L'ANALYSE POST MORTEM DU LHC

Odd Oyvind Andreassen, Cédric Charrondiere, Dmitriy Kudryavtsev, Philippe-Roger Malacarne, Eric Michel, Alessandro Raimondo, Hubert Reymond, Adriaan Rijllart, Nikolai Trofimov

Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
CH-1211 Genève 23
Suisse
Hubert.REYMOND@cern.ch

Résumé : La phase de test et de qualification du LHC a démarré durant le premier trimestre 2007, avec le secteur 7-8. Un ensemble d'applications a été développé pour aider les experts, dans l'accès, la visualisation et l'analyse des résultats des tests. En utilisant l'expérience acquise durant cette phase et au vu des besoins nécessaires en termes de parallélisme et d'automatisation de la validation des circuits électriques, une nouvelle interface a été définie. Celle-ci offre une vision complète de tous les tests en cours et permet de centraliser l'accès aux différents outils d'analyse. Cette nouvelle structure a été intensivement utilisée sur le secteur 4-5 et au cours de cette période, les procédures de tests pour les différents types de circuits électriques ont été vérifiées et validées, ce qui a également permis l'implémentation de nouvelles fonctionnalités dans les applications. La phase de test et de qualification des circuits électriques est entrée dans une période plus critique en 2008. D'une part en raison d'une augmentation du nombre de tests réalisés pour chaque circuit et d'autre part, par le fait que plusieurs secteurs seront testés en parallèle. Cet article présente une vue d'ensemble des applications de l'analyse Post Mortem, depuis leur début en tant que simple interface graphique, jusqu'à l'actuelle palette d'outils d'analyses spécifiques.

Mots clés : LHC, circuits électriques, Post Mortem

1 INTRODUCTION

L'opération du LHC (Large Hadron Collider) s'appuie sur un ensemble d'équipements et de technologies poussées à leurs extrêmes limites. Les milliers d'aimants supraconducteurs, fonctionnant dans de l'hélium superfluide à 1.9 K, alimentés par plus de 1700 convertisseurs de puissance en sont un exemple. La protection des aimants est nécessaire, pour détecter une transition résistive et extraire en toute sécurité, l'énergie stockée dans les circuits concernés.

Afin d'assurer la sûreté de l'opération, tous ces équipements doivent êtres testés. Premièrement dans l'industrie, suite à leur fabrication, ensuite au CERN durant leur réception, dans les conditions d'utilisation les plus proches de l'opération. Finalement une validation globale doit avoir lieu, après l'installation dans le tunnel. Ceci s'applique aux convertisseurs de puissance (de 60 A à 12 kA), aux aimants supraconducteurs et à leurs sous-ensembles (amenés de courant, barres de transport de courant...), mais aussi aux systèmes de

protection, tels que protection contre les transitions résistives, les systèmes d'extraction d'énergie et les verrouillages de sécurité associés.

La dernière étape de validation complète d'un secteur, passe par la validation des circuits électriques. Ainsi chaque circuit est utilisé au travers d'une série de tests, dans le but de déclencher ou de faire réagir toutes les protections et les systèmes de sécurité. Ces tests sont réalisés pour différents paliers de courant, jusqu'au courant nominal du circuit concerné.

Afin d'aider les experts, responsables des différents équipements et les opérateurs de l'accélérateur, à analyser les données générées durant ces tests, un ensemble d'outils de reconstruction et d'analyse d'évènement a été développé [Rij07].

En utilisant notre expérience de développeur de systèmes de mesure et d'analyse, basée sur la programmation en LabVIEW et sur des composants industriels, nous avons élaboré une structure modulaire ainsi qu'une approche verticale pour l'implémentation de ces outils. Cette solution est un bon compromis entre la durée du cycle de développement, la maintenance et les possibilités d'évolution [Rij05].

2 PRINCIPE DU SYSTEME POST MORTEM DU LHC

Une large gamme de dispositifs du LHC (convertisseurs de puissance, équipements de protection de la machine, moniteurs de faisceau...) ont été conçus avec la possibilité d'acquérir et de conserver leurs plus importants paramètres et données dans des mémoires tampons circulaires. Ceci permet dans le cas d'une erreur ou d'un problème technique [Lau03] de pouvoir les traiter "Post Mortem" afin de déterminer la cause exacte de l'événement. Ainsi, lors de la réception d'un trigger Post Mortem, qui peut être généré par l'un des nombreux systèmes de protection de l'accélérateur, ces tampons mémoires sont figés et transmis au système Post Mortem du LHC. Ce dernier assure leur archivage à long terme tout en offrant de nombreuses possibilités de recherche et d'analyse d'évènements [Lau01, Wen02].

