

5 décembre 2008

SUIVI DE L'INCIDENT SURVENU LE 19 SEPTEMBRE 2008 AU LHC

Le présent rapport vise à compléter l'analyse et le diagnostic de l'incident survenu le 19 septembre 2008 dans le secteur 3-4 du LHC et à exposer les principales mesures nécessaires pour la réparation, la consolidation et le redémarrage du LHC. Il fait suite au rapport préliminaire du 16 octobre 2008 (<http://cdsweb.cern.ch/record/1135729/>) et le complète en mettant particulièrement l'accent sur les activités prévues pour 2009 et sur leur calendrier. On trouvera un aperçu de la structure du LHC ainsi que de la terminologie correspondante dans le rapport préliminaire du 16 octobre 2008.

Confirmation des premières observations et complément d'analyse

Une fois le secteur 3-4 ramené à température ambiante, les interconnexions des aimants ont été ouvertes et examinées de façon systématique, ce qui a permis de rassembler un grand nombre de données (mesures géométriques, mécaniques et électriques, inspections visuelles et base de données photographiques). L'analyse de ces données et les résultats de simulations électriques, thermiques et mécaniques ont confirmé, pour l'essentiel, la chaîne d'événements mentionnée dans le rapport du 16 octobre 2008, en particulier les effets de la défaillance initiale et les dommages subsidiaires qui en découlent.

Étant donné que la preuve directe (la connexion électrique défectueuse entre deux aimants) a été détruite par l'incident, l'origine exacte de la défaillance restera toujours hypothétique ; toutefois, des défauts analogues au défaut qu'on suppose à l'origine de l'incident ont été reproduits au Laboratoire en appliquant à des échantillons d'interconnexions de barres omnibus des procédures comportant d'importantes non-conformités.

En ce qui concerne les dommages subsidiaires, il apparaît clairement que les soupapes de sécurité de l'enceinte à vide du cryostat avaient été conçues pour des débits d'hélium plus faibles que ceux qui ont été enregistrés lors de l'incident du 19 septembre 2008 (considérés comme « hors spécification ») et que les forces axiales résultant de la surpression de l'enceinte à vide ont dépassé la limite de rupture des supports des aimants, ce qui a entraîné leur déplacement ainsi que des dommages secondaires.

Des méthodes de détection sensibles fondées sur l'intégration et le filtrage des tensions mesurées lors des essais électriques et, parallèlement, sur la calorimétrie dans l'hélium superfluide ont été validées et appliquées dans d'autres secteurs de la machine. Elles n'ont révélé aucun autre cas de résistance anormale dans les interconnexions des aimants réalisées lors de leur installation dans le tunnel. Toutefois, deux connexions situées à l'intérieur de deux masses froides et réalisées dans l'industrie ont présenté une résistance largement supérieure aux limites prévues. Ces connexions avaient pourtant atteint la performance nominale lors des essais effectués avant leur installation dans le tunnel, ainsi que lors des essais électriques des secteurs complets.

Récapitulatif des dommages observés

Le cryostat continu de 3 km de longueur du secteur 3-4 contient 154 dipôles supraconducteurs et 55 « sections droites courtes » abritant des quadripôles supraconducteurs ainsi qu'un grand nombre d'aimants correcteurs de différents types. Au total, 66 interconnexions d'aimants contigus ont été ouvertes, ce qui inclut de substantielles zones tampon de chaque côté de la zone endommagée. On a pu ainsi effectuer une inspection sur place pour déterminer quels aimants devaient être sortis du tunnel et quels aimants pouvaient rester en place. Au total, 53 aimants, 39 dipôles et 14 sections droites courtes seront sortis du tunnel et remontés en surface pour être inspectés de façon approfondie, puis soit nettoyés, soit réparés. Ce processus a commencé (19 dipôles et 9 sections droites courtes ont déjà été retirés) et doit s'achever avant la fin de 2008.

Outre les dommages causés aux aimants, la contamination des tubes de faisceau par la suie provenant des arcs électriques et par des fragments d'isolation multicouche a également fait l'objet d'un examen systématique par endoscopie sur toute la longueur du cryostat continu, c'est-à-dire jusqu'aux vannes de sectorisation du vide faisceau. Aucune contamination par la suie n'a été observée en dehors des 53 aimants sortis du tunnel, dont les tubes de faisceau seront remplacés ou nettoyés en surface. Une contamination par des fragments d'isolation multicouche a été observée sur de longues distances depuis le point où s'est produit l'incident de départ. Ces fragments ne sont toutefois que déposés en surface du tube et peuvent être retirés par aspiration. Une procédure spéciale a été élaborée à cette fin et est en cours de validation au Laboratoire.

Les dommages occasionnés à la ligne de distribution cryogénique se limitent à des déformations mécaniques de quatre raccordements « jumpers », lesquels ont déjà été coupés et retirés.

