



**CRYOGENIE HELIUM ET EFFICACITE ENERGETIQUE :
L'EXPERIENCE DU LHC AU CERN**

Serge Claudet¹, Philippe Lebrun² & Laurent Tavian¹
1 Département Technologie, CERN, Genève, Suisse
2 Unité DG, CERN, Genève, Suisse

Résumé

La supraconductivité et la cryogénie hélium associée sont devenues des technologies clés des grands équipements de recherche en physique, et en particulier des accélérateurs de particules. Le coût thermodynamique du fonctionnement à basse température impose à leurs systèmes cryogéniques une haute efficacité énergétique dans la gestion des charges thermiques, la distribution des fluides et la production de froid, obtenue par une approche intégrée couvrant toutes les phases du projet, de la conception préliminaire jusqu'à l'exploitation. L'expérience du LHC au CERN vient illustrer le propos, tandis que quelques pistes de développements futurs sont évoquées.

Abstract

Superconductivity and associated helium cryogenics have become key technologies for large research infrastructures in physics, and particularly particle accelerators. The thermodynamic penalty for operating at low temperature requires their cryogenic systems to be highly energy efficient in managing heat loads, distributing cryogenic fluids and producing refrigeration. This is achieved through an integrated approach covering all phases of the project, from early design to operation, as illustrated by the case of the LHC at CERN. Potential paths of development for future projects are briefly discussed.

A paraître dans la "Revue Générale du Froid", Novembre 2012

Genève, Suisse
Novembre 2012

Introduction

L'application à grande échelle de la supraconductivité constitue un élément clé du développement récent des grandes infrastructures de recherche en physique, qu'il s'agisse d'accélérateurs et de détecteurs de particules, de dispositifs de confinement magnétique des plasmas ou d'électro-aimants à champs élevés pour la physique de la matière condensée, avec pour conséquence le besoin de grands systèmes cryogéniques capables de réfrigération de forte puissance à la température de l'hélium liquide. Ces systèmes cryogéniques, qui contribuent pour une part importante aux coûts d'investissement et à la consommation électrique des projets, doivent donc être conçus, construits et exploités de manière fiable et efficace. Outre son intérêt économique pour le constructeur comme pour l'exploitant, l'efficacité énergétique représente un avantage concurrentiel dans un contexte de demande d'énergie croissante. Une cryogénie efficace constitue donc un ingrédient essentiel du succès technique, de la rentabilité économique, de la conformité environnementale et de l'acceptabilité sociétale de ces projets, toutes conditions nécessaires de leur faisabilité. Cet argumentaire s'applique particulièrement au Grand Collisionneur de Hadrons (Large Hadron Collider ou LHC) du CERN, qui constitue le plus grand système cryogénique à hélium jamais construit. Après avoir rappelé les caractéristiques principales de ce système, décrit dans un précédent article de la Revue Générale du Froid [1], nous présentons les différentes stratégies mises en œuvre dans sa conception, sa réalisation et son exploitation pour atteindre une haute efficacité énergétique, avant d'évoquer quelques pistes d'amélioration pour de futurs projets.

Rappels sur le LHC

Le LHC est un grand collisionneur de particules visant à étudier la structure de la matière et des forces qui assurent sa cohésion à l'échelle des constituants élémentaires – quarks et leptons – dont les bases sont décrites par le « Modèle Standard » de la physique. Pour sonder à cette échelle, la mécanique quantique nous indique qu'il faut mettre en jeu des concentrations d'énergie très élevées, en accélérant les particules stables disponibles dans le laboratoire, en les faisant entrer en collision et en observant les produits de réaction. Ces hautes énergies étaient aussi celles des particules de l'univers primordial lorsqu'il était encore très chaud, dans les premiers instants après le « Big Bang », conditions que le LHC permet de recréer dans le laboratoire sur des quantités infimes de matière. Le LHC se compose de deux accélérateurs circulaires jumelés – des synchrotrons de 26,7 km de circonférence – qui accélèrent et maintiennent en circulation en sens opposé deux faisceaux de protons – simples noyaux d'hydrogène – et les font entrer en collision quasi-frontale en quatre points, au cœur des grands détecteurs qui analysent les collisions. Les faisceaux de haute énergie (7 TeV soit 7000 fois l'énergie de masse au repos des protons) étant très rigides, il faut à la

