



Andrzej Siemko
CERN

Les aimants supraconducteurs

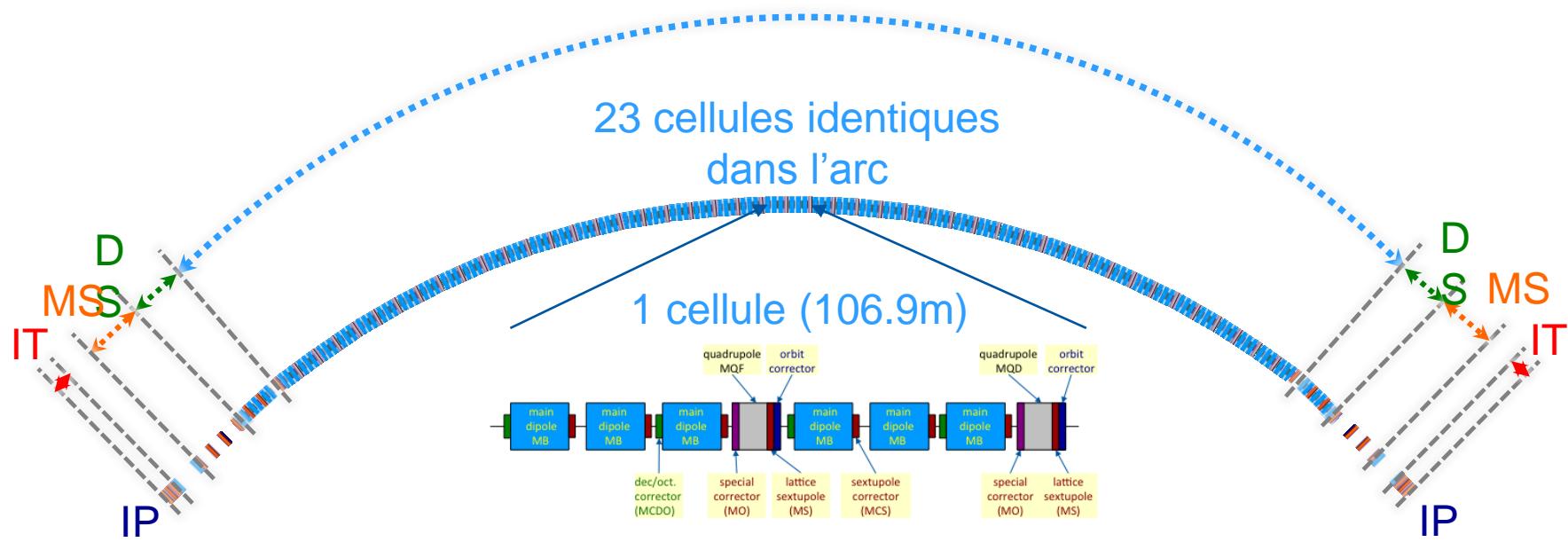


Sommaire

- Topologie et typologie des aimants du LHC
- Mise en service ('*Commissioning*') et limitations rencontrées
- Performance des circuits magnétiques du LHC sur les années 2010-2013
 - Performance électrique
 - Performance magnétique
- Programme de consolidation durant le LS1 (2013-2014)
- Conclusions

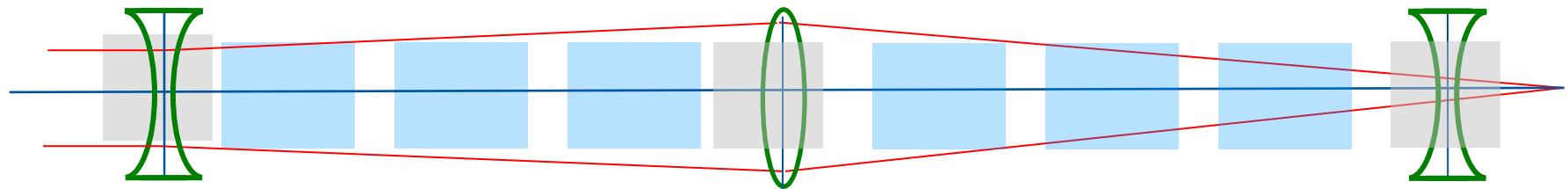


Vue schématique d'un secteur du LHC



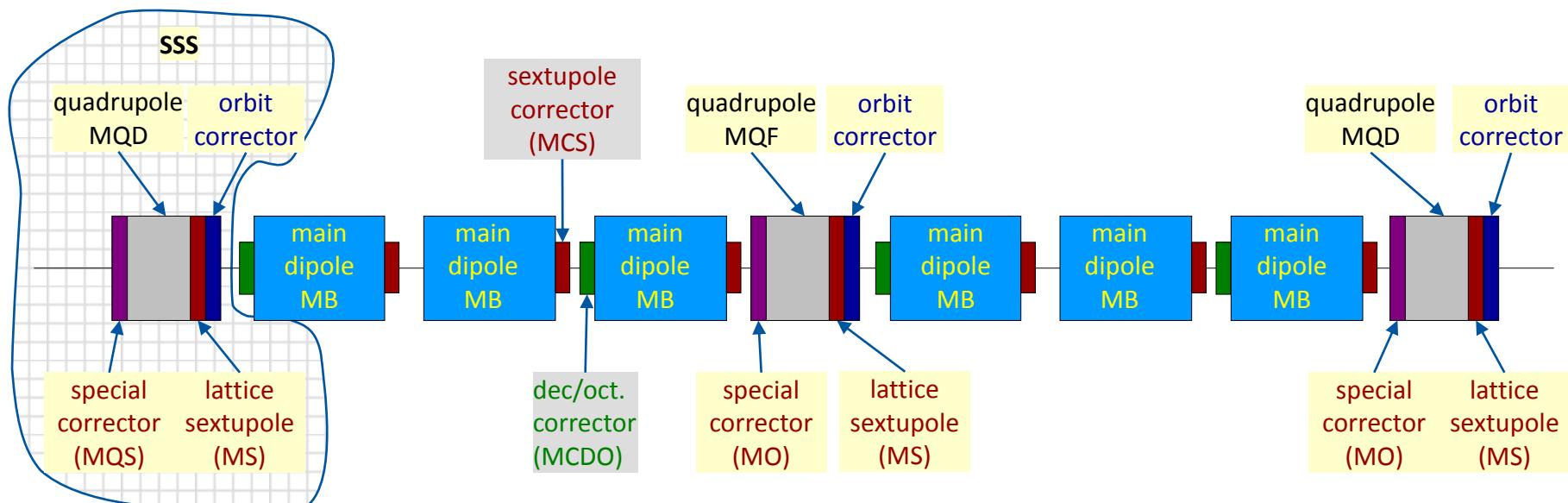
- IP : Point d'interaction
- IT : Triplés “low- β ”
- MS : Quatre aimants ‘matching’ quadripôles
- DS : La partie Suppression-Dispersion consiste en 4 aimants quadripôles alimentés individuellement et séparés par 2 aimants dipôles; elle sert à réduire la dispersion dans les zones d'insertion et à adapter l'orbite de référence du LHC au tunnel du LEP.
- Chaque arc, ou secteur, possède 1 DS et 1 MS à chaque extrémité.
- Les points d'interaction (IT) sont situés en IP1, IP2, IP5 and IP8.

Une cellule dans un arc du LHC



Aimants quadripôles pour contrôler la taille du faisceau et pour garder ensemble les protons (à la manière d'une lentille optique)

Cellule LHC - Longueur d'env. 106.9 m (vue schématique)



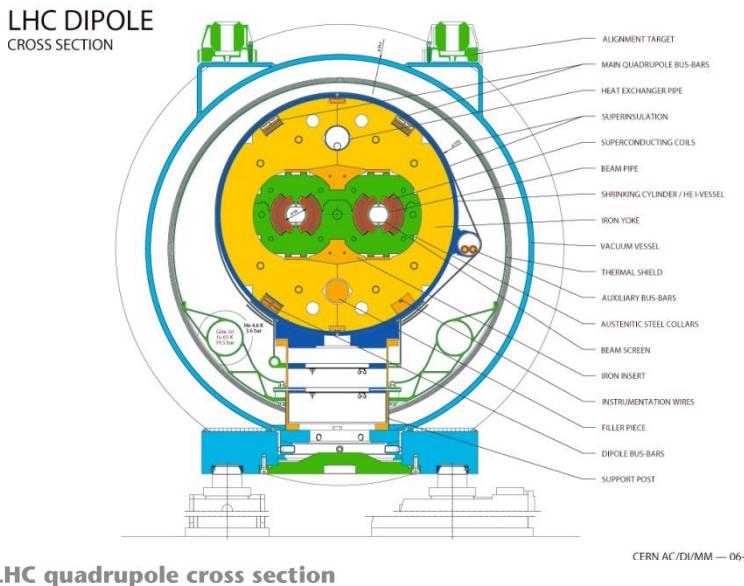
Les aimants principaux du LHC

Aimants principaux dipolaires (ou Dipôles):

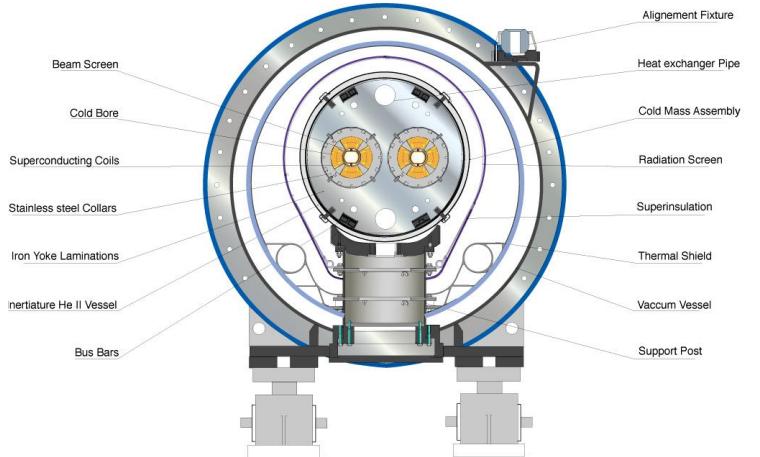
- Le principal défi technologique du LHC a été les aimants dipôles supraconducteurs qui servent 'à courber' les faisceaux sur une circonférence de 27 km.
- A une énergie de 7TeV, ces aimants doivent fournir un champ magnétique d'environ 8.34 Tesla pour un courant d'environ 11,850 Ampères.
- Les aimants ont deux ouvertures (conception d'aimant 2-in-1), une pour chacun des 2 faisceaux qui circulent en sens inverse.
- La longueur d'un aimant dipôle est de 15 mètres.
Au total, 1232 dipôles sont nécessaires.
- Le champ vertical B dans un dipôle courbe la trajectoire du faisceau grâce à la force de Lorentz.
- Le poids d'un aimant dipôle est d'env. 35 tonnes.

