



*Les Journées Thématiques AFF-CCS au CERN  
Cryogénie et Supraconductivité pour le LHC et ses détecteurs*

*Organisées par l'Association Française du Froid  
Commission de Cryogénie et de Supraconductivité*

## « Les Aimants de l'Accélérateur »

*Michele Modena  
10 avril 2008*



## Contenu:

- *l' Histoire et quelques numéros*
- *L'architecture de l' accélérateur*
- *Les principaux types d' aimants du LHC*
- *Suivi de la production, tests et évaluations des performances: les enjeux et les défis principaux*
- *Quelques exemples de "fait divers" survenus pendant la production et les tests*



- *l' Histoire et quelques numéros*



## I' Histoire et quelques numéros

- 1983, Fermilab: **Tevatron** - Collisionneur de protons / antiprotons.  
Longueur: ~ **6.29 km**; N. d'aimants SC: ~ **1000**
- 1991, DESY: **HERA** - Collisionneur de protons / électrons ou positrons.  
Longueur: ~ **6.34 km**; N. d'aimants SC: ~ **650**
- 1999, BNL: **RHIC** - Collisionneur de ions.  
Longueur: ~ **3.83 km**; N. d'aimants SC: ~ **1700**
- 2008, CERN: **LHC** - Collisionneur de protons / protons.  
Longueur: ~ **26.66 km**; N. d'aimants SC: **8090**



## I' Histoire et quelques numéros

Plus exactement, dans le LHC, les aimants SC qui contrôlent les faisceaux de protons sont:

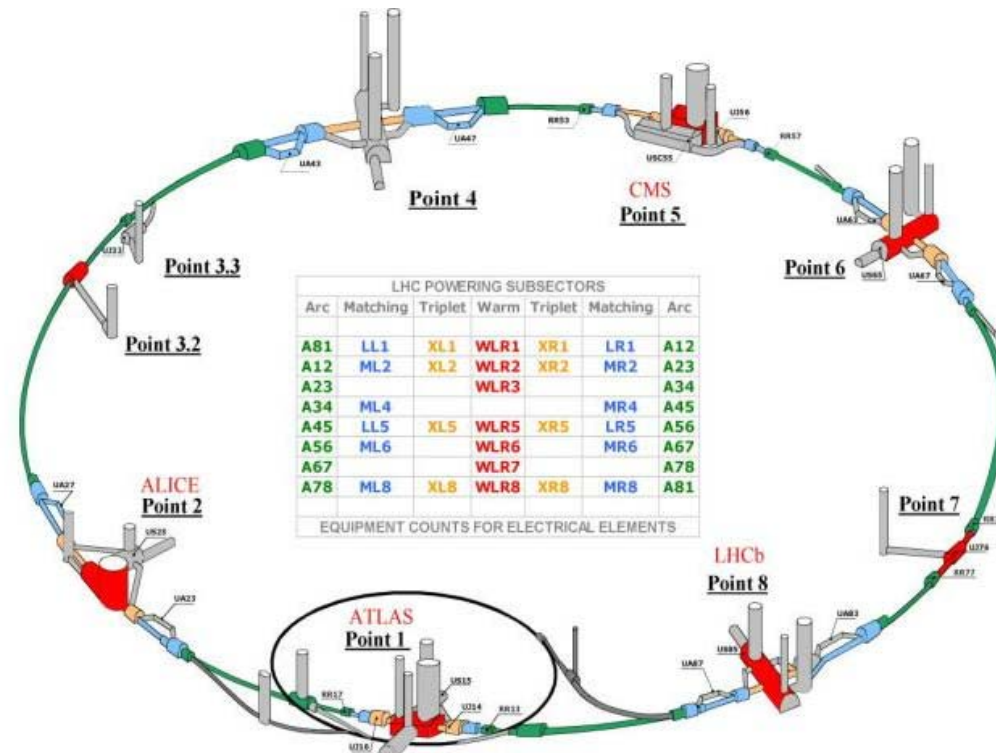
- **1232** aimants SC dipolaires dans les Arcs : pour courber les faisceaux sur l'orbite circulaire.
- **392** Aimants SC quadripôles dans les Arcs: pour contrôler (focalisation) les faisceaux sur l'orbite.
- **124** Quadripôles/Dipôles SC « d'Insertion »: pour contrôler les faisceaux en approchant les zones d'interaction (expérimental et autres)
- **6340** Aimants SC corrector de type différent: petits quadripôles ou dipôles pour correction fine, sextupôles, octupôles, decapôles, etc.
- **2** Aimants SC ondulatoires: pour le diagnostic des faisceaux