fois un grand rayon de courbure et un champ magnétique élevé pour les guider et les focaliser, obtenu grâce à plusieurs milliers d'aimants supraconducteurs produisant des champs jusqu'à 8,3 T (Figure 1). Cela constitue le défi technologique principal du LHC. Les bobines des aimants sont constituées d'un câble supraconducteur composé de filaments d'alliage Nb-Ti dans une matrice en cuivre de haute pureté. Pour atteindre les champs élevés, le supraconducteur est maintenu à une température inférieure 2 K dans l'hélium superfluide. Le LHC est donc aussi un grand système cryogénique fonctionnant à très basse température, dont la conception a requis des avancées substantielles, tant qualitatives que quantitatives permettant d'établir sa faisabilité technique, d'assurer sa réalisation et de garantir son exploitation dans les limites budgétaires imposées [2]. La recherche permanente d'efficacité énergétique durant toutes ces phases à été et demeure la clé du succès [3].



Figure 1 : Vue du tunnel LHC

Stratégies de conception efficace

A basse température, le travail minimum de réfrigération (c. à d. l'exergie) nécessaire à extraire une quantité de chaleur Q à la température T est essentiellement déterminé par l'entropie S correspondante, soit Q/T . Les stratégies de conception cryogénique qui minimisent la génération d'entropie s'avèrent donc efficaces : elles sont illustrées sur la Figure 2, dans le plan (T, Q) . Une première stratégie vise à pousser le point caractéristique de chaque composant $(T_{\text{comp}}, Q_{\text{comp}})$ vers la région de plus faible entropie, ce qui peut être fait – T_{comp} étant fixée par la spécification de besoin – en réduisant Q_{comp} par une meilleure isolation, ou en en déplaçant une partie vers des températures plus élevées par écrantage ou interception thermique. Une seconde stratégie consiste à réduire l'écart

en T et en Q entre le réfrigérateur et le composant à refroidir, en améliorant le schéma de distribution cryogénique par la réduction des charges thermiques parasites (entrées de chaleur sur les lignes de transfert, pertes mécaniques des pompes de circulation) et des écarts de température (choix du fluide caloporteur, conception thermo-hydraulique, thermométrie de précision, automatismes et contrôle-commande optimisés). Des exemples de telles stratégies sont illustrés dans la suite de l'article.