Aimants principaux quadripolaires (ou Quadripôles):

- Les Quadripôles servent à focaliser les faisceaux et à stabiliser leurs mouvements

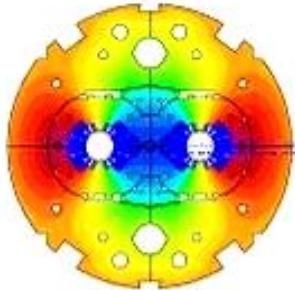


LHC quadrupole cross section

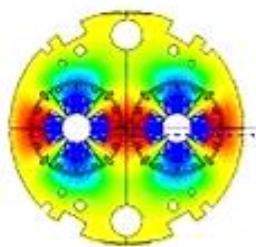


Les différents types d'aimants du LHC

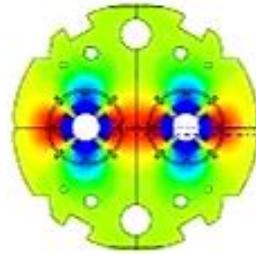
Dipole



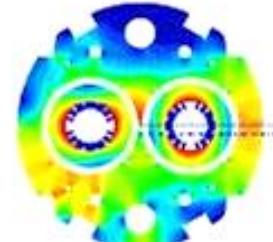
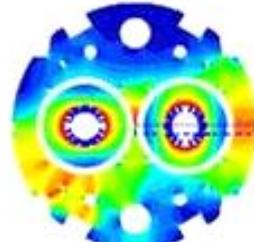
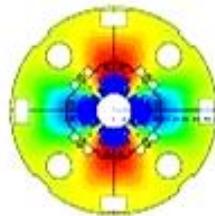
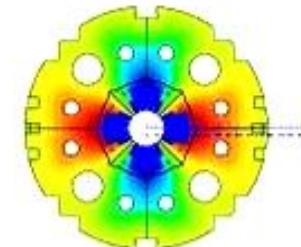
Main Quad



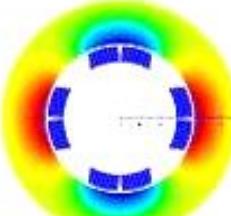
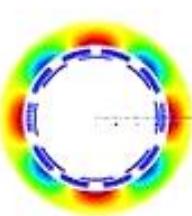
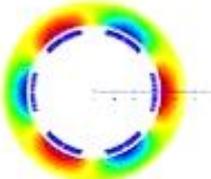
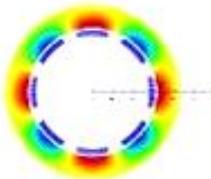
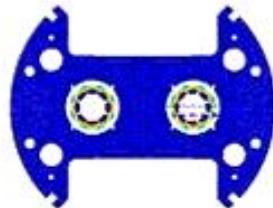
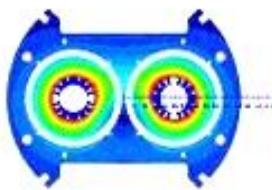
Individually Powered Quads



Triplet Quads



Correctors, correctors, correctors (dipoles...do-decapoles)



More than 50 types of magnets in the LHC

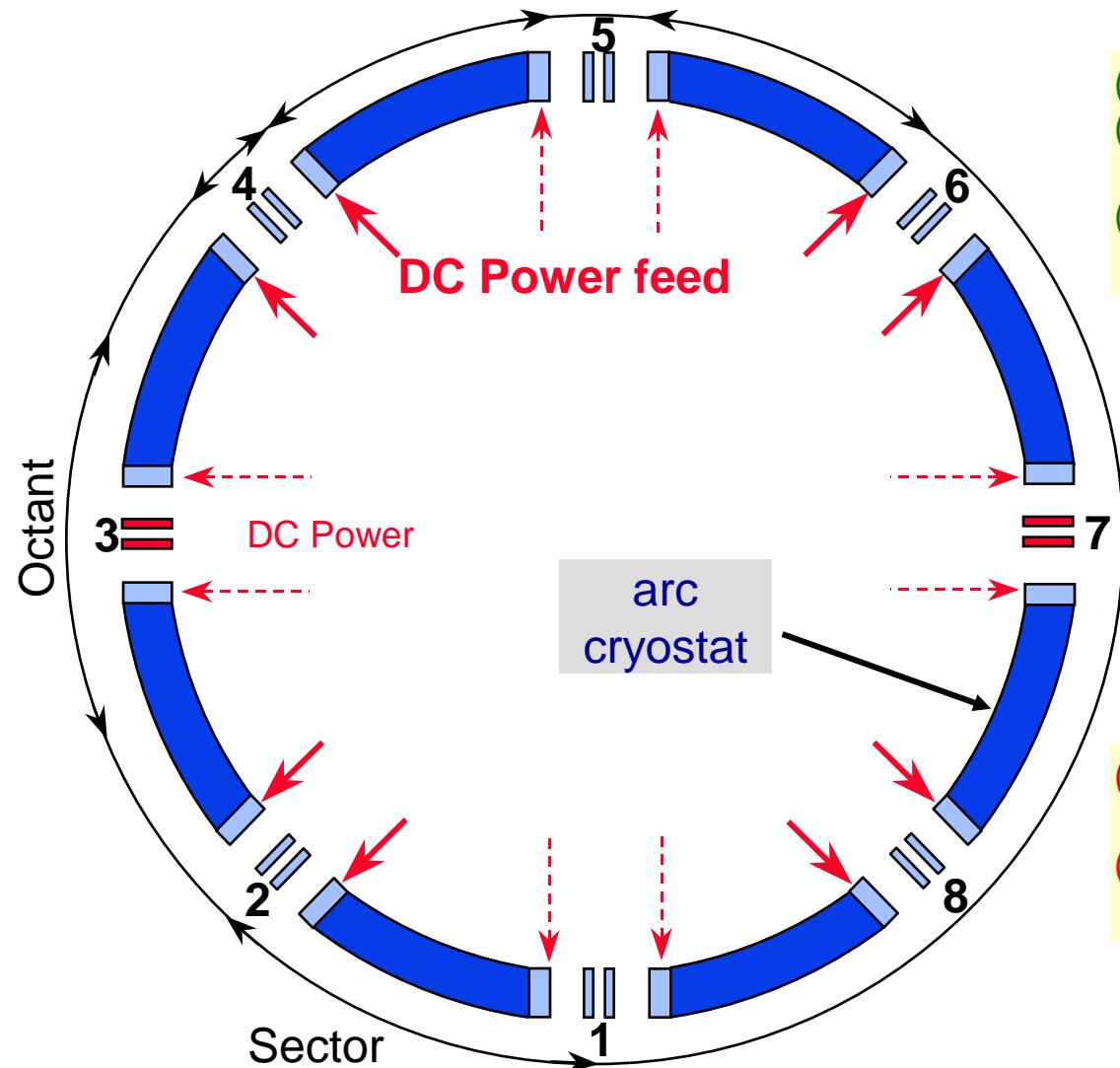
Inventaire des aimants dans le LHC

- **1232** aimants principaux dipôles alimentés en série avec le même courant.
- **392** Quadripôles focalisant et de-focalisant alimentés en série.
- Plus de **9000** correcteurs et aimants spéciaux alimentés en série ou individuellement:
 - Pour corriger la trajectoire des particules,
 - Pour corriger les imperfections du champ,
 - Pour supprimer les instabilités, etc.,
 - Pour s'assurer du croisement des faisceaux, augmenter la distance entre faisceaux, pour focaliser les faisceaux pour les Expériences etc...
- Total de 10 762 aimants supraconducteurs dans le LHC

TYPE_NAME	COUNT	TYPE_NAME	COUNT
MCS	2464	MCBX	24
MB	1232	MCBXH	24
MCDO	1232	MQTLH	24
MCO	1232	MQY	24
MCD	1232	MCBXV	24
MS	688	MCBYB	20
MQ	392	MCBYA	18
MCBV	376	MQXA	16
MCBH	376	MQXB	16
MO	166	MQMC	12
MQT	161	MCSTX	8
MSCBA	158	MCBCD	8
MSCBB	154	MCSOX	8
MCBCH	84	MCSX	8
MCBCV	84	MCSSX	8
MSS	64	MCBXA	8
MQM	38	MQSX	8
MCBYH	38	MCTX	8
MCBYV	38	MCOSX	8
MQML	36	MU	8
MQTLI	36	MBRC	8
MCBCA	35	MCBCC	8
MCBCB	33	MCOX	8
MQS	33	MBRS	4
MSCBD	32	MBX	4
MSCBC	32	MBRB	2
Total			10762



LHC = 8 Secteurs alimentés indépendamment



- (+) Less energy & voltage per circuit
- (+) For superconducting magnets, no DC powering across IPs
- (+) Commissioning possible for each sector, independent of other sectors

- (o) Main DC power feed at even points (MB, MQ)
- (o) Some DC power feed at odd points

- (-) Higher complexity, i.e. more powering equipment needed (converters, DFBs,...)
- (-) More complex circuit tracking between circuits

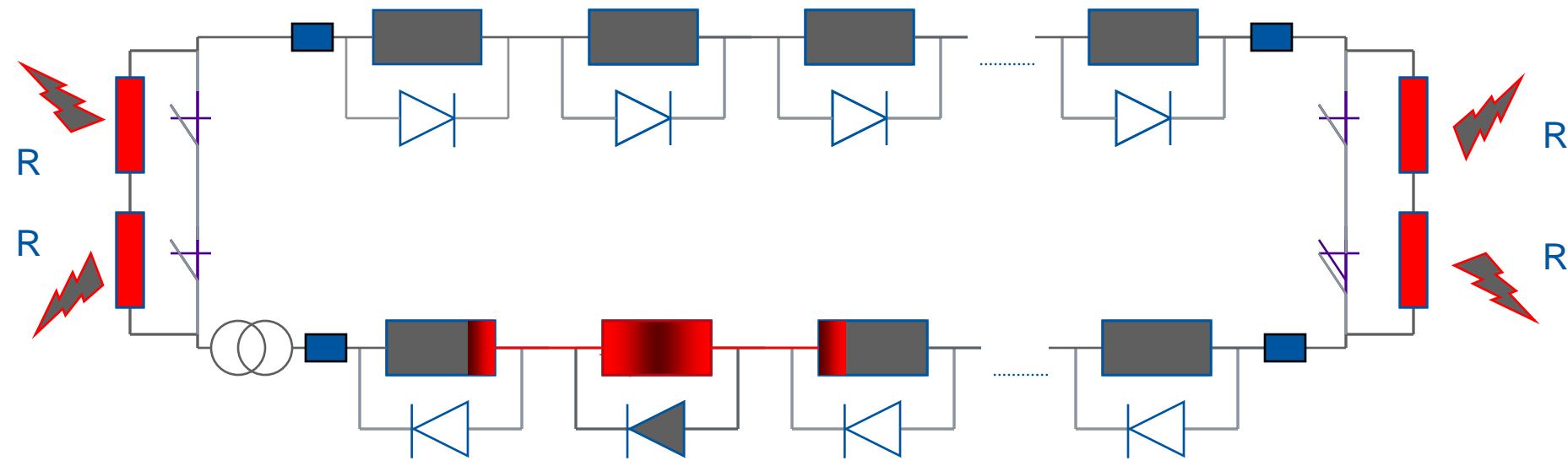
Types de Circuits définis pour l'Opération