**Note:** **112** aimants « normal-resistive » sont aussi présents.



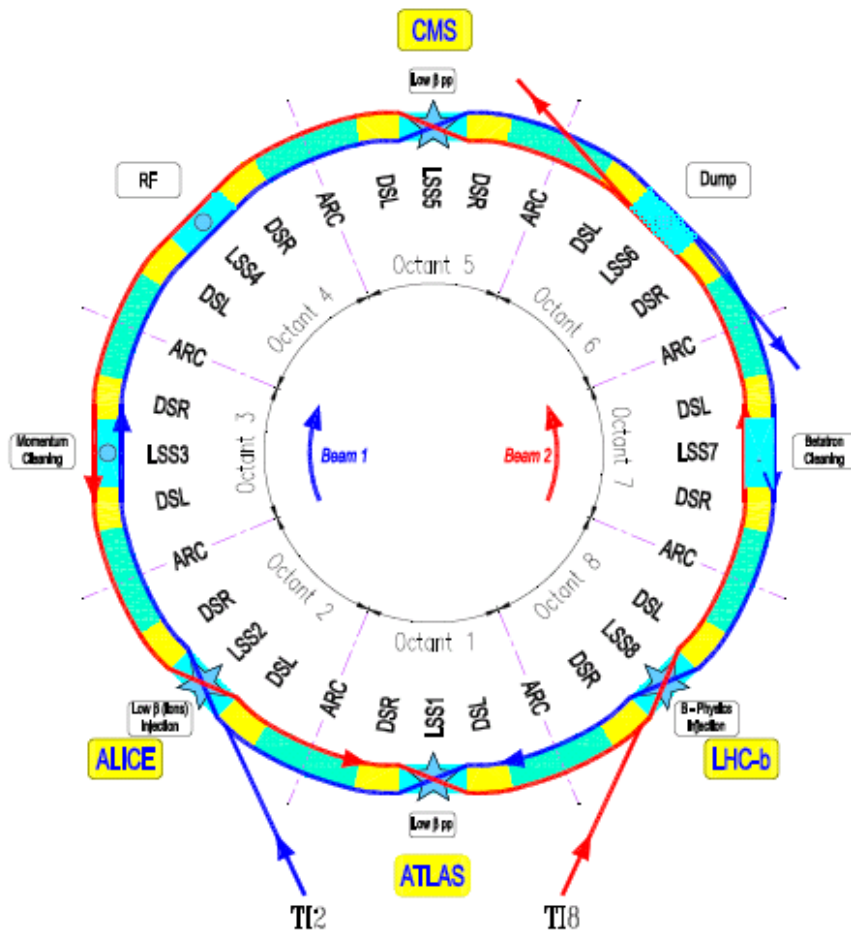
- *L'architecture de l'accélérateur*

# L' architecture du LHC



- **8 IP** (Points d'Interaction)
- Les **4 Détecteurs** positionnés au IP:1,2,5,8
- **IP3&7**: Section de Collimations ("Cleaning Insertions"); **IP4**: Section d' Accélération ("RF system"); **IP6**: Section d' Extraction ("Dumping Region") pour le décharge des faisceaux)

# L'architecture des Secteurs



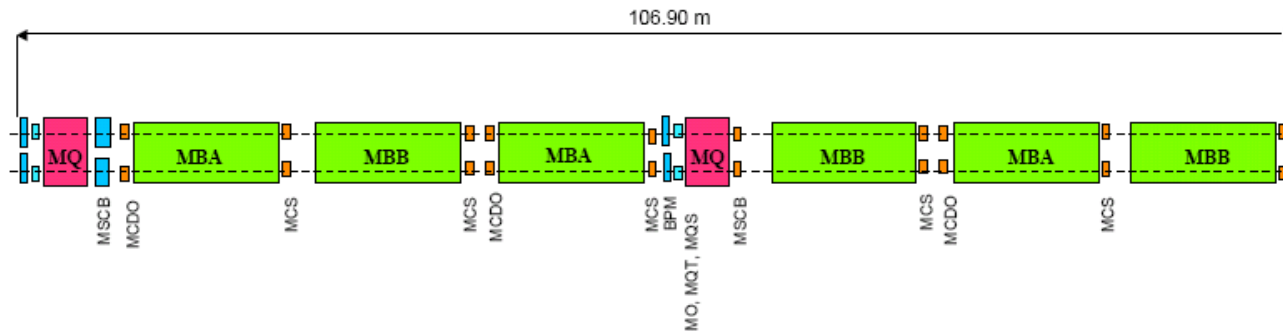
- Deux IP délimités un «**Secteur**» (le concept d' Octant, en même numéros que les Secteurs, centres autour de l' IP, est lié à la fonctionnalité de l'IP).
- Chaque Secteur est constitué d'une zone centrale «**ARC**» plus, aux extrémités : d'une zone **DS** «Dispersion Suppressor» (Right and Left): et d'une zone **LSS** «Long Straight Section», centrée sur le IP.
- Au niveau cryostat, chaque ARC et DS étant constitués d'une seule «**cryostat continue**» préservant les aimants à 1.9 K
- Les zones LSS sont constituées des 2 sous-zones: **MS** (Matching Section) et **IR** (Interaction Region) avec cryostats individuels («stand alone» ou «semi-stand alone») avec les aimants refroidis a à 1.9 K ou, dans plusieurs cas, à 4.5 K.





