revêtement en béton. Le BDS est composé de deux sous-systèmes, soit un par faisceau. Il est le seul élément de la machine qui peut supporter la dissipation entière de l'énergie des deux faisceaux à intensité nominale. Dans ce cas, le bloc de graphite monte jusqu'à une température de 700 °C.

- *Beam Interlock System (BIS)*

Ce système reçoit des signaux provenant d'éléments qui mesurent des paramètres relatifs aux faisceaux (position, pertes, etc.) déclenchant l'extraction des faisceaux si nécessaire. Le BIS est à l'énergie des faisceaux ce que le PIC est à l'énergie des circuits électriques.

- *Beam Loss Monitors (BLM)* et *Beam Position Monitors (BPM)*

Il s'agit d'éléments qui mesurent respectivement les pertes de faisceau dans le tunnel abritant l'accélérateur, et la position des faisceaux dans le tube où ils circulent. Si les paramètres mesurés sortent d'une plage bien définie, des signaux sont envoyés vers le BIS pour que les faisceaux soient dissipés dans le BDS.

- *Beam Cleaning System (BCS)*

Les collimateurs sont les éléments principaux de ce système. Leur fonction est d'absorber les particules du faisceau qui ne sont pas dans la bonne trajectoire avant qu'elles ne soient perdues, principalement dans les aimants supraconducteurs.

2.2. Etudes de fiabilité

La machine LHC n'atteindra ses buts que si la luminosité reste élevée pendant un temps d'opération suffisamment long (voir le concept de luminosité intégrée). Pour atteindre ces objectifs, les systèmes de protection doivent :

- a) Eviter les dégâts qui pourraient survenir dans l'accélérateur et impliquer des temps d'arrêt éventuellement longs pour le remplacement des éléments endommagés;
- b) Eviter de provoquer des arrêts intempestifs non justifiés (*false triggers*).

Dans les deux cas, le prix à payer serait très lourd : une machine unique qui s'arrête entraîne des coûts très élevés, sans parler du nombre de physiciens qui seraient privés de données.

C'est pour éviter ces aléas que les études de sûreté se sont de plus en plus intégrées dans le monde des accélérateurs. En effet, le LHC est le premier accélérateur pour la physique des particules où fiabilité–disponibilité–maintenance–sécurité (aussi connus par l'acronyme anglais RAMS) font partie intégrale du design des systèmes. Cet aspect est d'autant plus important que les nombreux éléments sont, dans le cas d'une machine qui travaille fondamentalement à des températures cryogéniques, très souvent peu accessibles et dans le cas du LHC répartis sur un tunnel de presque 27 km. Les temps de réparation sont des paramètres dont il faut tenir compte depuis les phases initiales de la conception.

3. Le système QPS de protection des aimants supraconducteurs en cas de transition résistive

Un *quench* est une transition de l'état supraconducteur d'un câble à l'état résistif (aussi appelé état « normal »). Cela signifie que lorsqu'une transition de ce type arrive, un volume de câble dans un circuit n'est plus supraconducteur et commence à dissiper l'énergie magnétique stockée en chaleur par effet Joule. Les raisons d'une telle transition peuvent être très diverses. Mais dans le cas d'un accélérateur, la cause la plus importante et probable est les échauffements dus aux pertes de faisceau. Si l'on ne prend pas les précautions nécessaires, les effets d'un *quench* peuvent être destructifs (températures et tensions électriques élevées).

Les techniques qui ont pour but la dissipation de l'énergie magnétique sans risque pour les éléments supraconducteurs reçoivent le nom de « *Quench Protection* ». Un système complexe est mis en œuvre pour la protection des éléments supraconducteurs du LHC : c'est le QPS [3]. Nous présentons ensuite les traits les plus importants.

3.1. Détection des transitions

Si une transition apparaît au sein d'un câble supraconducteur d'un aimant, l'augmentation de la résistance doit être détectée dans les quelques millisecondes qui suivent. Cette tâche de détection est confiée aux éléments électroniques appelés *quench detectors*. Ils répondent fondamentalement à deux types :

- Analogiques – Les chutes résistives sont obtenues en comparant les tensions totales aux bornes de deux inductances de valeur égale (par exemple, deux moitiés d'un aimant, voir Fig. 5) [4].