- 60A (752 orbit corrector circuits)
- 80-120A (284 LSS and DS orbit correctors)
- 600A EE (202 x 600A correctors with Energy Extraction System)
- 600A no EE (72 x 600A correctors without Energy Extraction)
- 600A no EE crowbar (136 x 600A correctors without EE, but crowbar)
- IPQ (\sim 6kA) (78 x Individually powered quads, Q4-Q10)
- IPD (\sim 6kA) (16 x Separation and re-combination dipoles)
- IT (\sim 7-11kA) (8x Main Inner Triplet Circuits)
- Main Dipole and Quadrupoles (\sim 12kA) x 24
- WARM x40

- **1612 circuits électriques au total.**
- **Energie stockée dans les aimants:**
 - jusqu'à 1,3 GJ par secteur
 - **Valeur totale sur tout le LHC \sim 11 GigaJoules**

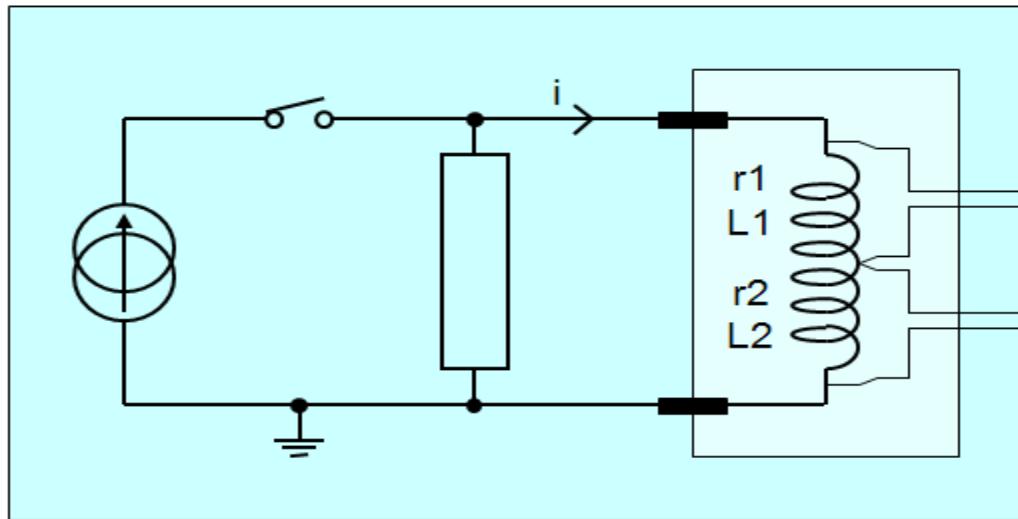


Protection des circuits - Quench Protection System (QPS)



1. Detection.
2. Propagation artificielle de la transition
3. Isolation de l'aimant qui transite
4. Ouverture des disjoncteurs de puissance
5. Extraction contrôlée de l'énergie de la chaîne $\Delta t = 104\text{s}$

Détection de transition résistive



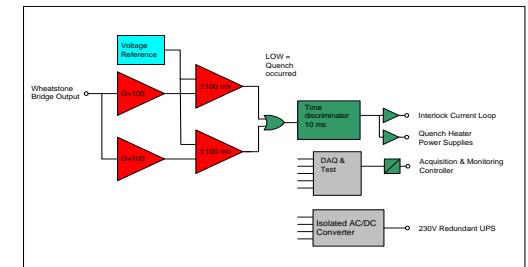
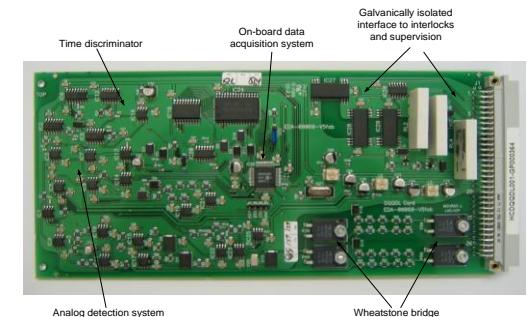
$$v_1 = r_1 \cdot i + L_1 \cdot \frac{di}{dt}$$

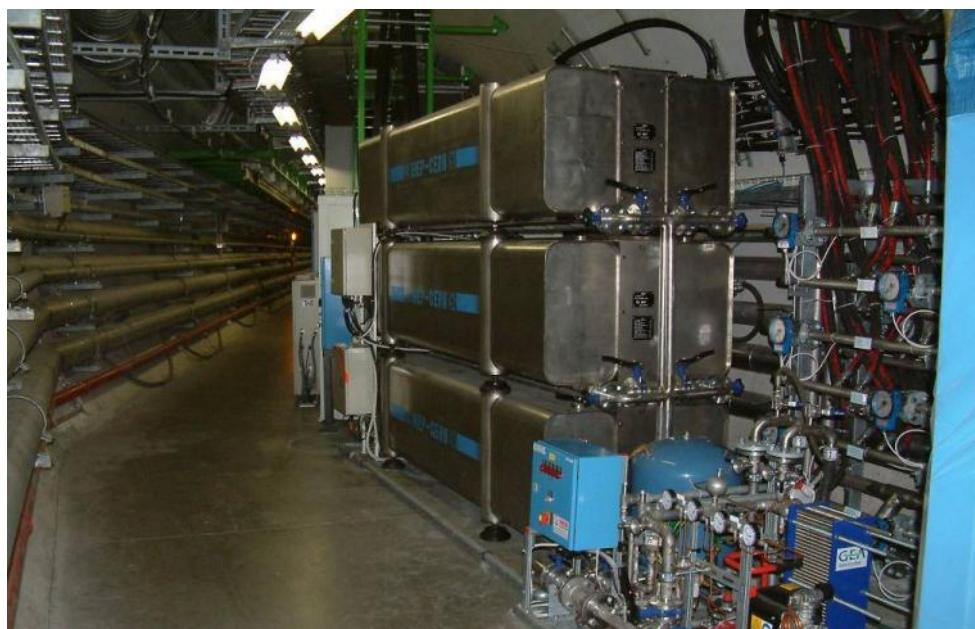
$$v_2 = r_2 \cdot i + L_2 \cdot \frac{di}{dt}$$