## Configuration dans les ARCS

- Chaque ARC est constitué des **23 «ARC-Cell»**: L ~ 107 m. L' Arc-Cell est la structure base périodique dans l'optique du LHC pour la zone «standard» (les Arcs).
- Chaque Arc-Cell contient: **6** cryo-aimants dipolaires, chacune avec 1 aimant dipolaire englobant aussi 2/4 petits correcteurs MCS/MCDO, et **2** «Short Straight Sections» **SSS**, chacune avec 1 c.m. quadripolaire englobant aussi 2 aimants correcteurs: MQT/MQS/etc.



MQT: trim quadrupole

MQS: skew trim quadrupole

MO: lattice octupole

MSCB: sextupole (skew sextupole) + orbit corrector

MCS: spool piece sextupole

MCDO: spool piece octupole + decapole

## Configuration dans les ARCS

Cette configuration est le résultat d'une optimisation des paramètres optiques (ex. maximisation pour le champ magnétique dipolaire intégré versus le minimum numéro des interconnexions d'aimants) et paramètres constructive (ex. sectorisation du vide d'isolation, connexions à la QRL la ligne de distribution cryogénique, etc.)



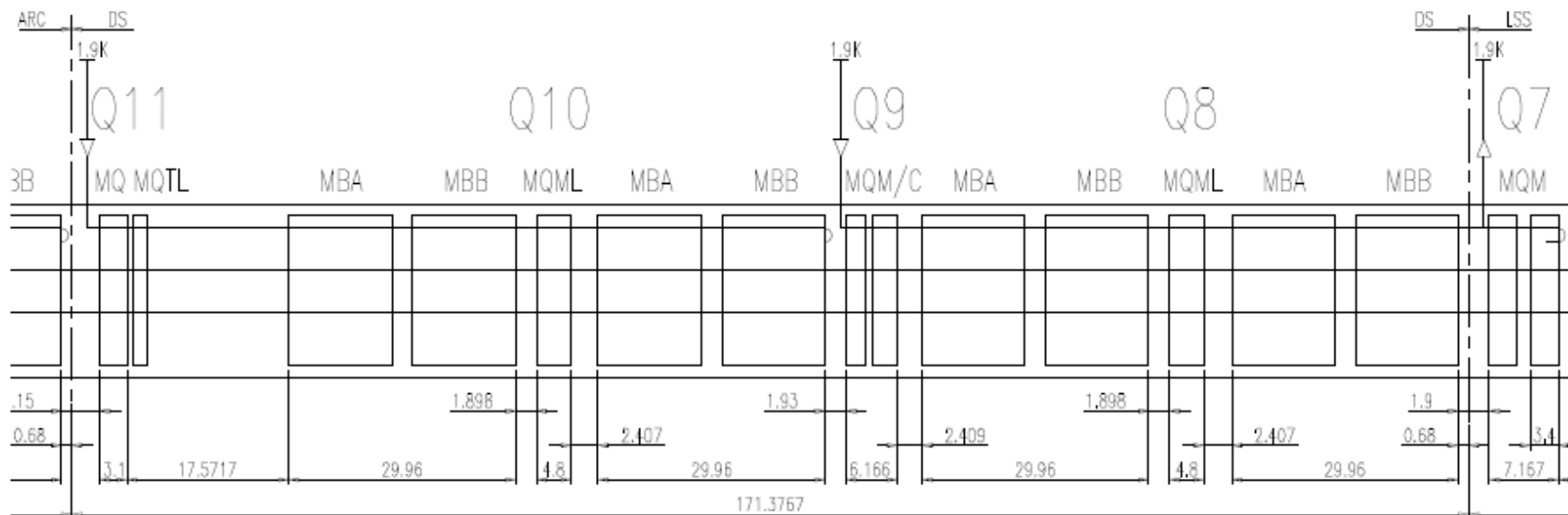
- Chaque deux SSS (i.e. une fois pour chaque Arc-Cell): une interconnexion du cryostat continu avec la **QRL**.
- Chaque deux Arc-Cell: une **sectorisation** du vide d'isolation dans le cryostat continu.