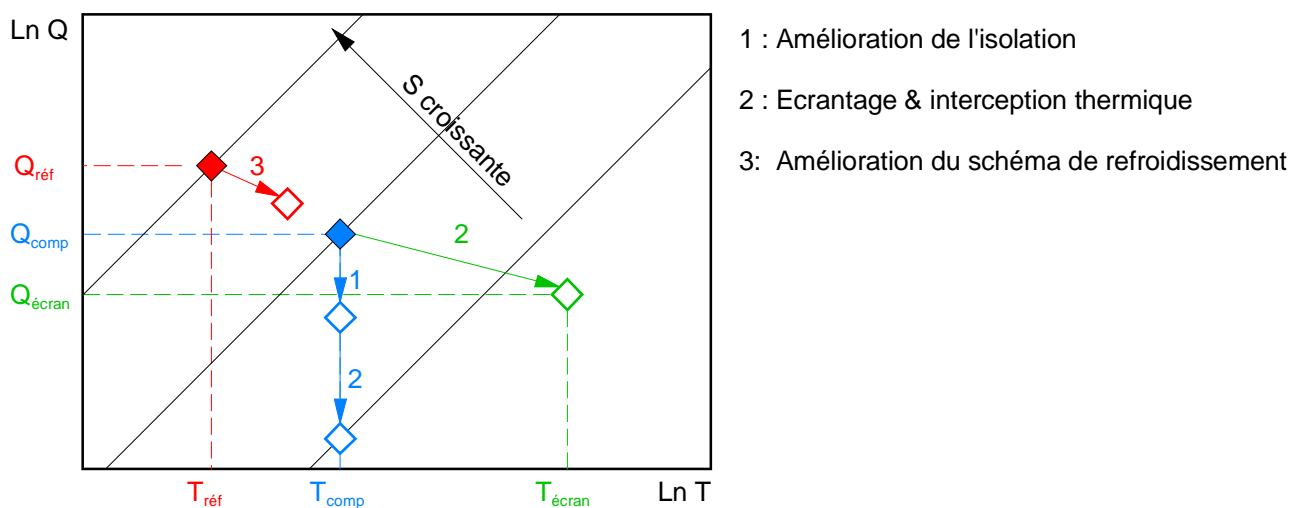


Figure 2 : Stratégies de conception cryogénique efficace

Gestion des charges thermiques et conception des cryostats

Le premier principe de conception est d'évaluer et de limiter les charges thermiques sur le système cryogénique, qu'il s'agisse d'entrées de chaleur ou de dissipation thermique (charges dynamiques). La limitation des entrées de chaleur passe par la mise en œuvre de techniques plus ou moins classiques d'isolation thermique – matériaux à faible conductibilité, surfaces à faible pouvoir émissif et isolation sous vide, par exemple – qu'il faut valider thermiquement et mécaniquement, sans oublier les considérations de facilité de réalisation pratique et de robustesse en mode dégradé. Les charges dynamiques – dissipation résistive (jonctions électriques et courants de Foucault), pertes hystérétiques, pertes de faisceau – doivent être prises en compte pour tous les modes de fonctionnement attendus, y compris les transitoires lents et rapides, pour lesquels il peut s'avérer judicieux de concevoir des processus tampon permettant d'étaler les fortes perturbations thermiques. Dans les aimants du LHC, la très faible viscosité de l'hélium superfluide – 200 fois plus petite que celle de l'eau – permet sa perméation au cœur des bobines et son fort couplage thermique avec le câble supraconducteur. La grande chaleur spécifique de l'hélium superfluide – 2000 fois plus grande que celle du câble par unité de volume – lui permet d'absorber les transitoires, tandis que son excellente conductibilité thermique – 1000 fois celle du cuivre de haute pureté à flux thermique modéré – évacue la chaleur de la géométrie confinée des bobines vers le bain d'hélium. L'hélium

superfluide, utilisé avec une configuration de bobines et d'isolation appropriée, constitue donc un ingrédient essentiel de la stabilité des aimants supraconducteurs.

Le second principe de conception est d'extraire les charges thermiques au niveau maximal possible de température, pour en minimiser l'impact éxergétique. Cela conduit à introduire des niveaux de température intermédiaires dans le cryostat pour y attacher les écrans thermiques radiatifs, l'interception de chaleur par conduction le long des éléments structuraux et des amenées de courant, ainsi que – pour la première fois dans un accélérateur – les écrans de faisceau absorbant l'essentiel des charges thermiques induites par la circulation des faisceaux avant qu'elles ne tombent sur les bains d'hélium superfluide à 1,9 K.

La coupe transversale de l'aimant principal dans son cryostat (Figure 3) montre la mise en œuvre de ces principes de conception, avec pour conséquence l'étagement des charges thermiques en régime permanent (Table 1). L'aimant dans son enceinte à hélium intégrée est enveloppé d'isolation réfléchive multicouche (« superisolation ») et entouré d'un écran thermique refroidi à 50-75 K. Il est supporté et positionné par des pieds-colonne en composite non-métallique fibre de verre/époxy travaillant essentiellement en compression, comportant deux niveaux d'interception thermique (50 K et 5 K). Des écrans de faisceau, refroidis par circulation forcée d'hélium supercritique entre 5 et 20 K, équipent les ouvertures des aimants.