$$v_1 - v_2 = (r_1 - r_2) \cdot i + (L_1 - L_2) \cdot \frac{di}{dt}$$

= 0 si supraconducteur

= 0 si les tensions se compensent

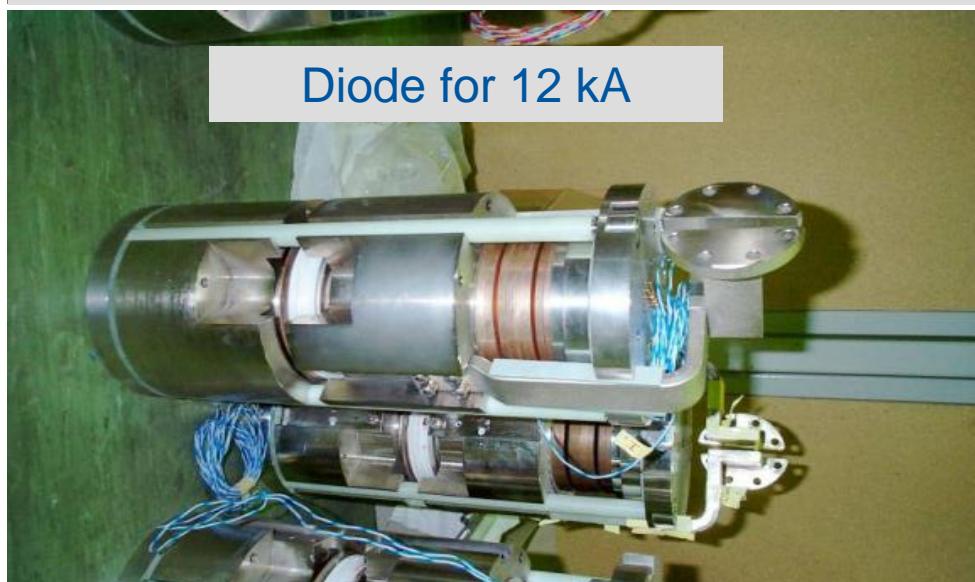




Energy extraction resistors MB



Energy extraction switch house 12 kA



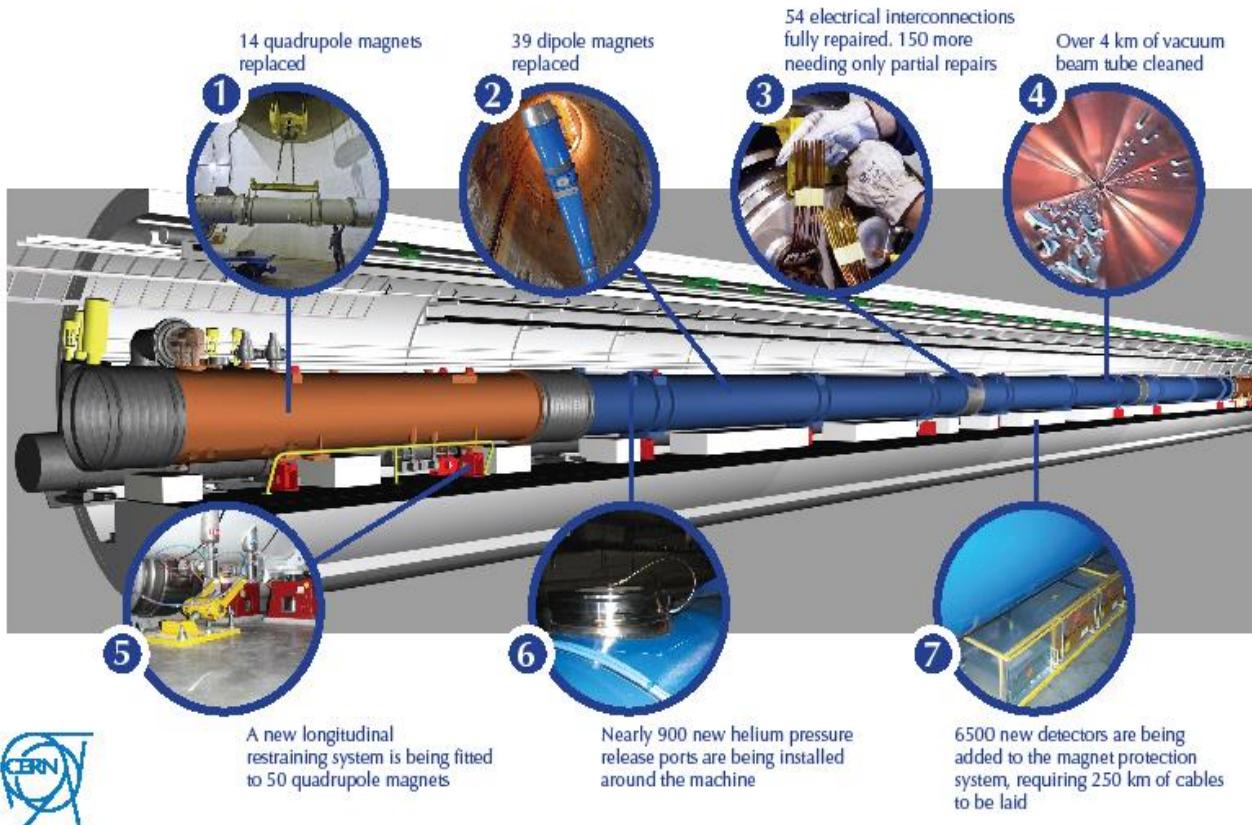
LHC startup in 2008

- **September 10, 2008**
- First beams circulate around LHC. Historical day and great success.
- **September 19, 2008**
- Accidental release of 600 MJ stored in one sector of LHC.



Huge campaign of repairs in 2009

The LHC repairs in detail

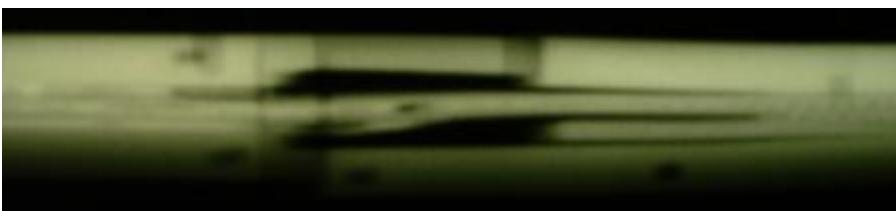


Principale limitation pour atteindre l'énergie maximale dans le LHC

Pour les années d'opération 2010-2013, l'énergie maximum a été limitée par les défauts des interconnections des bus-barres en cuivre ('Cu-busbar splices')



Echantillon #1 ($61 \mu\Omega$)



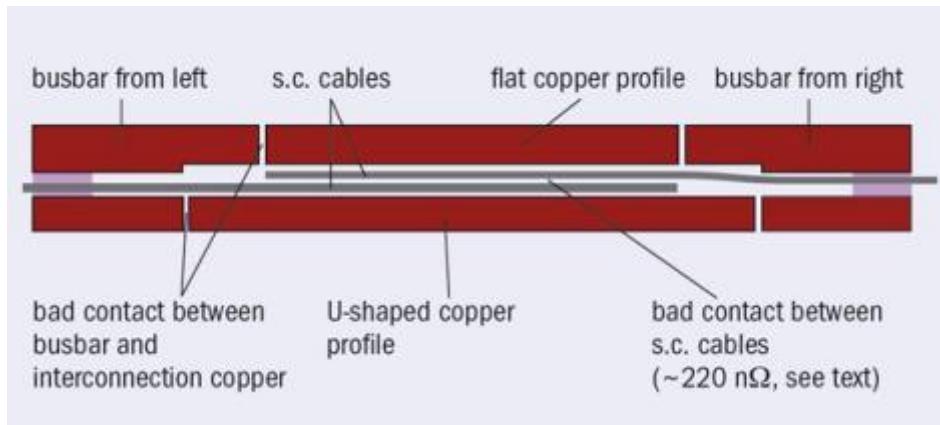
Echantillon #2A gauche ($32 \mu\Omega$)



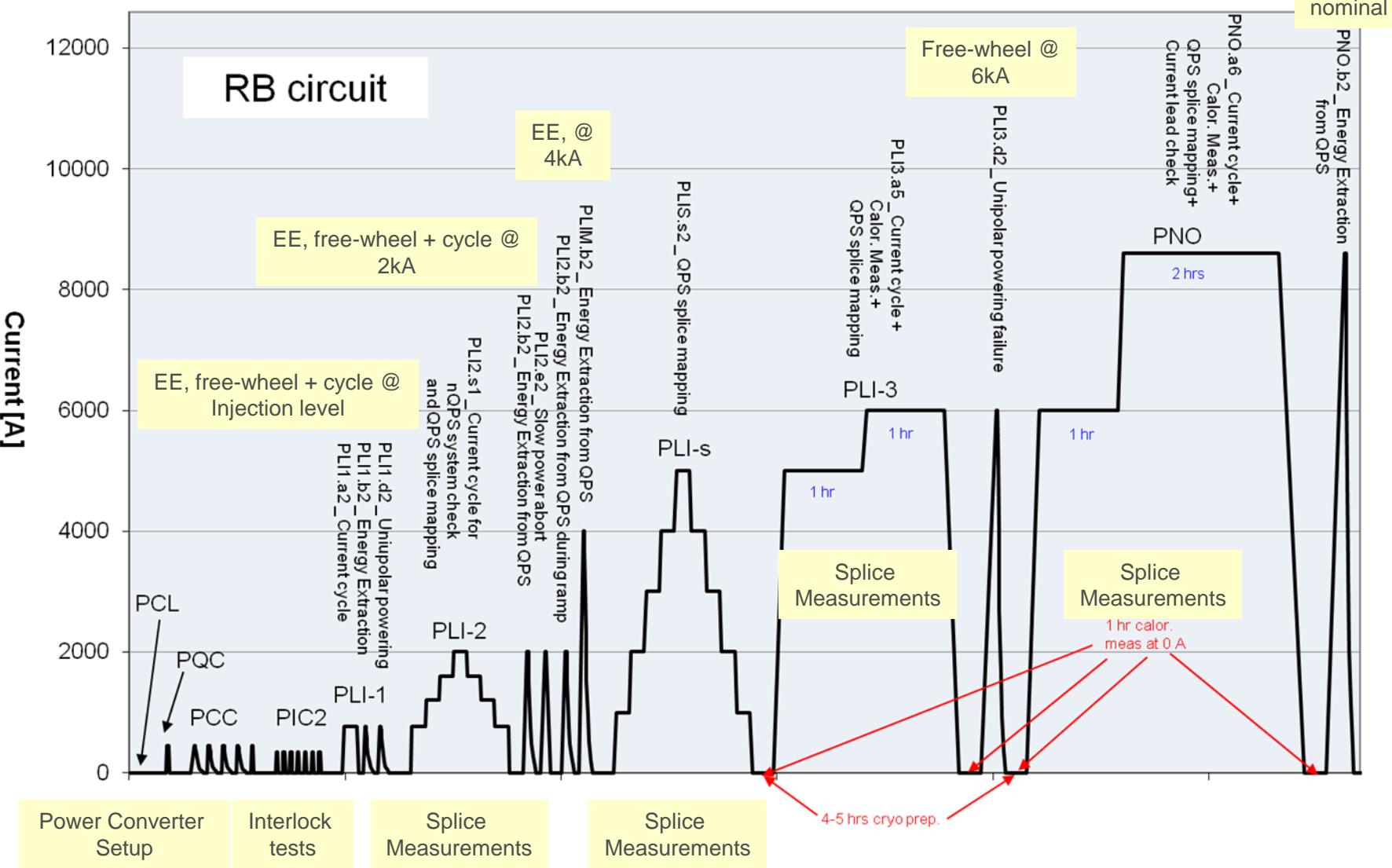
Echantillon #2B ($42 \mu\Omega$)



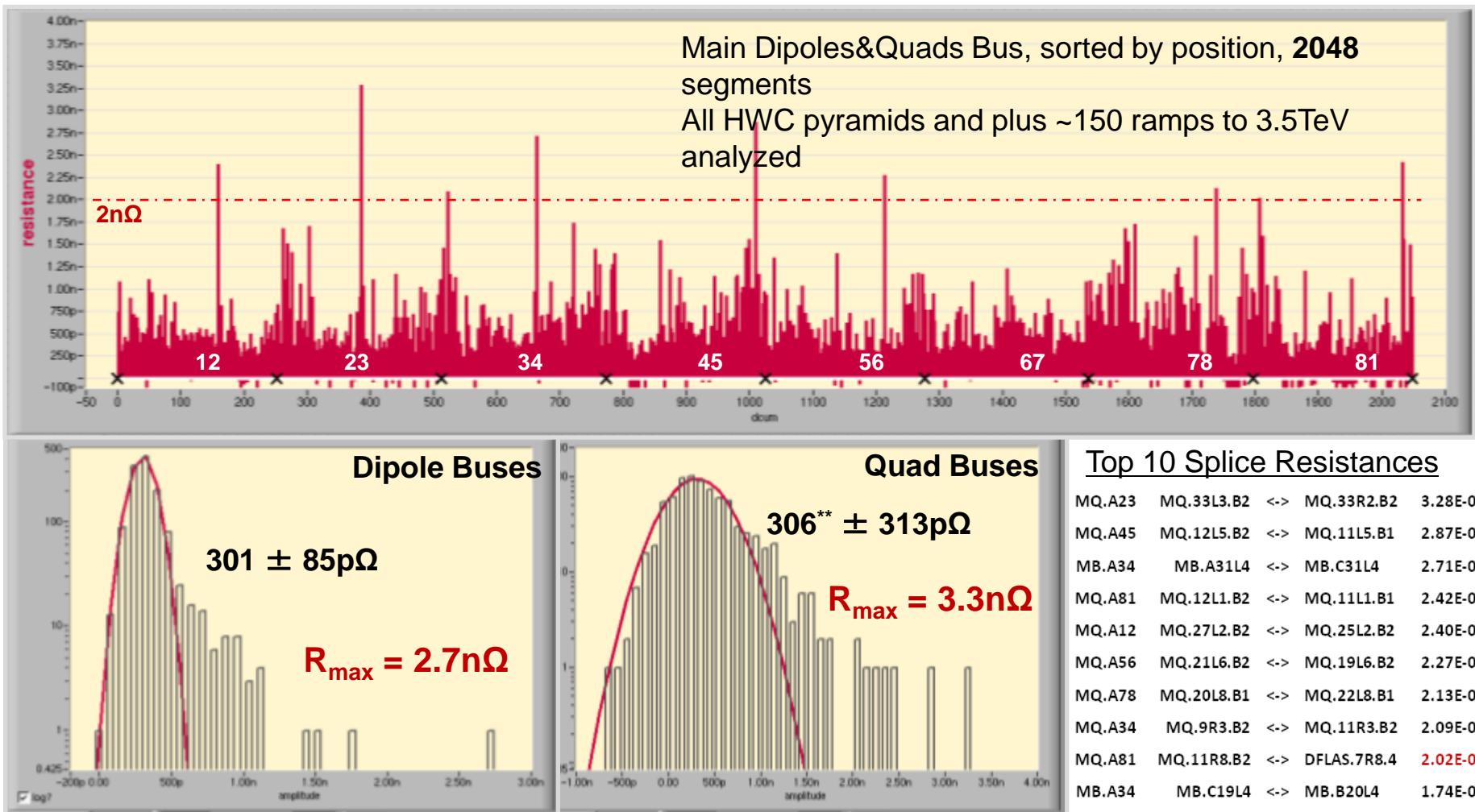
Echantillon #3A droit ($43 \mu\Omega$)