## Configuration dans les DS

Les zones DS (L ~ 171 m) sont des zones de transition entre les ARC et le LSS. Leur but est:

- Adapter l'orbite de référence du LHC à la géométrie du tunnel (dessiné pour le LEP)
- Accorder la conception optique (e. g. la dispersion) des huit différentes zones LSS avec l'optique périodique des Arcs.



Note: dans le DS la structure est similaire à celle des Arc-Cells avec 2 «dipôle manquant» (4 dipôles à la place de 6 dans le «pseudo Cell»)



## Configuration dans les LSS

Comme déjà dit, les LSS (L ~ 528 m), sont des zones droites centrées sur les différents IP, spécifiques à la fonctionnalité de chaque IP:

Les différences peuvent concerner tous les aspects de la configuration optique et des faisceaux, ex. :

- Faisceaux recombines ou non
- Présence d' extra-faisceaux (injection au IP2 et IP8; extraction au IP6)
- Présence ou non de quadripôles de Q7 à Q1

Les différences peuvent concerner la technologie des aimants éventuellement présents, ex.:

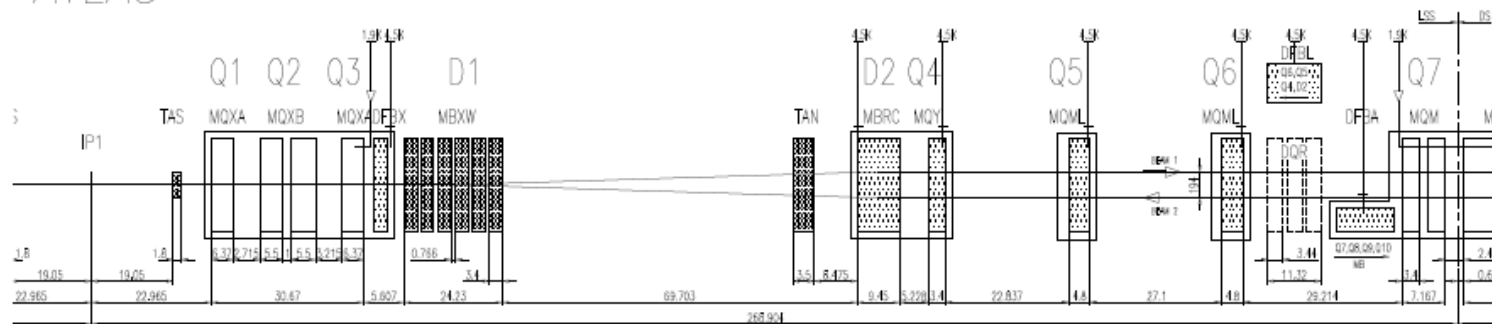
- Aimants «two-in-one» ou non
- Aimants SC ou non
- Si aimants SC, refroidis à 1.9 K ou à 4.5 K
- Aimants électriquement alimentés en série ou singulièrement



## Configuration dans les LSS

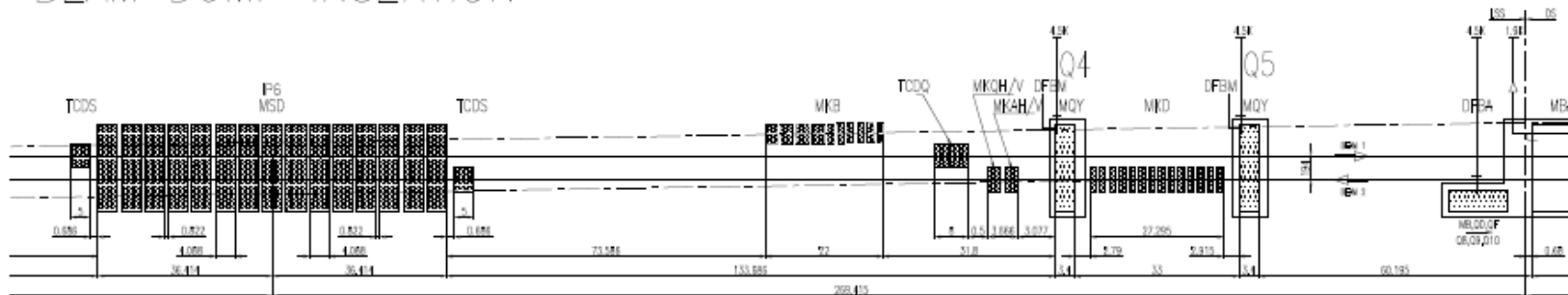
Les configurations des zones LSS sont très différentes:

*ATLAS*



- Ici le cas de la LSS au côté droit du IR 1 (détecteur ATLAS)

*BEAM DUMP INSERTION*



- Ici le cas de la LSS au côté droit du IR 6 (Section d'Extraction des faisceaux)