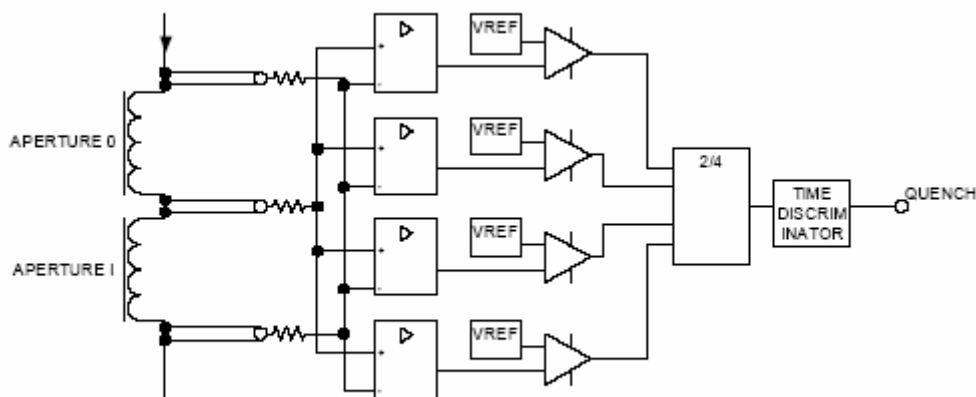


Figure 5 – Détecteur analogique de transition résistive

- Numériques – A partir d'une mesure de la tension totale et du calcul de la variation temporelle du courant, on déduit la chute résistive comme différence entre la tension totale et la valeur de $L \cdot di/dt$. L'inductance L de l'aimant ou circuit doit être connue avec une certaine précision. Il faut tenir compte du fait que l'inductance d'un aimant supraconducteur dépend du niveau de courant (saturation) et également du di/dt

(courants de Foucault). L'utilisation de processeurs est tout à fait adaptée à ce type de tâches.

Au total, il y a environ 4000 détecteurs connectés aux éléments supraconducteurs de la machine LHC.

3.2. Stratégies de protection dans le LHC

Une fois le *quench* détecté, il faut entreprendre une série d'actions qui dépendent fortement du type d'aimant (la quantité d'énergie stockée, la durée de la constante de temps souhaitée pour la décroissance du courant, la densité de courant dans le cuivre stabilisateur, etc.). Pour ce faire :

a) Une technique consiste à chauffer les aimants avec des chaufferettes internes pour que la résistance se propage rapidement et que l'énergie soit dissipée dans le plus grand volume possible. Ceci permettra de contrôler la valeur de la température maximale dans les bobines. Les éléments de chauffe ou « chaufferettes » (*quench heaters*) sont alimentés par des bancs de condensateurs qui sont déchargés sur les résistances grâce à l'enclenchement de deux thyristors. Le schéma basique apparaît dans la Fig. 6. Les condensateurs et les thyristors ont fait l'objet d'un programme exhaustif de tests pour qualifier ces composants au niveau de la tenue aux radiations [5] et du vieillissement (voir chapitre 4).

