

## Défis scientifiques et techniques du LHC

**Philippe Lebrun**  
*CERN, Genève (Suisse)*

Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) actuellement mis en service au CERN, est le plus grand *instrument scientifique* du monde. Il produira des collisions de faisceaux intenses de protons et d'ions de haute énergie, pour sonder la structure de la matière et explorer les forces de la nature à l'échelle sans précédent du TeV, permettant ainsi de repousser les limites du « modèle standard » et de faire progresser la connaissance en physique fondamentale. Pour guider et focaliser ses faisceaux le long du tunnel circulaire souterrain de 26,7 km de circonférence, le LHC utilise plusieurs milliers d'aimants supraconducteurs à champ élevé, fonctionnant dans l'hélium superfluide à 1,9 K. La durée de vie exigée des faisceaux en circulation requiert un ultra-vide poussé, pour limiter les diffusions par les molécules de gaz résiduel. Le LHC constitue donc aussi un *défi technologique* : ses composants ont dû être développés au-delà de l'état de l'art préexistant, industrialisés, produits par l'industrie sur spécification et aux prix du marché, et validés selon un plan d'assurance qualité et des procédures de test sans faille. Initialement décidé et financé par les 20 états membres Européens du CERN, le LHC qui sert la communauté mondiale de quelque 8000 physiciens des particules, est devenu un *projet global*, intégrant des contributions de toutes les régions du monde dans une collaboration multinationale.

**Les supraconducteurs**  
**Luc Oberli**  
*CERN, Genève (Suisse)*

Afin d'atteindre les champs magnétiques intenses nécessaires pour guider et focaliser les faisceaux de protons du LHC, le cœur des aimants principaux est constitué de 7000 km de câbles supraconducteurs en alliage de niobium et de titane, refroidis à 1.9 K par de l'hélium superfluide. Les supraconducteurs du LHC atteignent un niveau de performances très élevé pour engendrer des champs magnétiques reproductibles et contrôlés avec une précision relative atteignant  $10^{-4}$ . Un bref rappel des choix techniques et des caractéristiques principales permettra de souligner les défis qui ont du être relevés par l'industrie tout au long de la fabrication. L'approche adoptée par le CERN pour suivre la fabrication industrielle et le plan d'assurance qualité garantissant un très haut niveau de qualité par des contrôles systématiques seront traités. La présentation passera finalement en revue les principaux résultats obtenus et discutera les perspectives d'utilisation de supraconducteurs plus avancés comme le Nb<sub>3</sub>Sn.

## **Transfert de chaleur dans les bobines supraconductrices**

**Bertrand Baudouy**  
*CEA Saclay, (France)*

Le mode de refroidissement des aimants supraconducteurs dépend de leur utilisation (aimants d'accélérateur ou de détecteur), de l'amplitude des apports thermiques permanents et transitoires subis, de la température de fonctionnement des bobines supraconductrices et de leur géométrie. Après une introduction conceptuelle sur la thermique des aimants supraconducteurs et les différentes méthodes de refroidissement, deux exemples d'aimants du LHC seront présentés. Les différences de transfert de chaleur dans les dipôles du LHC, aimants «mouillés» à refroidissement direct, et dans l'aimant du détecteur CMS, aimant «sec» à refroidissement indirect, seront détaillées.

**Les aimants des accélérateurs**  
**Michele Modena**  
*CERN, Genève (Suisse)*

Le LHC est composé d'une quantité et d'une variété d'aimants parmi les plus importantes qui existent à ce jour dans un accélérateur pour la physique des hautes énergies. Un total de 8090 aimants supraconducteurs ainsi que 112 aimants résistifs constituent la colonne vertébrale des 27 km du LHC. La présentation traitera brièvement la structure de l'accélérateur (anneau, octants, secteurs, régions de l'arc et des insertions) en précisant les points de repère majeurs permettant une identification plus aisée dans cette grande variété d'aimants. Après la présentation des principaux paramètres et du fonctionnement des différents types d'aimants et de leurs cryostats, les divers choix d'approvisionnement et de structures de production seront exposés. Les enjeux principaux de la production des aimants et leurs performances systématiquement mesurées seront finalement présentés en soulignant certains événements «clés» de ce projet unique.

**Les aimants des détecteurs**  
**François Kircher**  
**CEA Saclay (*France*)**

Les quatre détecteurs installés aux points d'interaction du collisionneur LHC utilisent tous des électro-aimants de grande taille pour analyser la trajectoire des particules émises lors des collisions. Deux de ces détecteurs, ATLAS et CMS, tenant compte de la taille et des performances demandées aux systèmes magnétiques, ont choisi d'utiliser des aimants supraconducteurs dépassant toute réalisation antérieure. Bien que de structure magnétique différente (solénoïde central et toroïde en trois parties pour ATLAS, grand solénoïde à champ élevé pour CMS), les deux réalisations possèdent un certain nombre de points communs, tout comme certaines différences, en particulier sur la stratégie du montage et des essais. Après un descriptif conceptuel des systèmes magnétiques respectifs, l'accent sera mis sur les résultats des essais cryomagnétiques qui ont eu lieu dans les halls de surface et dans les cavernes expérimentales selon les choix de chaque détecteur.

**La distribution électrique et les amenées de courants**  
**Amalia Ballarino**  
**CERN, Genève (*Suisse*)**

L'alimentation électrique des aimants supraconducteurs du LHC nécessite le transfert d'un courant total d'environ 3 MA de la température ambiante à celle de l'hélium liquide. En fonction des circuits électriques, ce transfert s'effectue au moyen de milliers d'amenées de courants d'intensité variable de 60 A à 13000 A. Pour les amenées de haute intensité ( $\geq 600$  A), des supraconducteurs à haute température sont intégrés dans la partie la plus froide, afin de réduire la charge thermique dans l'environnement cryogénique. Après la revue du système d'alimentation électrique, le projet des amenées de courants est présenté en soulignant les résultats obtenus pendant la mise en service des premiers secteurs de l'accélérateur.