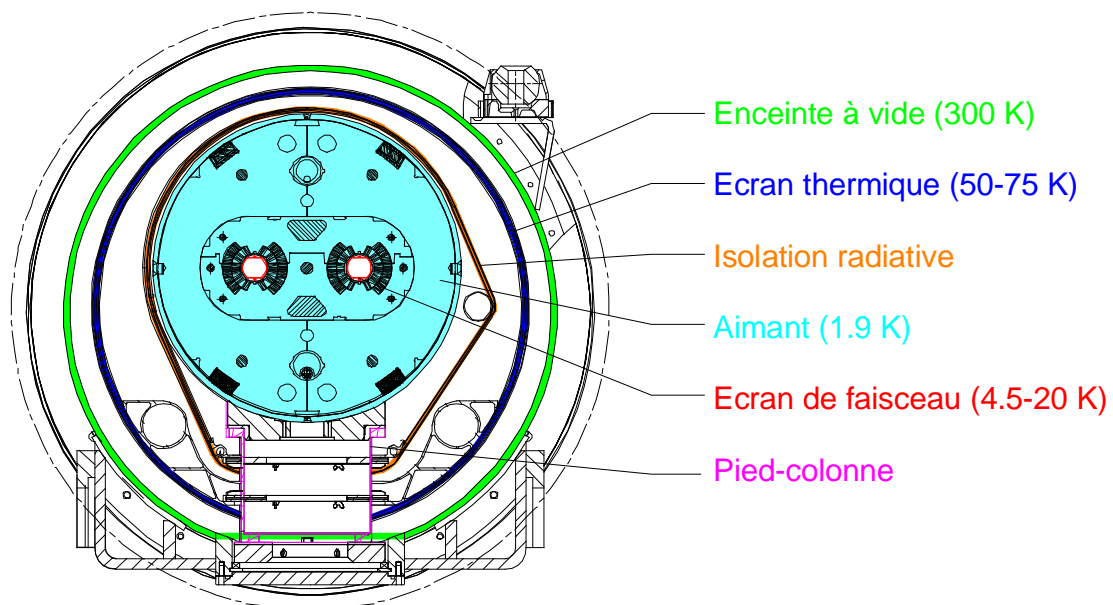


Figure 3 : Coupe transversale de l'aimant principal dans son cryostat

Table 1 : Charges thermiques nominales des cryo-aimants en régime stationnaire

Niveau de température [K]	Entrées de chaleur [W/m]	Charges thermiques dynamiques [W/m]		Total [W/m]
		Dissipation résistive	Charges induites par les faisceaux	
50-75	4,51	0,016	-	4,53

4,6-20	0,14	0,003	1,59	1,72
1,9	0,19	0,1	0,085	0,38

Le dimensionnement des besoins en froid dans la phase initiale de conception requiert la prise en compte de l'incertitude sur les valeurs estimées de charges thermiques : on peut commencer avec un facteur de 1,5 qui se verra graduellement réduit avec le développement du projet et les résultats de mesures sur prototypes. En outre, un facteur de surcapacité doit également être appliqué pour pouvoir mettre en froid en un temps fini et compenser la dégradation possible de capacité des réfrigérateurs dans le temps.

Le rapport entre la puissance de réfrigération installée et les charges thermiques statiques définissent la gamme dynamique de fonctionnement. La conception, la configuration et le contrôle-commande des réfrigérateurs doivent leur permettre de fonctionner efficacement en tout point de cette gamme dynamique. Le recours au chauffage électrique dans les bains d'hélium, qui peut s'avérer nécessaire pour traverser des transitoires plus rapides que le temps de réponse des réfrigérateurs, ne doit en aucun cas être utilisé en régime permanent.

Distribution cryogénique

Pour des projets cryogéniques s'étendant sur plusieurs kilomètres, tels les grands accélérateurs de particules, le système de distribution cryogénique peut représenter une source importante d'inefficacité. Il doit donc être conçu selon les mêmes principes que les cryostats, en limitant les charges thermiques et les irréversibilités (pertes de charge et écarts de température). L'utilisation de lignes cryogéniques multitubes sous vide permet de réduire les entrées de chaleur, les tubes les plus froids pouvant être écrantés par les circuits à plus haute température. La mise en circulation du fluide caloporteur par des pompes contribue substantiellement aux irréversibilités, le travail de compression étant dissipé à basse température : il s'avère donc essentiel de le réduire au strict minimum, en limitant le débit volumique en circulation et les pertes de charge du circuit, et en choisissant des pompes de circulation à haut rendement, ou mieux, en s'affranchissant totalement de ces pompes par des systèmes de circulation naturelle, tels les thermosiphons ou les caloducs. Dans le cas de pompes volumétriques, l'adaptation du débit en circulation à des charges thermiques variables peut être réalisée avec une bonne efficacité par variation continue de vitesse. Ce n'est plus vrai pour des pompes hydrodynamiques, dont l'efficacité s'effondre lorsqu'on s'écarte de leurs conditions nominales de fonctionnement : dans ce cas, une conception modulaire mettant en œuvre plusieurs machines en parallèle permet l'adaptation de débit en conservant l'efficacité. Enfin, la limitation des

écarts de température en améliorant les processus de transfert de chaleur entre le fluide et le composant à refroidir réduit la perte d'exergie pour un transfert de chaleur donné.

Les secteurs du LHC qui s'étendent sur 3,3 km, sont refroidis entre 1,8 K et 1,9 K par des boucles d'hélium superfluide saturé en circulation naturelle sur 107 m, alimentées en parallèle par une distribution d'hélium supercritique à 5 K et maintenues à la pression de saturation de 16 mbar par une ligne de pompage froide de grand diamètre, tandis que la conduction dans l'hélium superfluide pressurisé assure le transfert de chaleur local dans les cryostats des aimants. L'absence de circulateur froid, l'utilisation optimale des propriétés thermo-hydrauliques de l'hélium et la thermométrie de précision conduisent à une efficacité exergetique du système de distribution cryogénique du LHC supérieure à 70 % [3, 4].