Mise en service 2010 (Hardware Commissioning)



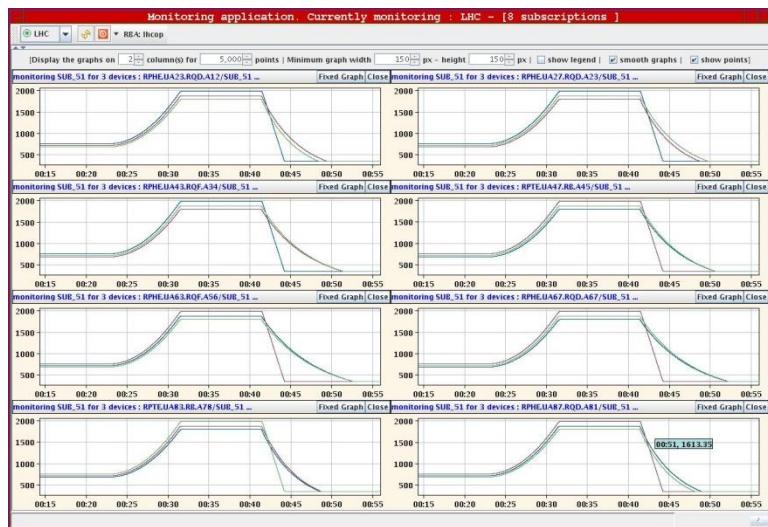
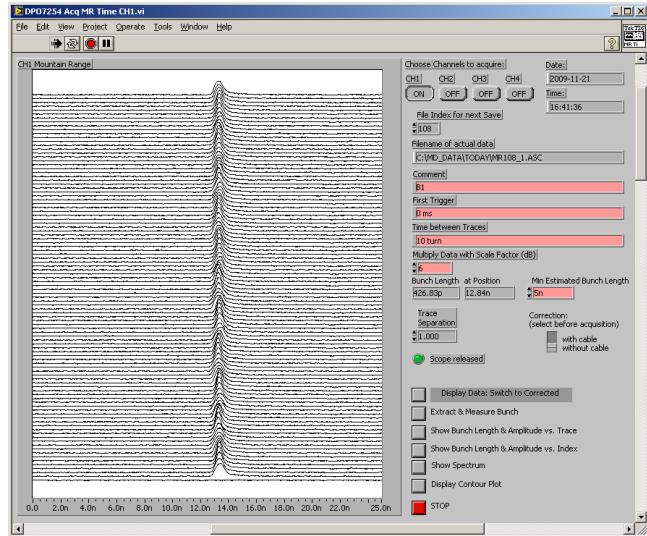
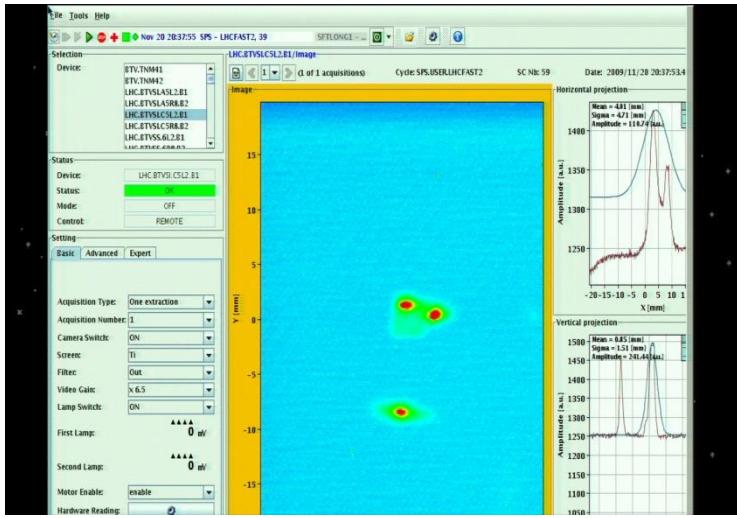
Qualité des interconnections Supra ('SC splices')



(**) number of splices in the quads segments corrected, 1.3 added



Mise en service avec faisceau



Andrzej SIEMKO.

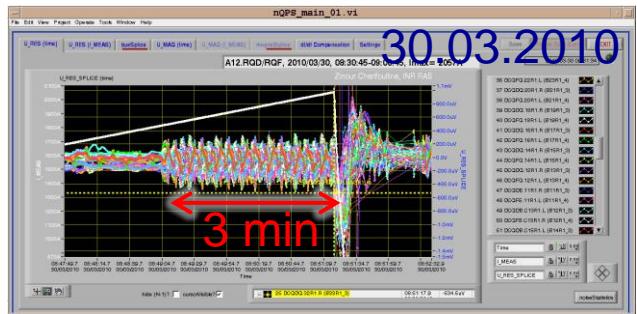
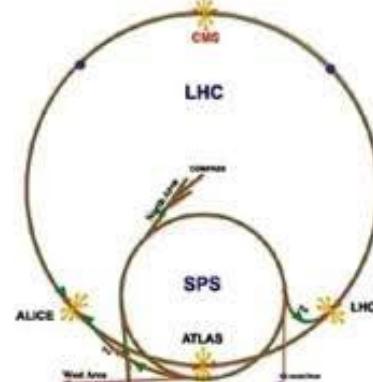
06/06/2013

Les aimants supraconducteurs.

Circuit d'un aimant principal du LHC : Problèmes rencontrés

Interférence du pré-accelérateur SPS dans le LHC
lors des premières collisions:
“the Media-Day Trip”

- 30 Mars 2010: alors que tous les médias étaient là pour regarder les premières collisions de particules à 3.5 TeV dans le LHC, les circuits RB.A81 and RB.A12 ont déclenchés lors de la première rampe...
- Raison:
 - Le niveau de bruit vu par la protection nQPS des bus-barres a régulièrement augmenté pendant 3 minutes jusqu'à atteindre le seuil de 520 μ V.
 - Le bruit était en fait induit par un déclenchement antérieur d'une alimentation de puissance d'un quadripôle QDF du SPS, qui ce jour là avait été découpé du circuit QD.
- Mesures prises:
 - Un ‘interlock’ a été rajouté pour forcer les quadripôles F. et D. à déclencher simultanément afin de réduire les bruits de fonds.