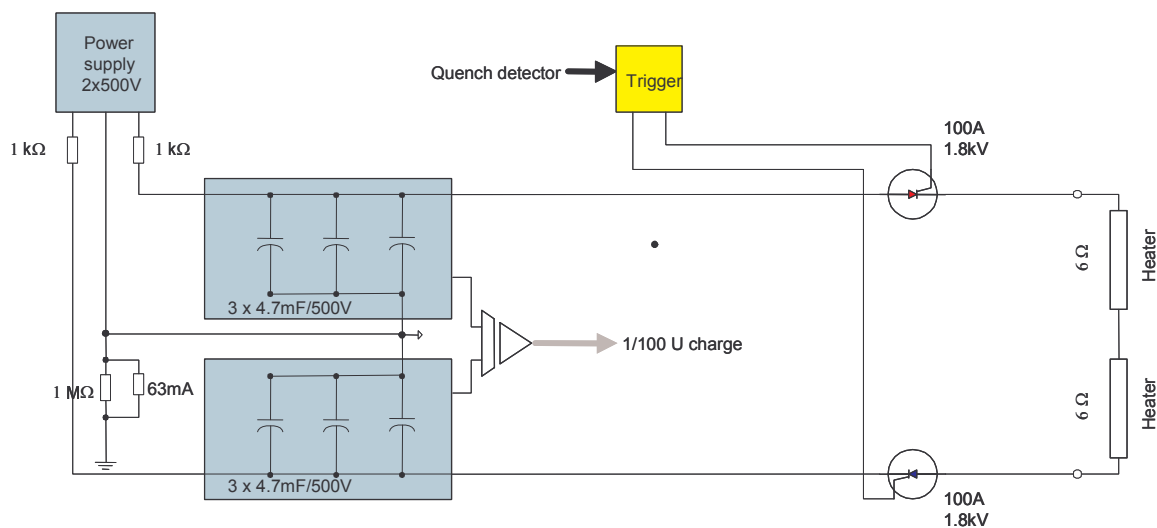


Figure 6 – Schéma de principe d'une alimentation pour les chaufferettes de protection. Plus de 6000 unités seront installées dans le tunnel LHC pour la protection des aimants principaux

b) Une autre technique consiste à installer un by-pass semi-conducteur ou résistif pour qu'une commutation du courant ait lieu vers l'élément de by-pass quand l'aimant transite et que sa résistance commence à augmenter,.

c) Le LHC utilise des éléments appelés extracteurs d'énergie spécialement conçus pour les longues chaînes d'aimants connectés en série. Il s'agit de très grosses résistances (pouvant atteindre plusieurs tonnes) qui travaillent en parallèle à un système de disjoncteurs. Quand il faut désexciter le circuit, ces disjoncteurs, qui sont normalement fermés, s'ouvrent en incluant la résistance d'extraction en série avec

les aimants. Le convertisseur de puissance est arrêté et la constante de temps obtenue est $N \cdot L_{\text{aimant}} / R_{\text{extraction}}$ si N est le nombre d'aimants dans le même circuit. Le cas des dipôles principaux du LHC est décrit dans la Fig. 7. Chaque aimant est équipé d'une diode de by-pass qui entre en conduction seulement au moment où l'aimant correspondant fait une transition résistive. Quand cet événement se produit, les disjoncteurs du système d'extraction s'ouvrent. De ce fait le courant décroît avec une constante de temps d'environ 100 secondes dans les aimants qui n'ont pas transité. Dans le cas de l'aimant qui a transité, le courant (environ 12 kA) passe dans la diode en moins d'une seconde. Cette action est provoqué par la dissipation de la chaleur de la chaufferette élevant ainsi la température du bobinage et par voie de conséquence sa résistance électrique. Le système d'extraction d'énergie dissipe l'énergie des aimants qui n'ont pas transité. Pour les aimants qui transitent à l'état résistive, leur propre énergie est dissipée dans leurs bobines. En effet, la diode en conduction ne permet pas d'échange d'énergie entre l'aimant correspondant et le reste de la chaîne.