- *Les principaux types d'aimants du LHC*





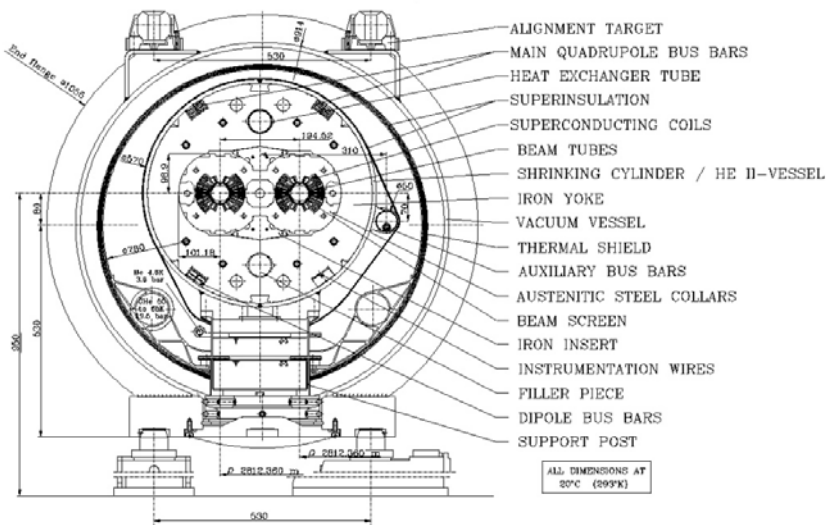
# Les « poids lourds » de la familles des aimants



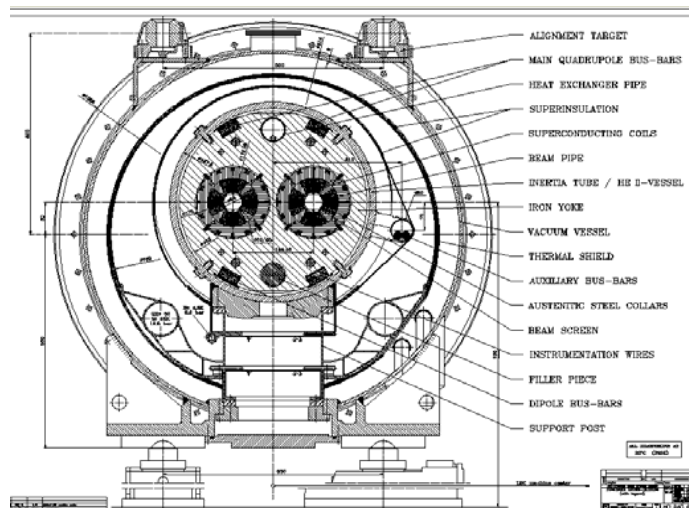
Main Parameters		
56 mm	Bore diameter	56 mm
~16.5 m	Total length	~6 m
1.9 K	Operating temp.	1.9 K
8.3 T	Magnetic field	223 T/m
11850 A	Nominal current	11870 A
~ 30 t	Mass	~7 t



1232 dipôles dans les Arcs:



360 Arc-SSS (quadripôles)





## La complexité des différentes configurations

- Dipôles de l'Arc: **4** types d'aimants différents (polarité des diodes et de l'alimentation des bobines et de la présence ou non de correcteurs octu/decapôlaires).

En fonction de la position dans le LHC:

**16** types différents de Cryo-dipôles (différences mineures surtout au niveau du circuit des écrans faisceaux).

- Quadripôles de l'Arc (SSS) : **40** types différents (configuration de correcteurs, polarité de l'alimentation des bobines et diodes).

En fonction de la position dans le LHC:

**61** types différents de SSS (différences au niveau des connexions avec la QRL, sectorisation du vide d'isolation, etc.)