Réfrigération cryogénique

La réfrigération cryogénique du LHC est fournie par huit grands réfrigérateurs d'hélium (Figures 4 et 5), produisant un mix de puissances à différents niveaux de température d'une capacité totale équivalente à 18 kW à 4,5 K [5], installés en cinq points de la circonférence de l'accélérateur dont ils desservent les secteurs adjacents. Leur coefficient de performance atteint 230 W/W, ce qui correspond à une efficacité de 28,5 % par rapport au cycle de Carnot. Ils alimentent à leur bout froid huit installations de réfrigération de 2,4 kW à 1,8 K, utilisant des compresseurs hydrodynamiques froids en série avec des compresseurs volumétriques à température ambiante pour produire le taux de compression de 80 entre la pression de saturation de l'hélium à 1,8 K (16 mbar) et la pression atmosphérique [6]. La mise en série d'un train de machines hydrodynamiques avec une machine volumétrique permet une meilleure adaptation à des débits variables, en laissant « flotter » la pression intermédiaire. Le coefficient de performance mesuré à 1,8 K est de 930 W/W.

Tous ces équipements ont été fournis par l'industrie, en réponse à des spécifications techniques fonctionnelles et d'interfaces établies par le CERN, comportant une incitation à réduire les coûts intégrés de fonctionnement. Les contrats ont été adjugés sur la base d'une formule incluant le coût d'investissement et le coût estimatif de la consommation électrique intégrée sur 10 ans – ces deux termes s'avérant du même ordre de grandeur. La consommation électrique effective a été mesurée lors des essais de réception des réfrigérateurs dans les différents modes prédéfinis, et l'écart à l'estimation a donné lieu à l'attribution d'un bonus ou d'un malus financier. La mise en œuvre rigoureuse de cette stratégie incitative, des contrôles techniques afférents et des clauses commerciales correspondantes est sans nul doute à l'origine des valeurs d'efficacité record obtenues.



Figure 4 : Boîte froide d'un grand réfrigérateur d'hélium du LHC



Figure 5 : Station de compression d'un grand réfrigérateur d'hélium du LHC

Stratégies d'exploitation et résultats

Lors de la mise en service du LHC, la première tâche a consisté à refroidir chaque secteur et à y établir les conditions nominales de fonctionnement. Des indicateurs de performance ont été établis, qui donnaient la priorité à la disponibilité cryogénique, condition nécessaire à l'excitation des aimants supraconducteurs et donc à l'accélération des faisceaux. Avec l'expérience acquise, il est apparu que l'utilisation d'un seul réfrigérateur au maximum de sa capacité (au lieu de deux) pour alimenter deux secteurs adjacents – configuration permise et élément de redondance prévu par l'architecture du système cryogénique – permettrait d'améliorer à la fois la disponibilité et l'efficacité énergétique. Cette disposition, mise en œuvre sur deux des huit réfrigérateurs, économise aujourd'hui quelque 8 MW de consommation électrique (Figure 6), grâce à la combinaison de différents processus : la suppression du chauffage électrique résiduel à 1,8 K pour garantir le débit minimum requis à l'aspiration des compresseurs hydrodynamiques froids économise 2,5 MW, l'amélioration de l'efficacité des réfrigérateurs fonctionnant au voisinage de leur capacité nominale permet de gagner 3,5 MW, le pilotage fin des réfrigérateurs en réduisant les marges de fonctionnement économise 2 MW. Il est à noter que cette économie de fonctionnement ne s'est pas faite au détriment de la disponibilité du système, qui est restée globalement supérieure à 90 % – ce qui représente par installation une disponibilité unitaire dépassant 99 %.