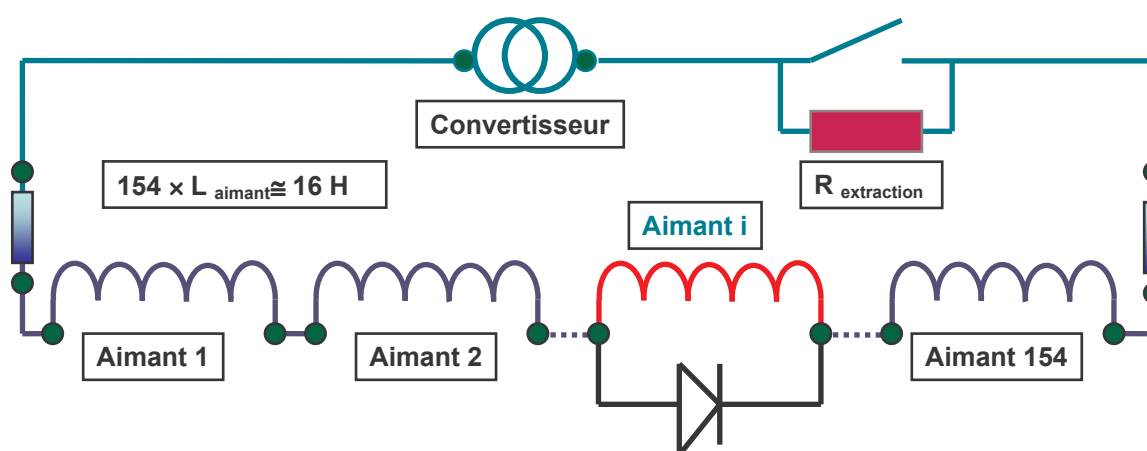


Figure 7 – Schéma électrique d'une chaîne composée de 154 aimants dipolaires du LHC

En raison de sa fonction primordiale, du nombre d'éléments électriques, électroniques et électro-mécaniques qui le forment, ainsi que des conditions difficiles de son environnement (radiation, difficulté d'accès, etc), le QPS a été un des premiers systèmes du LHC pour lequel les études de RAMS ont fait partie du design des composants et sub-systèmes [6].

Le programme suivi pour ces études peut être résumé comme suit :

- Validation théorique et expérimentale des principes de protection appliqués,
- Validation des composants au niveau des radiations, du vieillissement et de la compatibilité électromagnétique (CEM) ;
- Modélisation des éléments en utilisant des programmes et outils commerciaux, mais aussi des programmes d'analyse faits « sur mesure » au CERN (voir chapitre 5 dans [6]),
- Optimisation du « design » des éléments principaux (détecteurs de transition, systèmes de extraction d'énergie, alimentations des chaufferettes de protection, etc..) par rapport au nombre de failles dangereuses et au nombre d'arrêts intempestifs non nécessaires,
- Définition de la stratégie pour le monitoring pendant l'opération ainsi que des lignes directrices de maintenance et réparation (voir chapitre 5 dans ce document),

- Estimation de l'impact des failles du système QPS dans le temps inopérant de l'accélérateur,
- Analyse de la sensibilité par rapport aux données de fiabilité, au nombre de transitions résistives prévu, etc.,
- Validation de tout ce qui précède après les premiers mois d'opération en 2007-2008.

4. La validation de composants électroniques utilisés pour le QPS [7]

Vis à vis de la fiabilité du système total, il est primordial de qualifier les composants principaux à risque, à savoir les condensateurs électrolytiques à l'aluminium et les thyristors. Il suffit pour s'en convaincre d'effectuer, en utilisant les recueils de données de fiabilité, le MTBF (temps moyen entre défaillances) des 6000 alimentations de chaufferettes en ne considérant que les condensateurs et les thyristors. Ce calcul tient compte de la redondance active mise en place sur les alimentations de chaufferettes (cf. Fig. 6) qui autorise les défaillances les plus probables à savoir la défaillance par circuit ouvert de deux condensateurs sur six et la défaillance par court-circuit d'un thyristor sur deux.

Plusieurs configurations de pannes sont possibles selon le type de défaillances des composants (court-circuit ou circuit ouvert). Les spécifications à partir desquelles les calculs des taux de défaillance de chaque composant sont effectués prennent en compte la période où celui-ci est constant (partie II de la courbe en baignoire du taux de défaillance en fonction du temps représenté sur la Fig. 8). Les défaillances d'un condensateur électrolytique à l'aluminium dans cet intervalle de temps peuvent conduire soit à un circuit ouvert, soit à un court-circuit. Les mécanismes de défaillances généralement constatés pour les thyristors engendrent un court-circuit anode cathode. Une alimentation de chaufferette est considérée défaillante si elle ne garantit pas une énergie minimum de 1,8 kJ. Compte tenu des modes de défaillances de chaque composant décrit précédemment, nous avons pris en compte les deux cas critiques suivants pour calculer le MTBF de l'ensemble des alimentations de chaufferettes.