Pendant la validation des circuits électriques, bien que seuls les convertisseurs de puissance soient pilotés pour exécuter les tests, de nombreux autres systèmes interagissent et entrent dans la chaîne complète des éléments impliqués par ces tests (détecteurs de transition résistive, extracteurs d'énergie, contrôleurs de gestion des convertisseurs de puissance...). Ainsi, suite à l'exécution d'un cycle de courant, il est prévu de recevoir différents paquets de données post mortem, issus des équipements mis en jeu.

Le système Post Mortem du LHC peut se décomposer en trois parties distinctes. D'une part les routines spécifiques qui sont introduites dans le code des CPU, embarquées dans les différents équipements du LHC. Ces routines assurent la gestion correcte des tampons mémoires. En cas de réception d'un trigger Post Mortem elles garantissent le transfert des données depuis les tampons mémoires vers le serveur, au travers d'un bus de terrain (réseau WorldFIP). La deuxième partie est composée d'un serveur chargé de formater en SDDS [Bor98] les données Post Mortem qui arrivent, puis de les archiver selon une arborescence, qui est fonction du type et de la classe de l'équipement producteur de ces données. Finalement une troisième partie, qui est constituée par toutes les applications, les clients, qui permettent l'exploitation des données Post Mortem.

3 UTILISATION DU POST MORTEM POUR LES TESTS DES EQUIPEMENTS

Au cours des premières étapes de validation du LHC, consacrées aux tests des équipements individuels, les données Post Mortem étaient accessibles par l'intermédiaire d'une application dédiée, le Navigateur Post Mortem (Post Mortem Browser).

Il a été le premier outil développé qui soit visible pour l'utilisateur final. Il se présente sous la forme d'un afficheur de données (*figure 1*), qui peut lister les événements Post Mortem par

date, par type d'équipement et d'emplacement, puis les charger et présenter sous forme de tableaux ou de graphiques. Dans ce dernier cas, il est possible d'appliquer un ensemble de fonctions de base comme, des facteurs d'échelle, des zooms, et des calculs (dérivées, FFT...). Ce Navigateur propose de plus, un module d'analyse spécifique pour les signaux provenant du système de sécurité des convertisseurs de puissance (Powering Interlock Controler - PIC). Après la sélection du test à traiter, ce module assure l'extraction et l'affichage automatique des signaux analogiques et digitaux les plus importants, selon différents critères. Il permet de vérifier si la synchronisation attendue des signaux a bien été respectée.

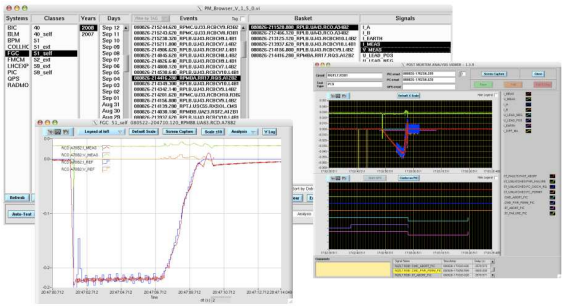

Figure 1 : le Navigateur Post Mortem

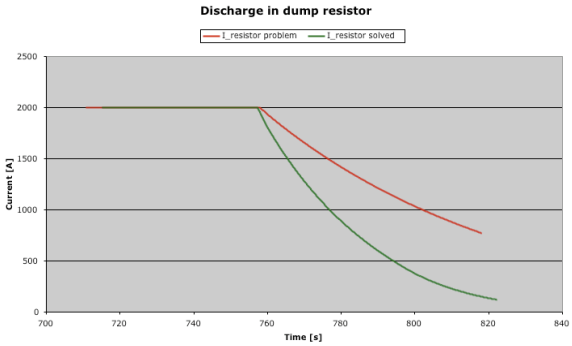

Figure 2 : défaillance de la résistance de décharge

Au fur et à mesure de la mise en service de nouveaux types d'équipements, des modules complémentaires ont été développés. Ils se présentent sous la forme d'applications spécifiques, qui montrent sous forme graphique et textuelles toutes les informations importantes pour analyser les résultats du test de l'équipement. On peut citer à ce titre, l'analyse pour les équipements de protection des aimants, contre les transitions résistives (Quench Protection System - QPS) ou celle pour les tests de montée au courant nominal des convertisseurs de puissance et des circuits électriques (Powering to Nominal - PNO).