Cold-mass code	Quantity	Bus-bar-type	MSCB Type	MO, MQT or MQS	Diode type	Helium Vessel Type
LQMOC	2	de-focusing	B	MO	A	A: Two jumper studs, pressure plugs, short heat exchanger tube, vacuum barrier
LQMOD	2	de-focusing	B	MO	B	
LQMOO	6	focusing	A	MO	A	
LQMOP	6	focusing	A	MO	B	
LQMSA	4	de-focusing	B	MQS	A	
LQMSB	4	de-focusing	B	MQS	B	
LQMSC	12	focusing	A	MQS	A	
LQMSD	12	focusing	A	MQS	B	
LQMTA	4	de-focusing	B	MQT	A	
LQMTB	4	de-focusing	B	MQT	B	
LQMTI	12	focusing	A	MQT	A	
LQMTJ	12	focusing	A	MQT	B	
LQMOE	27	de-focusing	B	MO	A	B: No jumper studs, no pressure plugs, long heat exchanger tube, no vacuum barrier
LQMOF	27	de-focusing	B	MO	B	
LQMOK	12	de-focusing	D	MO	A	
LQMOL	12	de-focusing	D	MO	B	
LQMOQ	9	focusing	A	MO	A	
LQMOR	9	focusing	A	MO	B	
LQMOW	4	focusing	C	MO	A	
LQMOX	4	focusing	C	MO	B	
LQMTA	30	de-focusing	B	MQT	A	
LQMTB	30	de-focusing	B	MQT	B	
LQMTK	10	focusing	A	MQT	A	
LQMTL	10	focusing	A	MQT	B	
LQMOH	1	de-focusing	D	MO	A	C: One jumper stud, no pressure plugs, short heat exchanger tube, vacuum barrier
LQMOJ	1	de-focusing	D	MO	B	
LQMOT	3	focusing	C	MO	A	
LQMOV	3	focusing	C	MO	B	D: One jumper stud, no pressure plugs, short heat exchanger tube, no vacuum barrier
LQMOA	2	de-focusing	B	MO	A	
LQMOB	2	de-focusing	B	MO	B	
LQMOG	3	de-focusing	D	MO	A	
LQMOI	3	de-focusing	D	MO	B	
LQMOM	6	focusing	A	MO	A	
LQMON	6	focusing	A	MO	B	
LQMOS	9	focusing	C	MO	A	
LQMOU	9	focusing	C	MO	B	
LQMTA	6	de-focusing	B	MQT	A	
LQMTB	6	de-focusing	B	MQT	B	
LQMTG	18	focusing	A	MQT	A	
LQMTH	18	focusing	A	MQT	B	



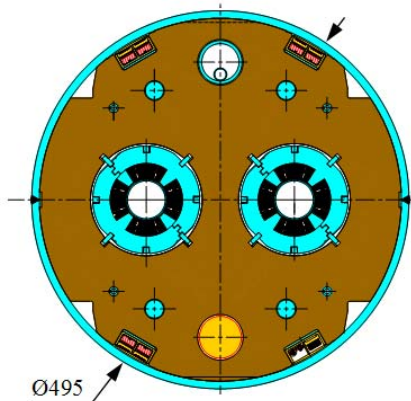


## Aimants dans les Régions d'Insertion

- Les **IR** «Régions d' Insertion» (en pratique équivalente aux LSS)\_se caractérisent par la présence, en fonction du IP concerné, d' une large variété d'aimants (surtout quadripôles) comme le montre le tableau.
- Comme déjà mentionné, la fonction des aimants d'insertion dépend de l' IP asservi: 4 détecteurs, 2 Sections de Collimations, 1 Section d' Accélération, 1 Section d' Extraction.
- Dans les pages suivantes, comme exemple, les sections de certains aimants d'Insertion sont présentées.

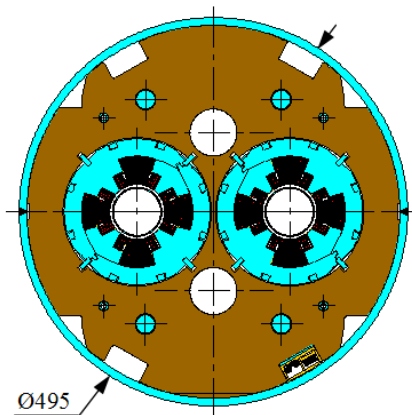
Magnet type	IR1	IR2	IR3	IR4	IR5	IR6	IR7	IR8
	ATLAS	ALICE	Cleaning	RF	CMS	Dump	Cleaning	LHCb
<b>Main dipoles and quadrupoles (DS)</b>								
MB	16	16	16	16	16	16	16	16
MQ	2	2	10	2	2	2	10	2
<b>Superconducting insertion quadrupoles and correctors (DS and MS)</b>								
MQMC	2	2	-	2	2	2	-	2
MQM	6	10	-	4	6	2	-	10
MQML	8	6	-	4	8	4	-	6
MQY	2	6	-	4	2	4	-	6
MQTL	2	2	24	2	2	2	24	2
MSCB	2	2	2	2	2	2	2	2
MCBC	12	13	10	8	12	6	10	13
MCBY	6	9	-	4	6	4	-	9
<b>Normal conducting quadrupoles (Cleaning insertions)</b>								
MQWA/B(Q4,Q5)	-	-	24	-	-	-	24	-
<b>Superconducting separation dipoles</b>								
MBX (D1)	-	2	-	-	-	-	-	2
MBRC (D2)	2	2	-	-	2	-	-	2
MBRS (D3)	-	-	-	4	-	-	-	-
MBRB (D4)	-	-	-	4	-	-	-	-
<b>Normal conducting separation and correction dipoles</b>								
MBXW (D1)	12	-	-	-	12	-	-	-
MBW (D3)/(D4)	-	-	12	-	-	-	8	-
MCBWH/V	-	-	8	-	-	-	8	-
<b>Inner triplets and associated correctors</b>								
MQXA (Q1, Q3)	4	4	-	-	4	-	-	4
MQXB (Q2)	4	4	-	-	4	-	-	4
MCBX	6	6	-	-	6	-	-	6
MQSX	2	2	-	-	2	-	-	2
Multipole packages	2	2	-	-	2	-	-	2
<b>Normal conducting compensator dipoles in ALICE and LHCb experiments</b>								
MBWMD	-	1	-	-	-	-	-	-
MBXWT	-	2	-	-	-	-	-	-
MBXWH	-	-	-	-	-	-	-	1
MBXWS	-	-	-	-	-	-	-	2