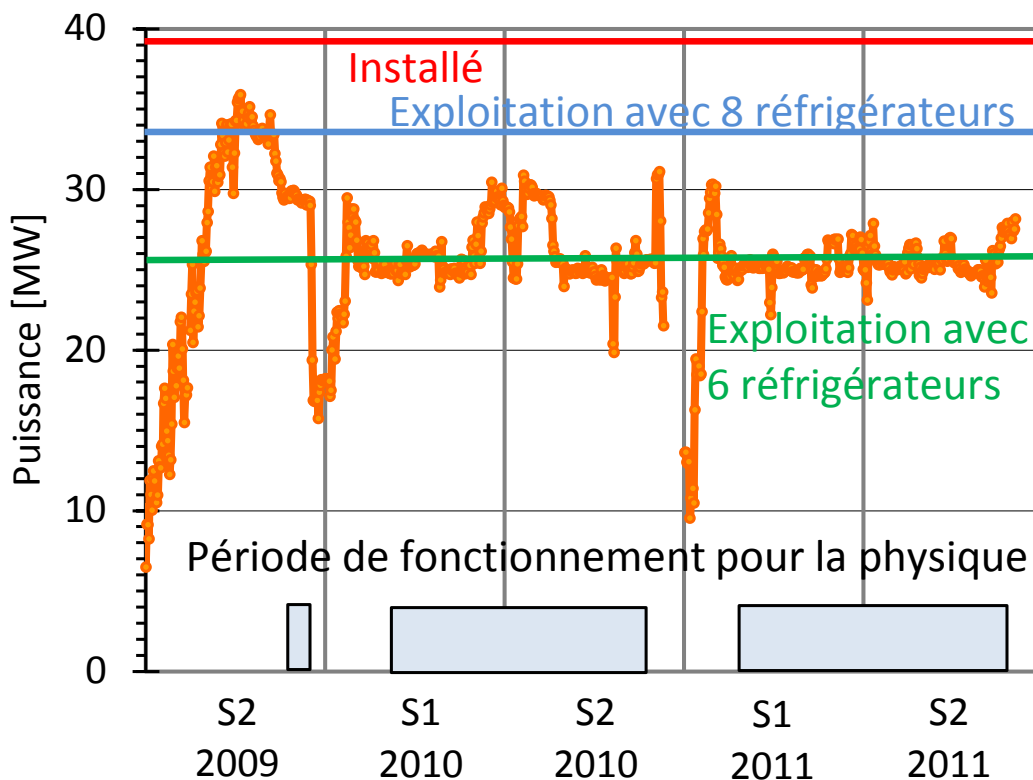


Figure 6 : Consommation électrique de la cryogénie du LHC de 2009 à 2011

Quelques pistes de développements futurs

Les concepteurs de systèmes cryogéniques sont habituellement bien sensibilisés à la criticité d'une bonne gestion des charges thermiques et d'un bon rendement des installations de réfrigération. Il semble qu'ils le soient beaucoup moins à l'importance de l'efficacité des systèmes de distribution cryogénique, qui peuvent représenter une source majeure d'irréversibilité et donc un important gisement d'économies potentielles. L'utilisation de lignes cryogéniques à faibles pertes et l'absence de pompes de circulation, ou au moins la limitation des débits volumiques et des pertes de charge, constituent les facteurs clés de ces économies.

En ce qui concerne les réfrigérateurs, l'augmentation des capacités unitaires des installations a permis jusqu'ici d'en améliorer substantiellement le coefficient de performance, par des gains d'efficacité sur les cycles thermodynamiques et sur les composants (compresseurs, échangeurs de chaleur et turbines de détente). Leur point faible reste la station de compression, avec des rendements isothermes ne dépassant pas 55 % pour les compresseurs à vis lubrifiés. L'utilisation alternative de compresseurs hydrodynamiques pour les premiers étages de futures installations de grande puissance constitue une piste de progrès technique à explorer.

Références

- [1] Lebrun Ph., Cryogénie et supraconductivité pour le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN, Revue Générale du Froid, 1050, pp. 33-40, 2005
- [2] Brüning O. *et al.* (editors), LHC Design Report, Vol.1, The LHC Main Ring, CERN-2004-003, 2004
- [3] Claudet S., Brodzinski K., Ferlin G., Lebrun Ph., Taviani L., Wagner U., Energy efficiency of large cryogenic systems: the LHC case and beyond, invited paper at ICEC24 Fukuoka (Japan), 2012
- [4] Claudet S., Lebrun Ph., Taviani L., Wagner U., Exergy analysis of the cryogenic distribution system for the Large Hadron Collider (LHC), Advances in Cryogenic Engineering, Vol.55, pp. 1267-1274, 2008
- [5] Gruehagen H., Wagner U., Measured performance of four new 18 kW @ 4.5 K helium refrigerators for the LHC cryogenic system, Proceedings of ICEC20 Beijing, Elsevier, pp. 991-994, 2005
- [6] Claudet S., Ferlin G., Millet F., Taviani L., 1.8 K refrigeration units for the LHC: performance assessment of pre-series units, Proceedings of ICEC20 Beijing, Elsevier, pp. 999-1002, 2005