Au début de leur utilisation, certains de ces modules ne proposaient pas d'analyses mathématiques au sens propre du terme. Mais, le fait, qu'ils rassemblent en une seule vue, plusieurs sources d'informations (données Post Mortem, données d'implantation géographique des équipements, données techniques ...), permettait aux responsables chargés de la validation de ces équipements, de le faire d'une manière plus efficace et reproductible.

4 LE POST MORTEM POUR LA VALIDATION DES CIRCUITS ELECTRIQUES

Les premiers tests de validation des circuits électriques du LHC ont eu lieu sur le secteur 7-8. Durant cette période, même si des améliorations ont été nécessaires, pour ajuster les outils précédemment utilisés, ils se sont avérés être tout à fait adaptés à la réalisation des tests, circuit par circuit. Cependant, avec l'augmentation exponentielle du nombre de circuit à tester et la nécessitée de mettre en service plusieurs secteurs en parallèle, comme prévu dans la planification du projet LHC, il est devenu clair, qu'un nouvel environnement de test devait être mis à disposition des utilisateurs.

Le schéma ci-dessous (*figure 3*) présente l'architecture retenue. Celle-ci se compose de 4 sous-ensembles qui sont : le Séquenceur, le Gestionnaire de Demandes du Post Mortem, l'Analyseur d'Evénement Post Mortem et les modules d'analyse, y compris le Navigateur PM.

Ainsi les opérateurs utilisent un outil appelé le Séquenceur, pour exécuter les tests à proprement parler. Celui-ci reçoit les paramètres et les consignes à appliquer (liste des circuits à tester, valeur et durée des plateaux ou rampes de courant à générer). L'interrogation automatique de bases de données permet de faire le lien entre les circuits électriques à tester et

les convertisseurs de puissance qui leur sont associés. Sur ces derniers, l'envoi par le Séquenceur de commandes spécifiques permet l'exécution des cycles de courant initialement paramétrés. Il est à noter que de nombreux tests peuvent être lancés en parallèle, pour des circuits différents et ce, sur plusieurs secteurs de l'accélérateur.

Le Gestionnaire de Demandes du Post Mortem (Post Mortem Request Handler - PMRH) est chargé de combiner différentes sources d'informations, telles que des paramètres reçus par le Séquenceur, des résultats extraits de bases de données ou bien les fichiers Post Mortem produits au cours du test. Cet ensemble permet de produire ce que l'on nomme un événement Post Mortem.

L'Analyseur d'Evénement Post Mortem (Post Mortem Event Analyzer - PMEA) rassemble tous ces événements afin de les présenter d'une manière synthétisée aux responsables d'équipement. Dans la mesure où un grand nombre d'événement peuvent être en attente de leur traitement, par un ou des experts, plusieurs fonctions de filtrage et de tri sont proposées, afin de rendre facilement accessible, à chacun, uniquement ceux qu'il devra traiter. Cette application donne aussi aux experts la possibilité de lancer différents programmes d'analyse et de visualisation qui leur permettent de vérifier le succès ou non d'un test. Une signature électronique est appliquée pour lui attribuer un résultat final, du type validé ou échoué. Enfin, le PMEA est chargé de collecter toutes les signatures nécessaires, au passage à l'étape suivante du test.