## MQM and MQY



### MQM (84 units) Main Parameters

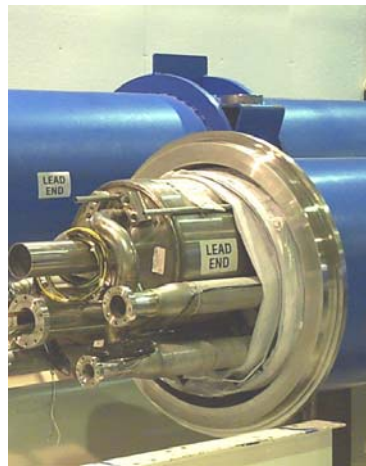
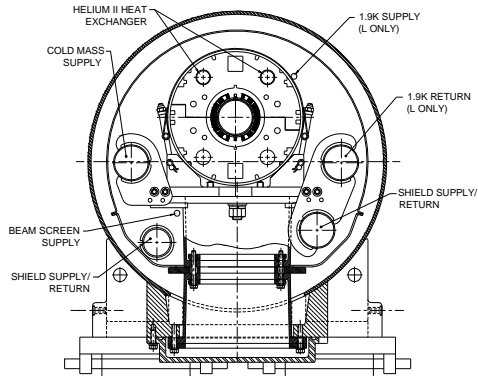
Coil inner diameter	56 mm
Magnetic length	2.4/3.4/4.8 m
Operating temp.	1.9/4.5 K
Nominal gradient	200/160 T/m
Nominal current	5390/4310 A
Mass	3.1/4.3/6.0 t



### MQY (24 units) Main Parameters

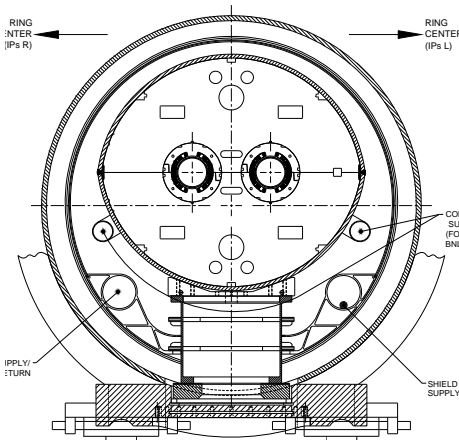
Coil inner diameter	70 mm
Magnetic length	3.4 m
Operating temp.	4.5 K
Nominal gradient	160 T/m
Nominal current	3610 A
Mass	4.4 t

# Dipôles de Séparation



## MBX (D1) (4 units from BNL) Main Parameters

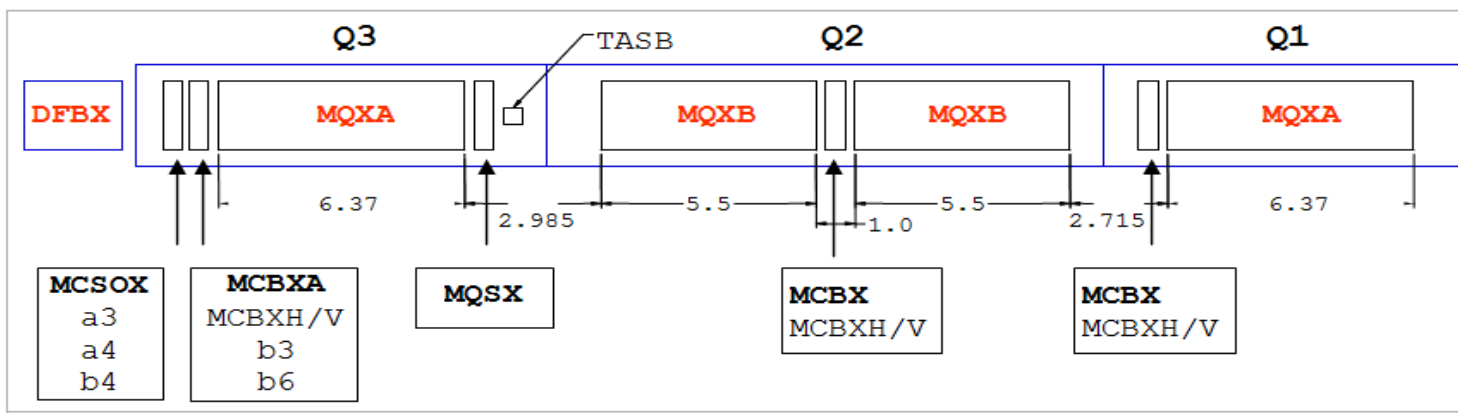
Coil inner diameter	<b>80 mm</b>
Magnetic length	<b>9.5 m</b>
Operating temp.	<b>1.9 K</b>
Nominal field	<b>3.8 T</b>
Nominal current	<b>5750 A</b>
Mass	<b>4.5 t</b>