Cas n°1 : Défaillance des condensateurs et/ou des thyristors par court-circuit. Ce mécanisme de panne implique qu'aucun condensateur ne soit défectueux, et qu'au moins un thyristor sur deux soit fonctionnel.

Cas n°2 : Défaillance des condensateurs par circuit ouvert et/ou des thyristors par court-circuit. La protection du LHC est assurée si seulement un condensateur dans chaque branche en parallèle (cf. Fig 6) et/ou un seul thyristor est défaillant.

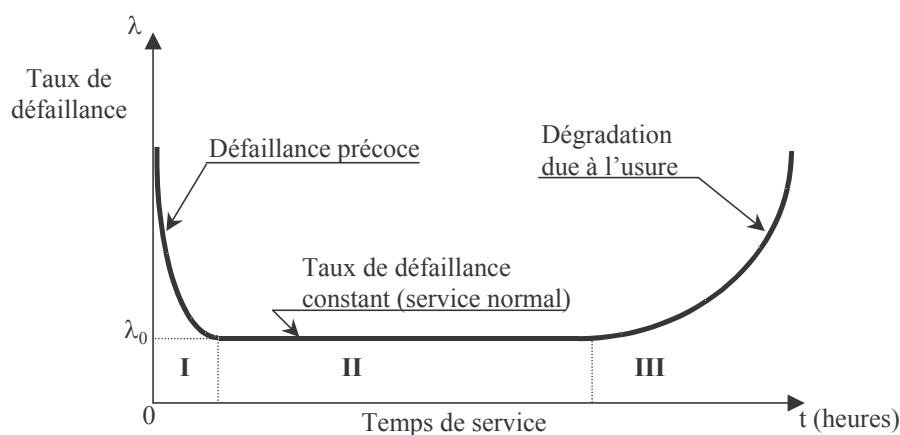


Figure 8 – Taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps.

Les alimentations de chaufferette sont considérées comme un système série vis à vis de la fiabilité car la défaillance de l'une d'entre-elles peut entraîner un arrêt de l'ensemble du LHC.

Les calculs des MTBF sont effectués pour ces deux cas et grâce à l'utilisation de différents recueils de fiabilité. Les résultats sont présentés sur la Fig. 9.

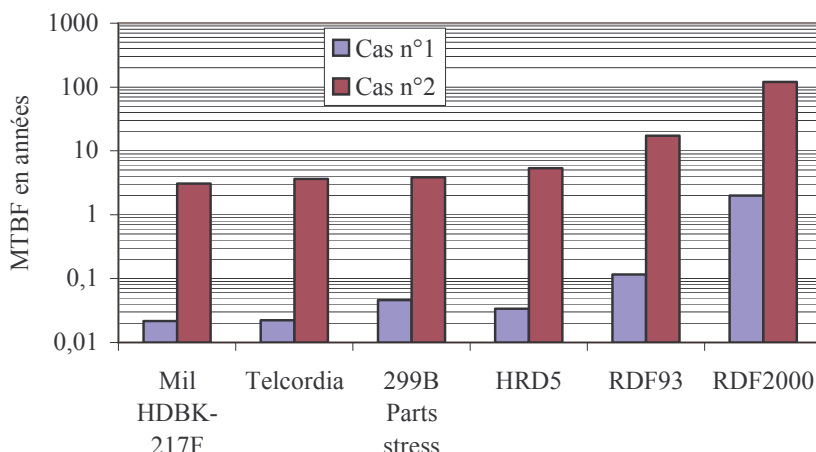


Figure 9 – MTBF des 6000 alimentations de chaufferettes calculés avec différents recueils de données de fiabilité.

Compte tenu du nombre important d'alimentations, les MTBF calculés à partir des différents recueils sont très faibles dans le cas n°1. Cela s'explique car ce dernier considère une défaillance des condensateurs par court-circuit où aucune redondance n'a été envisagée. Les modes de défaillances par court-circuit sont principalement liés à des défauts intervenant lors du processus de fabrication des condensateurs (tels que la présence sur une électrode ou dans les papiers séparateurs de particules de métal, un défaut local de la couche d'oxyde ou un papier trop fin). La qualification des composants permet d'identifier les fabricants réalisant un processus de fabrication de bonne qualité.