Circuit d'un aimant principal du LHC : Problèmes rencontrés

Nominal current 11850 A

Nominal field 8.33 T

Inductance at nominal field 15.2 H

Stored energy at nominal field 1.1 GJ

Power Converter 13 kA, 200 V

Filter inductance 250 μ H

Filter capacitance 100 mF

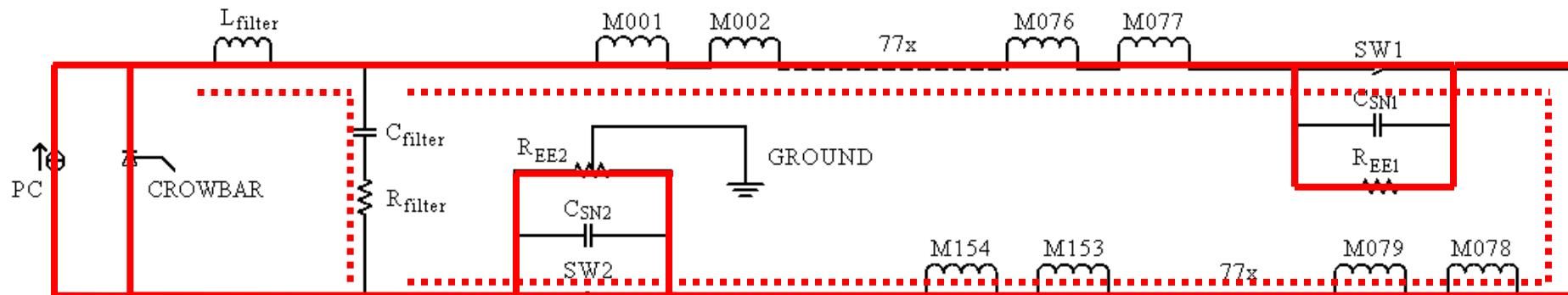
Filter resistance 3.3 → 10 m Ω

Energy extraction resistors 148 m Ω

Snubber capacitance 53 mF

Circuit decay time constant 51 s

Maximum voltage 1.9 kV



Fast Power Abort

Switch-off of Power Converter

Opening of 1st Switch

Opening of 2nd Switch

Voltage
Transients

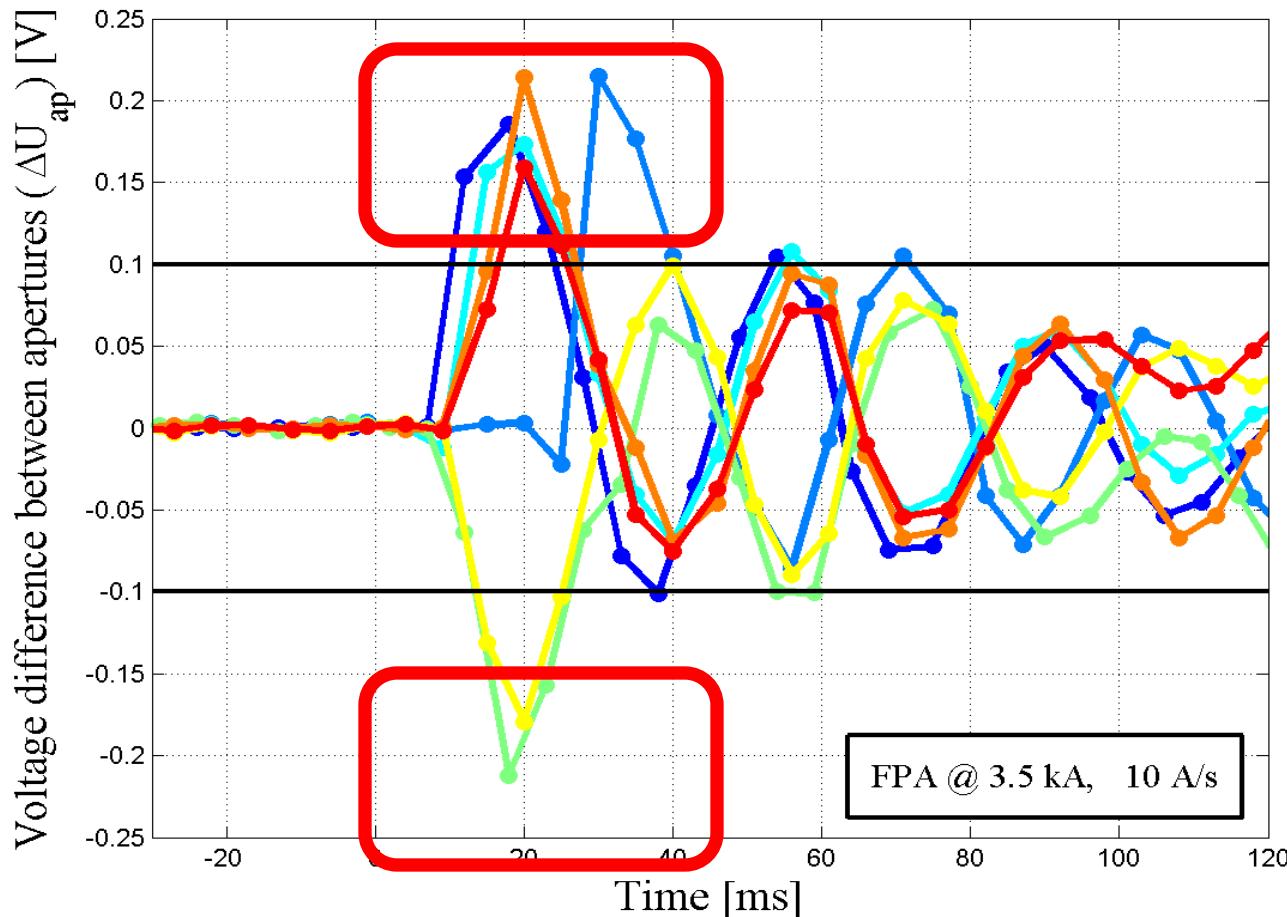
Triggering of initial
Quench Protection System

Triggering of new
Quench Protection System

Evènement du 17 Février 2010 dans le secteur 3-4

iQPS – Différence de potentiel entre 2 ouvertures d'un dipôle

Fast Power Abort at 3.5 kA, 10 A/s

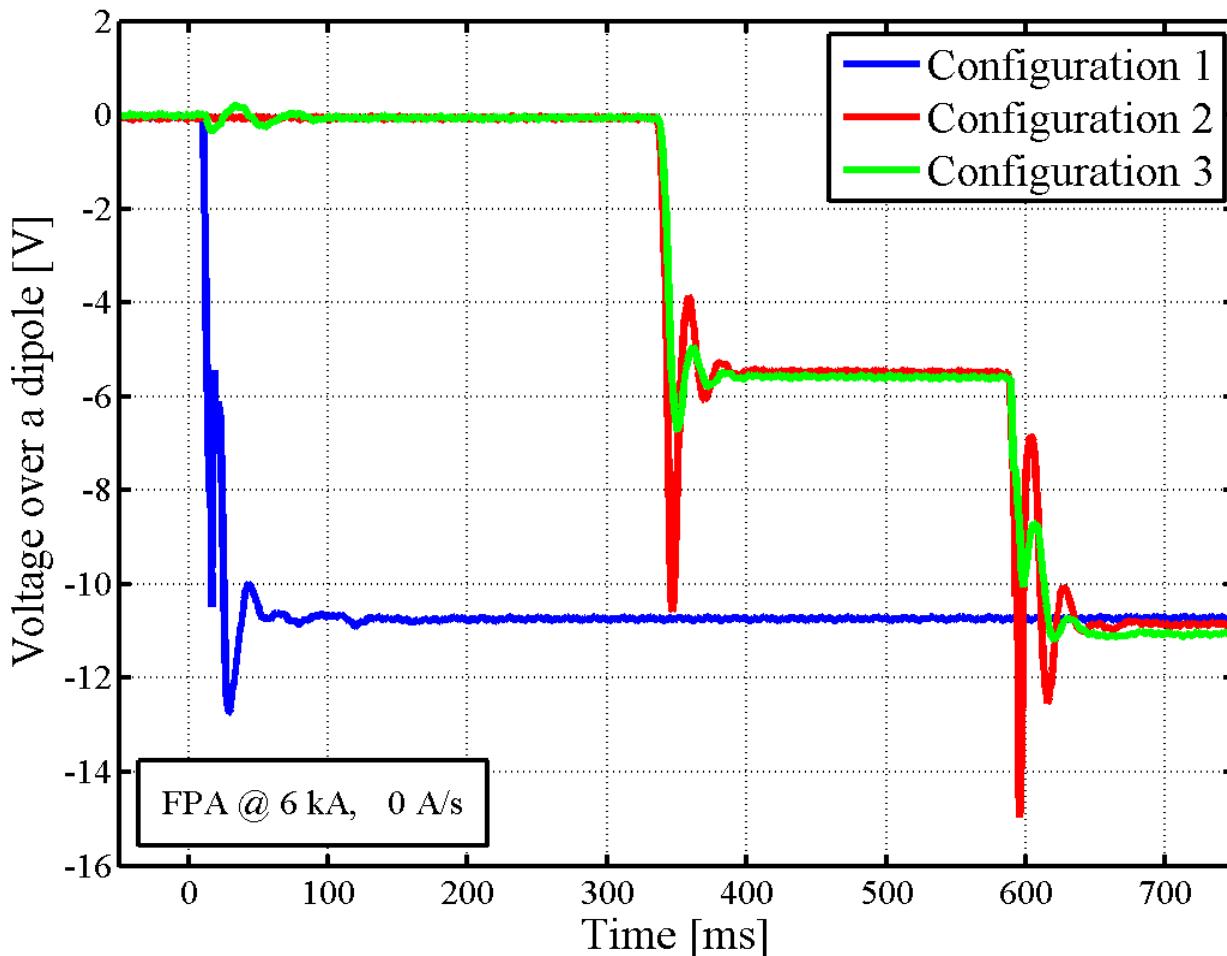


The Quench Protection System triggered and fired the quench heaters of 11 dipoles.

Cause: The voltage oscillations caused by the switching-off of the power converter and by the opening of the energy extraction switches travel along the dipole chain and cause a different voltage drop across the two apertures of the magnets.

Mars 2011 – Modification du Système de Protection de Quench (QPS) implémentée avant le redémarrage du LHC

Fast Power Abort at 6 kA, 0 A/s



Configuration 1

Before March 2011

Configuration 2

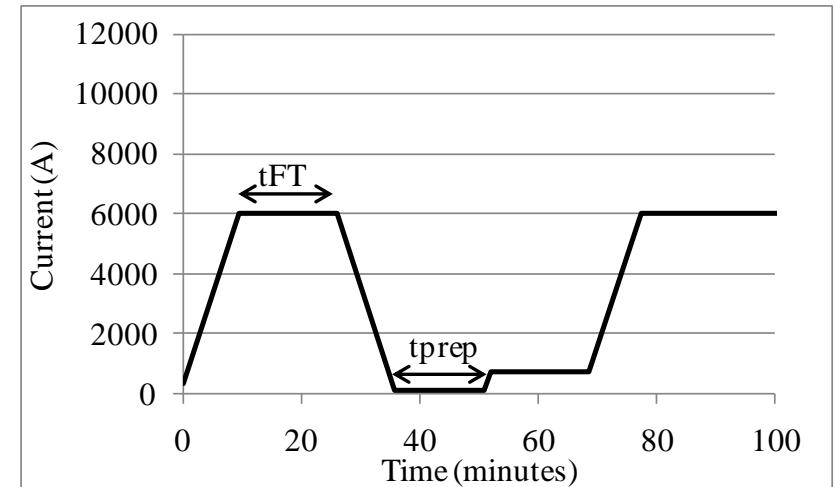
- Delay between the power-converter switching-off and the opening of the extraction switches

Configuration 3

- Delay between the power-converter switching-off and the opening of the energy extraction switches
- Snubber capacitors in parallel to the extraction switches
- Additional resistance in the filter at the output of the power converter