## **La protection des aimants lors de transitions résistives**

**Andrzej Siemko**

*CERN, Genève (Suisse)*

L'architecture magnétique du LHC se divise en huit secteurs principalement constitués de chaînes d'aimants supraconducteurs, dipolaires ou quadripolaires raccordés en série. Chaque aimant se compose d'une masse froide, fonctionnant à 1,9 K dans l'hélium superfluide et d'un cryostat assurant l'isolation thermique de la masse froide. Chaque secteur du LHC contient 154 aimants dipolaires et 44 aimants quadripolaires interconnectés, constituant trois circuits principaux. Pendant le fonctionnement, des perturbations peuvent entraîner une brusque transition résistive de l'aimant libérant sous forme de chaleur l'énergie magnétique stockée dans le bain d'hélium provoquant sa vaporisation et engendrant une montée de pression à l'intérieur de la masse froide. La présentation passera en revue le système de détection de transition résistive et de protection électrique et hydraulique (chaufferettes en contact avec les bobines supraconductrices, diodes de «by-pass» installées dans le bain d'hélium à 1.9 K, résistances de décharge, disjoncteurs mécaniques, vannes et lignes de décharge) mis en place afin d'éviter que l'énergie stockée dans les chaînes d'aimants supraconducteurs soit dissipée localement lors des transitions résistives.

## **La cryogénie de l'accélérateur**

**Laurent Tavian**

*CERN, Genève (Suisse)*

L'accélérateur LHC est essentiellement constitué basée de 25 km d'aimants supraconducteurs refroidis en dessous de 1.9 K et utilisant comme réfrigérant l'hélium superfluide pressurisé. Un système cryogénique approprié a été défini et optimisé de manière à couvrir les différentes fonctions et modes opératoires et à s'adapter aux contraintes d'implantation et d'environnement.

Après avoir rappelé la méthode de refroidissement et l'architecture du système cryogénique, les principaux résultats et performances obtenues pendant la mise en froid et la mise en service des secteurs seront présentés et comparés avec les exigences attendues en régimes établis et en transitoire.

## **La cryogénie des détecteurs**

**Giorgio Passardi**

*CERN, Genève (Suisse)*

La construction du LHC a conduit à la mise en place de détecteurs utilisant des spectromètres à aimants supraconducteurs refroidis à 4.5 K aux dimensions et performances sans précédent (champ magnétique, énergie stockée et "transparence" aux particules). Les détecteurs ATLAS et CMS sont équipés avec les plus grands aimants solénoïdaux et toroïdaux du monde. En outre, pour ATLAS, certains détecteurs (calorimètres) utilisent de grandes quantités d'argon liquide ultra pur à 88 K pour la mesure de l'énergie des particules. La présentation passera en revue les différents principes qui ont inspiré la conception des systèmes cryogéniques associés à ces détecteurs et analysera les résultats les plus significatifs obtenus durant les tests préliminaires et la phase finale de mise en service.

## **L'instrumentation et le contrôle de la cryogénie**

**Juan Casas-Cubillos**  
*CERN, Genève (Suisse)*

L'exploitation et la surveillance du LHC exigent un nombre important de canaux d'instrumentation, la plupart exposés aux rayonnements ionisants. Le manque d'accès impose une conception robuste et fiable de l'instrumentation, critères souvent en conflit avec la précision demandée. Le système de contrôle cryogénique doit gérer environ 33000 signaux d'entrées-sorties ainsi que 4000 boucles de régulation. Le grand nombre de signaux, l'exigence de fonctions de linéarisation individuelle et le suivi des non-conformités imposent l'utilisation d'une base de données de configuration du contrôle et de l'instrumentation qui est continuellement mise à jour avec les données du terrain. L'architecture et les solutions adoptées seront rappelées et les résultats et les performances obtenues présentées.

## **Perspective pour la recherche et développement des aimants supraconducteurs au CERN**

**Luca Bottura**  
*CERN, Genève (Suisse)*

Le principal point d'intérêt de la recherche et du développement actuel sur les aimants supraconducteurs au CERN est l'amélioration de la luminosité et éventuellement une augmentation de l'énergie du LHC qui est actuellement en phase de mise en service et devrait voir son premier faisceau en 2008. Le fait d'augmenter la luminosité nominale est abordée de trois façons indépendantes mais néanmoins complémentaires.

Le premier volet est une redéfinition complète des régions d'interaction de haute luminosité pour lesquelles nous espérons construire des nouveaux quadrupoles de focalisation finale en utilisant des câbles disponibles en Nb-Ti, mais avec des ouvertures et des gradients intégrés plus élevés.

Le second volet est de développer la technologie des aimants des accélérateurs, à savoir les dipôles et les quadrupoles, construits avec des câbles en Nb<sub>3</sub>Sn qui permettent une augmentation du champ magnétique admissible de plus de 50%.

Le troisième volet est de réviser le complexe des injecteurs pour lequel nous étudions des options de supraconductivité pour les aimants pulses dans la gamme de champs bas à moyens qui offrent l'avantage de réduire les coûts d'exploitation par rapport aux aimants classiques.

Dans cette présentation, nous donnons une vue d'ensemble des trois volets en mettant l'accent sur les points critiques et un rapport sur le déroulement actuel de la recherche et développement spécifique.