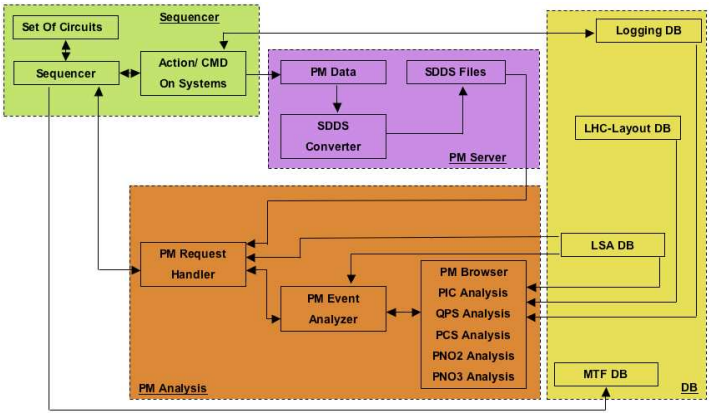

Figure 3 : schéma de principe du système Post Mortem du LHC

Le Navigateur PM a été lié à l'analyseur d'Evénement PM et en plus cinq applications d'analyses spécifiques ont été développées et liées au PMEA. Ces applications spécifiques permettent le traitement des données Post Mortem du PIC, des convertisseurs de puissance et du QPS. En outre, deux modules complémentaires assurent l'analyse de signaux en provenance de la cryogénie et des systèmes de distribution électrique, mais ils ne sont pas pour l'instant liés à la chaîne d'approbation qui est gérée par le PMEA.

Chaque application d'analyse vérifie automatiquement un certain nombre de paramètres ou de limites ou permet de visualiser en superposition le comportement attendu et celui obtenu par les mesures. Aucune de ces applications ne prend de décisions. Elles attirent l'attention de l'utilisateur face à un éventuel problème, en appliquant des codes de couleurs aux informations affichées, en fonction de critères prédéfinis. La décision finale d'accepter ou de rejeter un test est toujours entre les mains de l'expert.

Selon le test, jusqu'à quatre experts de domaines différents doivent vérifier et valider les résultats obtenus. Ceux-ci, sont ensuite envoyés par l'intermédiaire du Séquenceur, à une base de donnée centralisée pour leur archivage à long terme. Ce type d'information doit être conservé pour toute la durée d'exploitation de l'accélérateur. Il peut s'avérer en effet très utile

de pouvoir comparer des résultats de tests, pour un circuit déterminé mais sur des périodes différentes, et ainsi pouvoir observer son comportement dans le temps.

En fonction de l'état final du test (validé ou refusé), il sera proposé à l'opérateur soit de passer à l'étape suivante du test, soit de le répéter ou d'ouvrir une procédure pour non-conformité. Dans ce dernier cas, le circuit sera bloqué jusqu'à ce que le problème soit corrigé ou que la décision d'effectuer un nouveau test soit prise, avec des paramètres modifiés.

5 UN DEVELOPPEMENT MODULAIRE

Tout au long du projet de l'analyse Post Mortem, plusieurs personnes ont été impliquées dans la réalisation des applications, dont les spécifications étaient proposées par des experts des domaines concernés. Afin de profiter au mieux des efforts de chacun, un système de partage des ressources a été mis en place. Il se présente sous la forme d'une structure d'archivage de librairies. Ainsi chaque développeur peut rechercher puis copier du code déjà écrit, ou mettre à disposition ses propres développements (pilotes de communication, manipulation complexe de chaînes ou tableaux, extraction de données, structures spécifiques ...).

La première phase du projet Post Mortem a été dédiée à l'analyse des tests réalisés sur les équipements individuels. Dans ce cadre, chaque application a été développée de manière indépendante, avec pour seul but, le traitement spécifique des données en provenance d'un ensemble d'équipements.

La phase suivante du projet a nécessité la mise en place d'une structure évolutive et adapté à la gestion en parallèle des nombreux tests ; Ceux-ci étant exécutés à la fois sur différents types de circuits électriques, et pour tous les secteurs de l'accélérateur. Les possibilités offertes par LabVIEW en termes de réutilisation, appel ou intégration du code, nous ont permis de passer naturellement d'une structure de modules indépendants, vers une architecture complexe, où de nombreuses applications sont liées les unes avec les autres. Le Navigateur PM est un bon exemple de réutilisation de code : au début c'était une application à part. Ensuite elle a été un module appelé par le PMEA.

Ainsi l'intégration des nouvelles applications comme le PMRH ou le PMEA, avec les analyses existantes, s'est faite aisément grâce à l'utilisation de liens et d'appels dynamiques associés à des fichiers de configuration, et de partage des données de tests. Cette technique nous a donné toute la flexibilité nécessaire lors de la mise en service de la structure complète. Il était en effet possible de tester les modules et fonctions existants, sans avoir à attendre la disponibilité de l'ensemble des applications. De même, le simple changement d'un paramètre dans un fichier, permettait de sélectionner la version d'un module, puis de le tester dans l'environnement complet, sans avoir à changer un seul morceau de code.