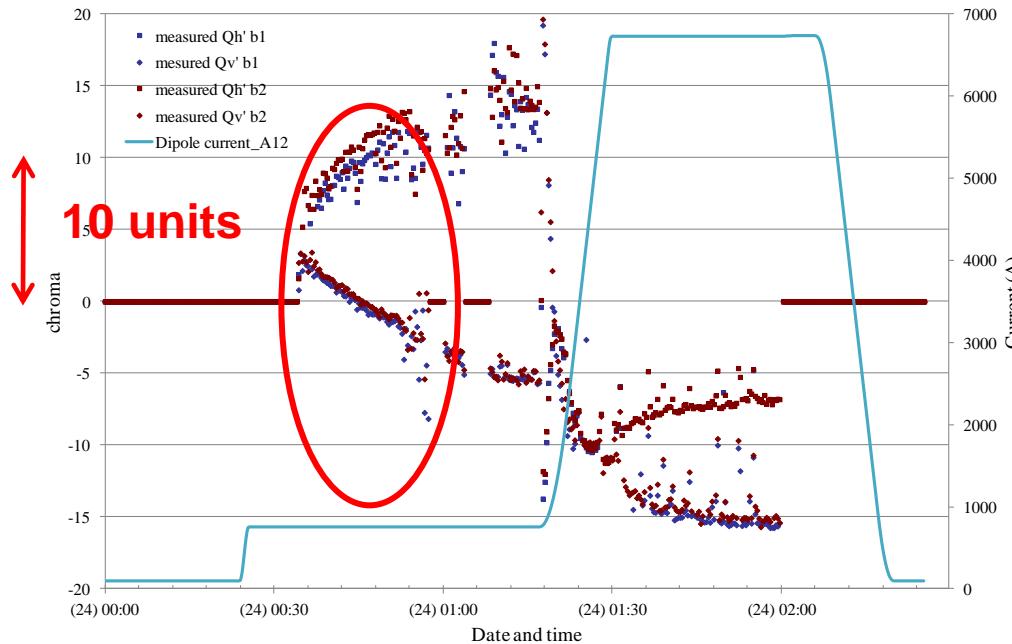
Caractéristiques principales & Défis pour la performance du champ magnétique et de son modèle

- Operation at 3.5 TeV (2011) and 4 TeV (2012)
 - Full exploration of the **injection** regime, where **magnetization effects** are stronger and the model is more challenging at injection
 - At 3.5-4 TeV magnets are very linear and no saturation is expected (this will be for 6.5-7 TeV !)
- Precycling strategy to ensure reproducibility [E. Todesco, et al, CERN ATS Report 2010 174]
 - Previous physics cycle used as a precycle → shorter turn around time (precycle only in <20% of ramps)
 - Precycling receipts strictly enforced
- Tune locked by feedback
- Chromaticity corrected by field model plus a feed forward



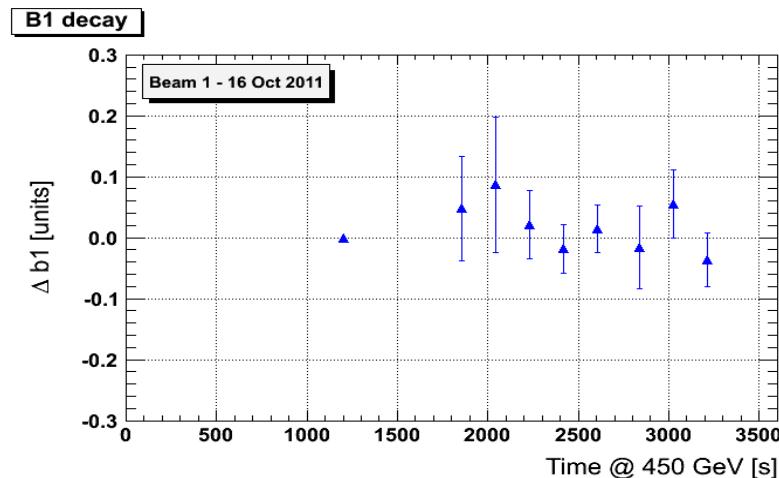
CHROMATICITY DECAY AT INJECTION

- Origin: decay of b_3 in the dipoles
 - Full amplitude: ~0.5 units corresponding to 20 chromaticity units
 - Expected decay times: 200 s – longer times found /significant decay during injection, to be corrected [N. Aquilina, et. Al, PRSTAB 15 032401 (2012)]
 - Correction implemented in April 2011 - good within 1-2 units

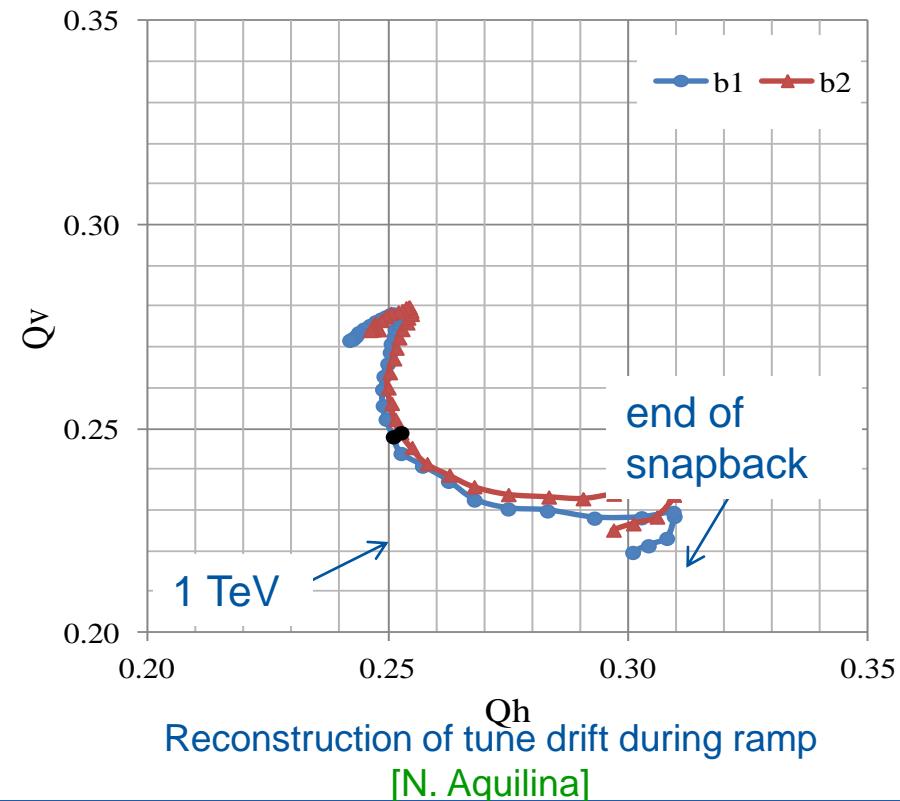


TUNE MODELING

- LHC has 5 different types of superconducting quadrupoles
 - Modeling of all transfer function at 0.1% relevant to control optics
 - Tune estimate in absence of feedback (postprocessing of beam data)
- Absolute precision at 450 GeV: 0.1%
- Absolute precision at 4 TeV: 0.05%
- Decay and snapback visible, not due to decay of the main field in the dipoles



Measured decay in main dipoles [J. Wenninger]



Les aimants supraconducteurs.



Tests de Puissance AVANT le LS1

- Objective:
 - Identify possible limitations (other than the splices of main circuits) for the operation at 7 TeV, that could eventually be fixed during LS1
 - Just before the LS1 540 circuits not powered yet to 7 TeV equivalent current
 - were tested, including IPQs, IPDs, ITs, 600 A and some 120 A circuits.
-
- The tests demonstrated that (apart from the main circuits) all other required LHC superconducting circuits can be powered up to 7 TeV.

CERN
CH-1211 Geneva 23
Switzerland

the
Large
Hadron
Collider
project

LHC Project Document No.
LHC-MPP-HCP-0102 ver. 1.0

CERN Div./Group or Supplier/Contractor Document No.
TE-BE

EDMS Document No.
1265662

Date: 2013-02-15

MP3 Procedure

Parameters to be used for the Powering Test Campaign before LS1

Abstract
This document describes the kind of tests and the circuit parameters to be used during the powering test campaign to be performed before LS1.

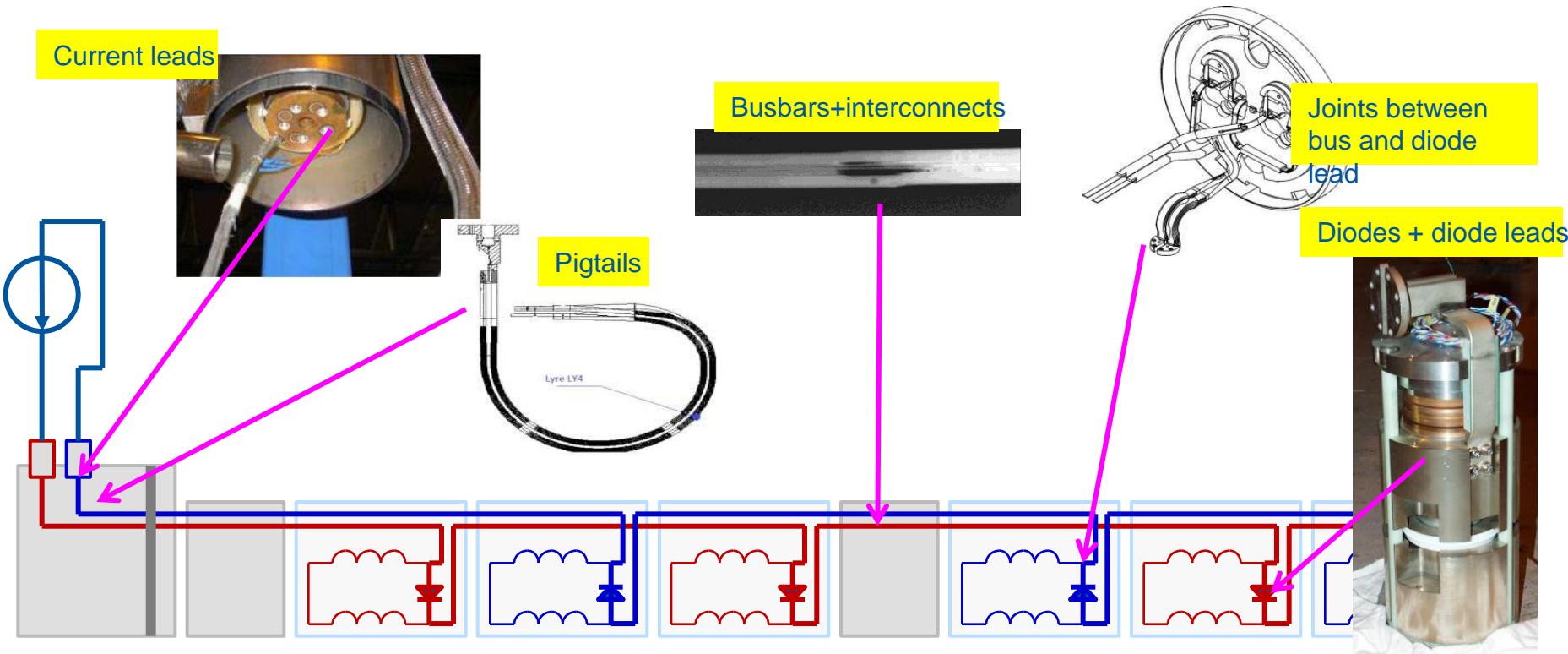
Prepared by: Mirko Pojer Matteo Solfaroli Camillocci	Checked by: Gianluigi Arduini Bernhard Auchmann Luca Bottura Gert-Jan Coelingh Knud Dahlerup Petersen Reiner Denz	Approved by: Frederick Bordry Jean Paul Burnet Paul Collier Mike Lamont Steve Myers Rudiger Schmidt
---	--	--



CSCM : qualification des bus-barres & interconnexions en Cuivre ('Cu-busbars & Cu-splices')

How: warm up to 20 K, and put in a current pulse equivalent to the current decay in case of a Fast Power Abort during operation at 1.9 K.