Les MTBF calculés par le cas n°2 indiquent un temps souvent inférieur au temps d'exploitation de 20 années prévu pour le LHC. Une maintenance efficace (cf. chapitre 5) et des essais de vieillissement de composants sont nécessaires.

Les différences importantes entre les différents recueils de données de fiabilité peuvent être en partie expliquées par le fait qu'ils privilégient plus ou moins certains facteurs d'influence [8] comme les contraintes électriques, la qualité, l'environnement, la température. La diversité de ces résultats confirme l'intérêt d'effectuer des vieillissements accélérés dans des conditions les plus proches du profil de mission du système.

Les essais de vieillissements accélérés permettent d'une part de déceler les défauts de fabrication et d'autre part de révéler les défauts possibles lors de l'utilisation ainsi que ceux liés à l'usure. Ils permettent ainsi d'observer la dégradation avec le temps des caractéristiques et de ce fait la partie III de la courbe en baignoire (cf. Fig. 8) peut être considérée.

Une campagne exhaustive de tests comprenant radiation, vieillissement et effets combinés a été réalisée. Ces études ont permis de valider le choix de condensateurs et thyristors qui ont été retenus pour la production industrielle des alimentations.

A titre d'exemple, nous pouvons observer l'influence du vieillissement des condensateurs électrolytiques sur l'énergie à fournir à la chaufferette. Lors d'un vieillissement la résistance équivalente série des condensateurs (ESR) augmente suivant une loi exponentielle et la capacité diminue quasi linéairement [7]. Ces variations sont dépendantes de la température suivant une loi d'Arrhenius. La prise en compte de celles-ci ainsi que des variations de la tension d'alimentation des condensateurs permet de représenter sur la Fig. 10 la modification de la distribution de l'énergie fournie à la chaufferette en fonction du temps de vieillissement des condensateurs. Nous pouvons constater sur cette figure qu'un chevauchement avec l'énergie minimum à fournir à la chaufferette n'est probable que pour des temps supérieurs à 30 ans, ce qui est supérieur au temps d'exploitation prévu.

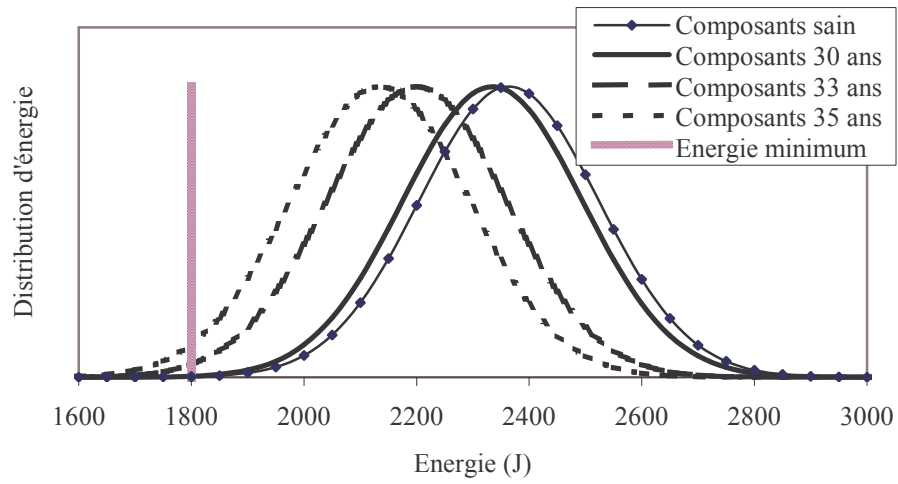


Figure 10 – Distribution de l'énergie en fonction du vieillissement des condensateurs.

5. Aperçu sur l'opération et la maintenance du système QPS : contraintes et diagnostic permanent

Un niveau raisonnable de redondance a été intégré dans le « design du système » de protection QPS pour tous les éléments ayant une fonction essentielle pour l'intégrité des systèmes protégés.

Il est nécessaire que le QPS donne au système de protection général (PIC) le feu vert pour que la machine LHC puisse commencer à opérer. Il a été décidé que ce signal ne sera donné que lorsque la totalité des éléments et sub-systèmes du QPS sera disponible.