6 NON CONFORMITES DETECTES PAR L'ANALYSE POST MORTEM

Plusieurs problèmes ont été détectés grâce aux analyses proposées dans le cadre du projet PMA (Post Mortem Analysis). Cela a permis de les traiter plus rapidement, tout en assurant une traçabilité des données et mesures effectuées avant et après leur résolution. La plupart des non-conformités, comme des prises de mesure de potentiel cassées, des courts-circuits à la terre, etc... sont décelées en amont de la validation, au cours des vérifications de l'assurance-qualité pour les circuits électriques. Parmi les problèmes rencontrés le plus souvent, on peut citer l'inversion de signaux (d'instrumentation, de lecture d'état, de verrouillage de sécurité...), mais aussi des tests qui ne produisent pas la réaction ou les données attendues.

L'un des cas intéressant est liée aux équipements d'extraction d'énergie. Ce type d'appareillage a été conçu pour extraire de manière sure et contrôlée, l'énergie stockée dans un aimant supraconducteur, suite à une transition résistive. Si le système d'extraction ne

décharge pas le circuit dans un temps bien précis, pour une raison quelconque, la diode de dérivation peut-être endommagée. La réparation d'une telle diode nécessite de réchauffer l'aimant à la température ambiante avant que la réparation ne puisse avoir lieu et ensuite un nouveau refroidissement, ce qui signifie de nombreuses semaines d'arrêt pour le LHC.

Au cours de la validation des circuits électriques du secteur 4-5, le système d'extraction des quadripôles principaux a été testé à faible courant. Au début, tout semblait avoir fonctionné qualitativement comme il se devait. Mais après l'analyse quantitative approfondie des données, en utilisant le navigateur Post Mortem, il est devenu clair que l'un des systèmes n'avait pas les bonnes caractéristiques. La constante de temps était beaucoup plus longue que ce qu'elle devait être (*Figure 2*). Après une enquête plus approfondie, un court-circuit interne a été découvert dans la résistance de décharge et tout l'assemblage a été remplacé. Plus tard, il s'est avéré que le problème avait été causé initialement par des dommages pendant le transport, combinés avec une baisse de la qualité, vers la fin de la production industrielle de ces équipements.

7 CONCLUSIONS

L'analyse Post Mortem est un ensemble d'outils essentiels, non seulement pour la mise en service des circuits supraconducteurs du LHC, mais aussi pour la fiabilité et la sécurité de fonctionnement du LHC. Au cours des phases de validation, il s'est avéré efficace pour réduire de manière significative le temps de qualification d'un circuit. Pour l'exploitation du LHC, il permettra de raccourcir les temps d'arrêt de la machine, en cas de perte du faisceau dû aux circuits électriques. La modularité de l'architecture du logiciel a permis à la première série d'outils d'être utilisée pendant la mise en service du LHC et permettra la réutilisation et l'extension de ces outils pour la phase de mise en service du faisceau du LHC et pour l'opération.

8 BIBLIOGRAPHIE

[Bor98] M. Borland, « A Brief Introduction to the SDDS Toolkit », http://www.aps.anl.gov/asd/oag/SDDSIntroTalk/slides.html, USA, Argonne National Laboratory, 1998.

[Lau01] R.J. Lauckner, « What Data is Needed to Understand Failures During LHC Operation ? », Actes de la Conférence Chamonix XI, CERN-SL-2001-003-DI, 2001.

[Lau03] R.J. Lauckner, « What do we see in the control room », Actes de la Conférence Chamonix XII, CERN-AB-2003-008, 2003.

[Rij05] A. Rijllart, « Industrial Controls for Test Systems from Superconducting Stands till Magnet Fiducialisation in the tunnel for the LHC project », Actes de la Conférence ICALEPCS'05, PO2.005-2 , 2005.

[Rij07] A. Rijllart, « The First Stage of the Post Mortem Analysis Software Used for the Hardware Commissioning of the LHC », Actes de la Conférence ICALEPCS'07, RPPB13, 2007.

[Wen02] J. Wenninger, « The LHC Post-Mortem System », LHC-project-note-303; Genève : CERN, 2002.