Mesures de consolidation

Outre les nouvelles méthodes de détection sensibles mentionnées plus haut, qui seront appliquées de façon systématique aux secteurs du LHC dans le cadre de la procédure de remise en service après les interventions de maintenance, un système spécialisé visant à détecter l'apparition d'une résistance électrique anormale dans les barres omnibus et interconnexions portant des intensités élevées a été conçu, puis validé sur prototype ; il sera mis en place dans l'ensemble de la machine. Pour cela, il faudra fabriquer et installer quelque 2000 châssis électroniques supplémentaires, et tirer quelque 160 km de câbles de signalisation pendant la fermeture hivernale 2008-2009.

Pour limiter les conséquences en cas de nouvel incident susceptible de produire un dégagement massif d'hélium et une augmentation consécutive de la pression dans l'enceinte à vide d'isolation, le nombre et la dimension des soupapes sur les enceintes à vide du cryostat sera augmenté, ce qui permettra d'être sûr que la surpression nominale de 0,5 bar n'est jamais dépassée. Le scénario le plus défavorable pour ce type d'événement a été révisé à la lumière de l'incident du 19 septembre, ce qui a conduit à prendre les mesures suivantes : les brides existantes sur les cryostats des sections droites courtes seront équipées de nouvelles soupapes plein débit, ce qui conduira à multiplier par 8 la section de passage ; cette modification peut

être effectuée sur place sur les secteurs froids. De plus, sur chaque cryostat du dipôle, un orifice de grande dimension sera découpé, puis équipé d'une soupape plein débit ; cette modification sera effectuée sur les secteurs chauds et mise en place progressivement sur l'ensemble de la machine. En tout, la section de passage se trouvera finalement multipliée par 40, ce qui permettra au cryostat du LHC de supporter une décharge d'hélium deux fois supérieure à celle qui s'est produite lors de l'incident du 19 septembre, tout en maintenant la surpression dans les limites permises. De plus, l'ancrage dans le sol en béton du tunnel des quadripôles équipés de barrières de vide sera renforcé.

Programme de réparation

Une fois ramenés en surface et inspectés de façon approfondie, les aimants retirés du tunnel sont classés en trois catégories, selon le type et l'ampleur des dommages ou de la contamination observée.

Si les dommages ou la contamination sont très faibles ou inexistantes, les aimants peuvent être **réutilisés** sans qu'il soit nécessaire de démonter leur cryostat ; les tubes de faisceau sont soit remplacés, soit nettoyés. À ce jour, 9 dipôles entrent dans cette catégorie.

En cas de contamination du cryostat et de l'isolation multicouche, les aimants seront **renovés** : leur cryostat sera démonté, puis nettoyé et l'isolation multicouche sera remplacée, mais la partie active de l'aimant (la « masse froide ») sera conservée. À ce jour, 5 sections droites courtes entrent dans cette catégorie.

En cas de dommages aux connexions situées aux extrémités des bobines dans la masse froide, ou en cas de doute sur leur intégrité, les aimants seront **reconstruits avec de nouvelles masses froides**, pour lesquelles on dispose d'éléments de rechange. Cette situation concerne 30 dipôles (dont 16 sont déjà montés dans leurs cryostats) et 9 sections droites courtes (dont 5 sont déjà assemblées dans leurs cryostats).

Tous les aimants à réinstaller dans le tunnel, qu'ils soient réutilisés, renovés ou reconstruits avec de nouvelles masses froides, seront soumis à des tests électriques à froid aux valeurs nominales, afin de vérifier leur intégrité mécanique et électrique, ainsi que leurs performances en conditions d'exploitation. À cette fin, la station d'essai cryogénique qui a été utilisée pour tester l'ensemble des aimants du LHC au moment de leur réception par le CERN sera réutilisée ; pour retrouver sa pleine capacité cryogénique, elle sera à nouveau reliée à la grande centrale cryogénique qui dessert normalement le secteur 1-2 du LHC.

Les pièces de rechange des aimants et des cryostats, y compris les éléments des systèmes de vide pour les faisceaux, sont disponibles en quantités suffisantes pour que les travaux de réparation puissent commencer. Des commandes supplémentaires ont été passées pour reconstituer des stocks de pièces détachées et alimenter sans interruption les ateliers de réparation. Du personnel expérimenté ayant participé auparavant à l'assemblage et à l'installation en série des secteurs du LHC a été mis à disposition et redéployé pour les tâches de réparation et de réinstallation.

Tous les éléments principaux nécessaires à la réparation des raccordements « jumpers » de la ligne cryogénique sont disponibles. Les travaux de réparation dans le tunnel commenceront début janvier 2009, et seront terminés d'ici mi-février 2009.

Les deux premiers nouveaux aimants ont déjà été installés cette semaine à leur emplacement dans le tunnel dans le secteur 3-4, en remplacement des aimants retirés. Il est prévu de terminer la réinstallation de tous les aimants dans le secteur 3-4 d'ici fin mars 2009. Les travaux d'interconnexion seront réalisés à partir de février 2009, et seront terminés d'ici à la mi-mai 2009. Après les essais de pression finaux, et après refroidissement, le secteur réparé sera prêt à être mis sous tension fin juin 2009.