Tous et chacun des éléments de protection dans QPS peut être vérifié à l'aide des deux méthodes suivantes:

- Signaux de cohérence et d'état.

Ce sont des signaux qui indiquent aux opérateurs si l'ensemble des canaux de décision dans les détecteurs de transition indiquent la même sortie. Il s'agit d'un diagnostic *on line* qui fournit des informations sur la fiabilité des détecteurs (et non pas sur leur disponibilité en cas de *quench*).

- Mode de test

Il est également possible de vérifier le fonctionnement de tous les éléments critiques de protection en faisant entrer le système en mode test. Ceci implique qu'il ne peut y avoir ni faisceau dans la machine ni courant dans les circuits. Une fois par mois ce mode sera appliqué avec des procédures automatiques lors d'arrêts programmés. Il s'agit d'un diagnostic *off line*.

Lors de l'opération de la machine, il peut arriver que quelques redondances soient perdues. Sauf en cas de dangers réels (qui restent exceptionnels), aucune action n'est entreprise et les faisceaux peuvent continuer à tourner. Lors du prochain arrêt programmé, les spécialistes du QPS répareront les pannes pour pouvoir obtenir une disponibilité de 100% et donner ainsi le feu vert pour la période d'opération suivante.

Conclusions

Le concept de sûreté appliqué aux installations des accélérateurs de particules est devenu un aspect important qui est, d'ores et déjà, considéré dès la phase de design des systèmes critiques qui font partie de ces installations qui cherchent toujours une disponibilité croissante.

La qualification de composants électroniques est une condition nécessaire -mais certes pas suffisante- pour garantir un fonctionnement fiable avec des temps optimaux d'utilisation. Un exemple particulier lié à l'un des systèmes de protection du nouvel accélérateur LHC a été décrit, ainsi que la stratégie prévue pour faire le monitoring et pour maintenir sa disponibilité au cours des années de fonctionnement.

Remerciement

Les auteurs aimeraient reconnaître le travail impeccable et les contributions fondamentales de Frédéric Périssé (étudiant de doctorat à l'Université Claude Bernard - Lyon1 jusqu'en juillet 2003) et de Reiner Denz (AT-MEL, CERN).

Références

- [1] Introduction aux accélérateurs de particules, P. Germain, Genève 1989, CERN-89-07, Révision 13/28-11-2003.
- [2] Machine Protection Issues and Strategies for the LHC, R. Schmidt et al., EPAC 2004, Lucerne, LHC Project Report 784.
- [3] The Protection System for the Superconducting Elements of the Large Hadron Collider at CERN, F. Rodriguez-Mateos et al. Particle Accelerator Conference, 1999.
- [4] Detection of Resistive Transitions in LHC Superconducting Components, R. Denz et F. Rodríguez-Mateos. Publication présentée à Particle Accelerator Conference, 18-22 Juin 2001, Chicago, USA.
- [5] Radiation Tolerance of Components Used in the Protection System of LHC Superconducting Elements, R. Denz et F. Rodríguez-Mateos. Publication présentée à Radiation Effects on Components and Systems Conference (Radecs), 19-20 September 2002, Padoue, Italie.
- [6] Reliability of the Quench Protection System for the LHC Superconducting Elements, Antonio Vergara Fernández, Thèse de Doctorat, CERN-THESIS-2004-019.
- [7] Etude et analyse des modes de défaillances des condensateurs électrolytiques à l'aluminium et des thyristors, appliquées au système de protection du LHC (Large Hadron Collider), Frédéric Périssé, Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard de Lyon, 2003.
- [8] A Comparison of Electronic-Reliability Prediction Models, Jones J. Hayes J., IEEE transaction on Reliability, Vol. 48, N2, June 1999, pp 127-134.
- [9] Behavioral Study On The Reliability Of Electrolytic Capacitors Of Various ManUFACTURERS, F. Périssé, P. Venet, G. Rojat ,13 th European Safety and Reliability International Conference, ESREL 2002, Lyon, Mars 2002.