A weak spot will result in a thermal runaway and hence a fast additional voltage rise.

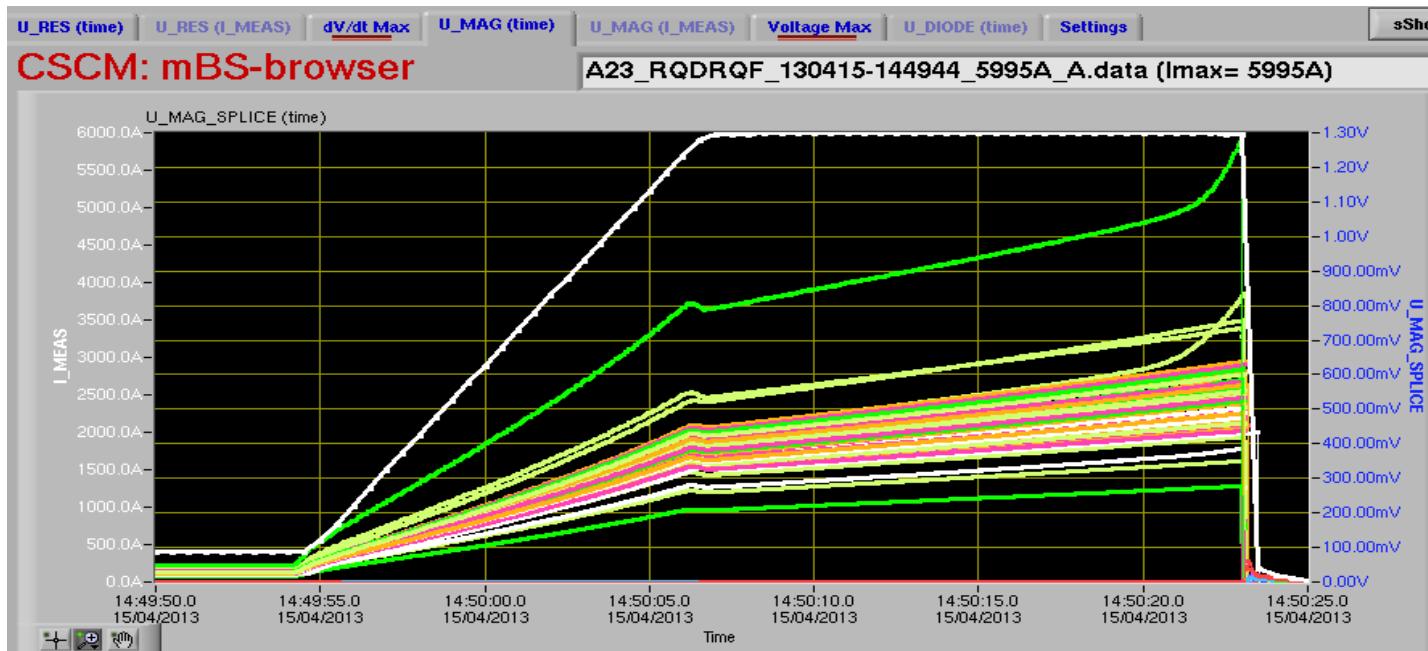
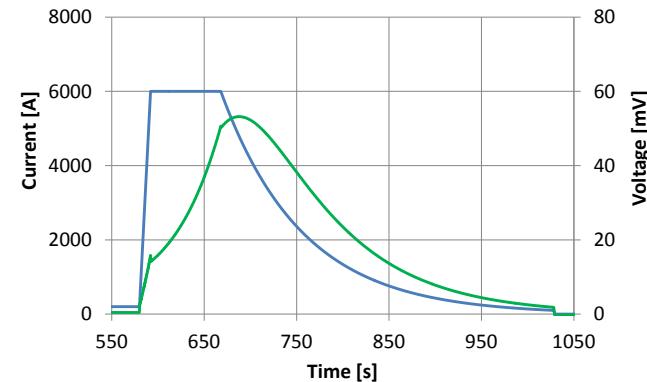


CSCM : qualification des bus-barres & interconnexions en Cuivre ('Cu-busbars & Cu-splices')

Potential of this new technique was demonstrated during a dedicated test campaign performed just before the LS1

Current pulse (example), and voltage over 40 m of busbar

Start of a thermal runaway



The main 2013-14 LHC consolidations

1695 Openings and final reclosures of the interconnections

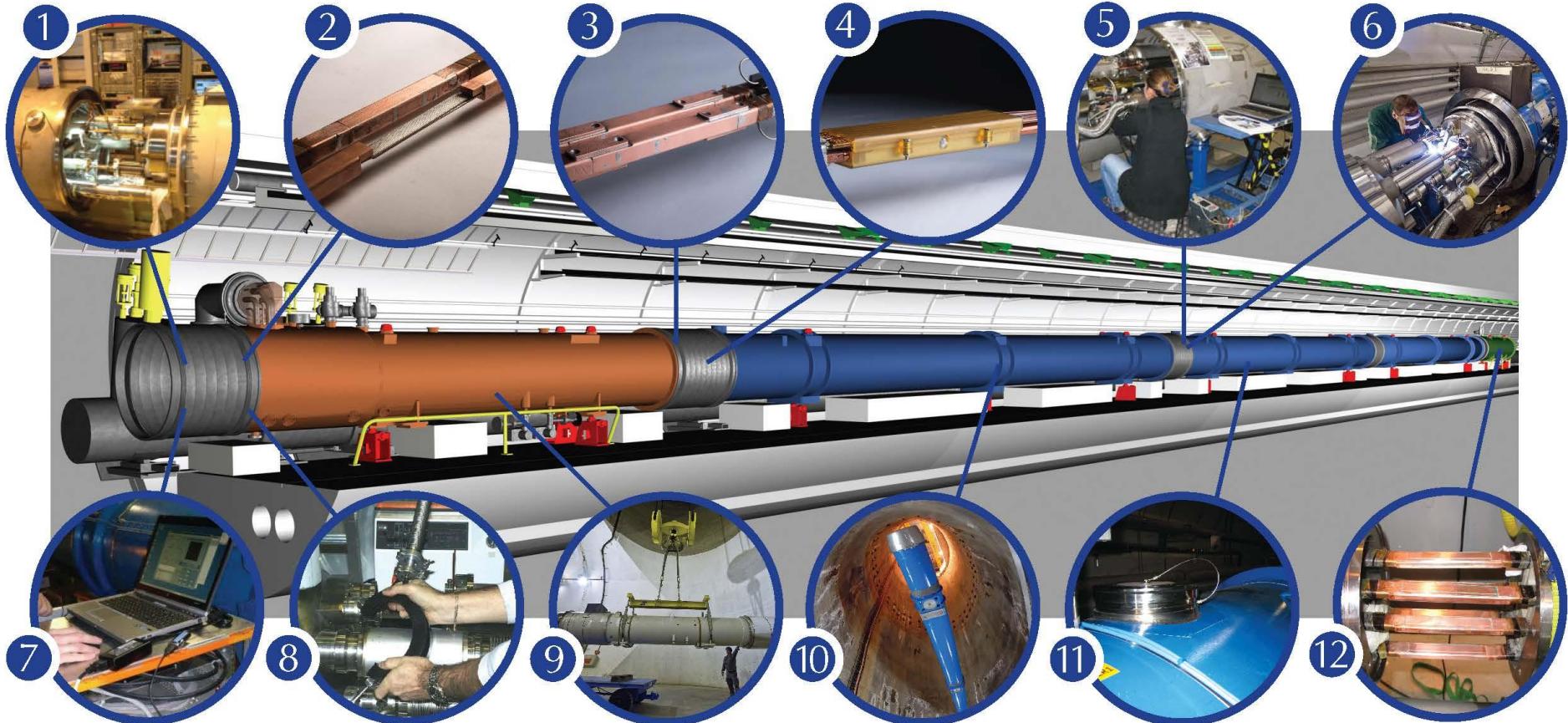
Complete reconstruction of 1500 of these splices

Consolidation of the 10170 13kA splices, installing 27 000 shunts

Installation of 5000 consolidated electrical insulation systems

300 000 electrical resistance measurements

10170 orbital welding of stainless steel lines



18 000 electrical Quality Assurance tests

10170 leak tightness tests

4 quadrupole magnets to be replaced

15 dipole magnets to be replaced

Installation of 612 pressure relief devices to bring the total to 1344

Consolidation of the 13 kA circuits in the 16 main electrical feed-boxes

La consolidation des interconnexions progresse selon le planning prévu...



Thursday 18th April 2013

Conclusions

- Le LHC a connu un incident majeur en Septembre 2008 à cause de la défaillance d'éléments de «technologie relativement basique». Ces défauts étaient essentiellement dus à des travaux manuels de mauvaise qualité mais ils ont mis en évidence les déficiences suivantes:
 - Manque de fiabilité des interconnexions ('IC splices')
 - Manque de fiabilité du processus d'assemblage
 - Manque de diagnostics pendant l'installation, la mise en service et l'Opération
- Tous les éléments de «haute technologie » tels que câbles supra , aimants supra et Amenées de courant HTS ont correctement fonctionnés en regard de:
 - Performance électrique et de la réaction au 'quench'
 - Qualité du champ magnétique
- Très bonne performance de tous les familles d'aimants combinée à haute disponibilité de tous les circuits magnétiques a été le socle de la découverte du Boson de Higgs.
- Nous sommes confiants sur la progression du programme de consolidation prévu pendant le LS1. Elle permettra au LHC d'atteindre son énergie nominale et d'initier de nouvelles découvertes.

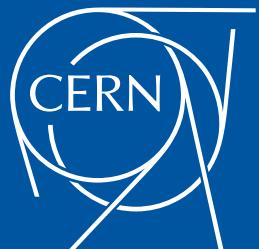


Merci de votre attention

Remerciement:

K. Dahlerup-Pedersen, R. Denz, M. Zerlauth, B. Puccio, A. Verweij,
E. Ravaioli, E. Todesco, M. Pojer





www.cern.ch