## MBRB/C (D4/D2), MBRS (D3) (2,8,2 units from BNL) Main Parameters

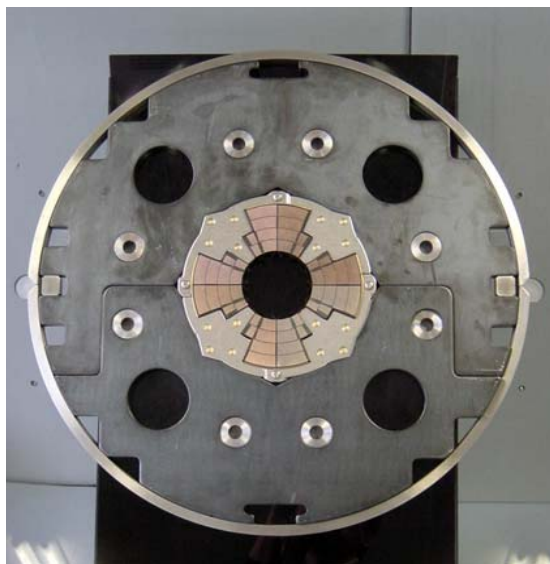
Coil inner diameter	<b>80 mm</b>
Aperture separation	<b>194/188/414 mm</b>
Magnetic length	<b>9.5 m</b>
Operating temp.	<b>4.5 K</b>
Nominal field	<b>3.8 T</b>
Nominal current	<b>6050/5750 A</b>
Mass	<b>4.4 t</b>

# Triplet pour la Focalisation Finale



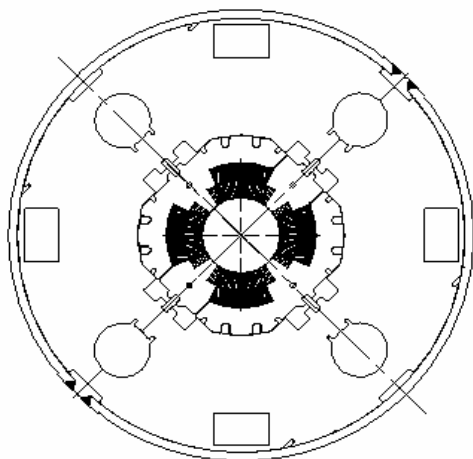


## Triplet pour la Focalisation Finale



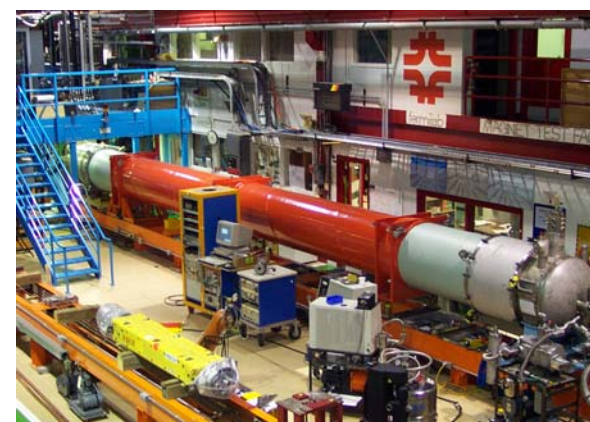
### MQXA (16 units from KEK-J) and MQXB (16 units from FNAL-USA) Main Parameters

Coil Inner diameter	70 mm
Magnetic length	6.4/ 5.5 m
Operating temp.	1.9 K
Nominal gradient	215 T/m
Nominal current	7149/11950 A
Mass	9.6/5.7 t



*En haut: un MQXA et son test a KEK*

*En bas: un MQXB et son test a FNAL*





- *Suivi de la production, tests et évaluations des performances: les enjeux et les défis principaux*



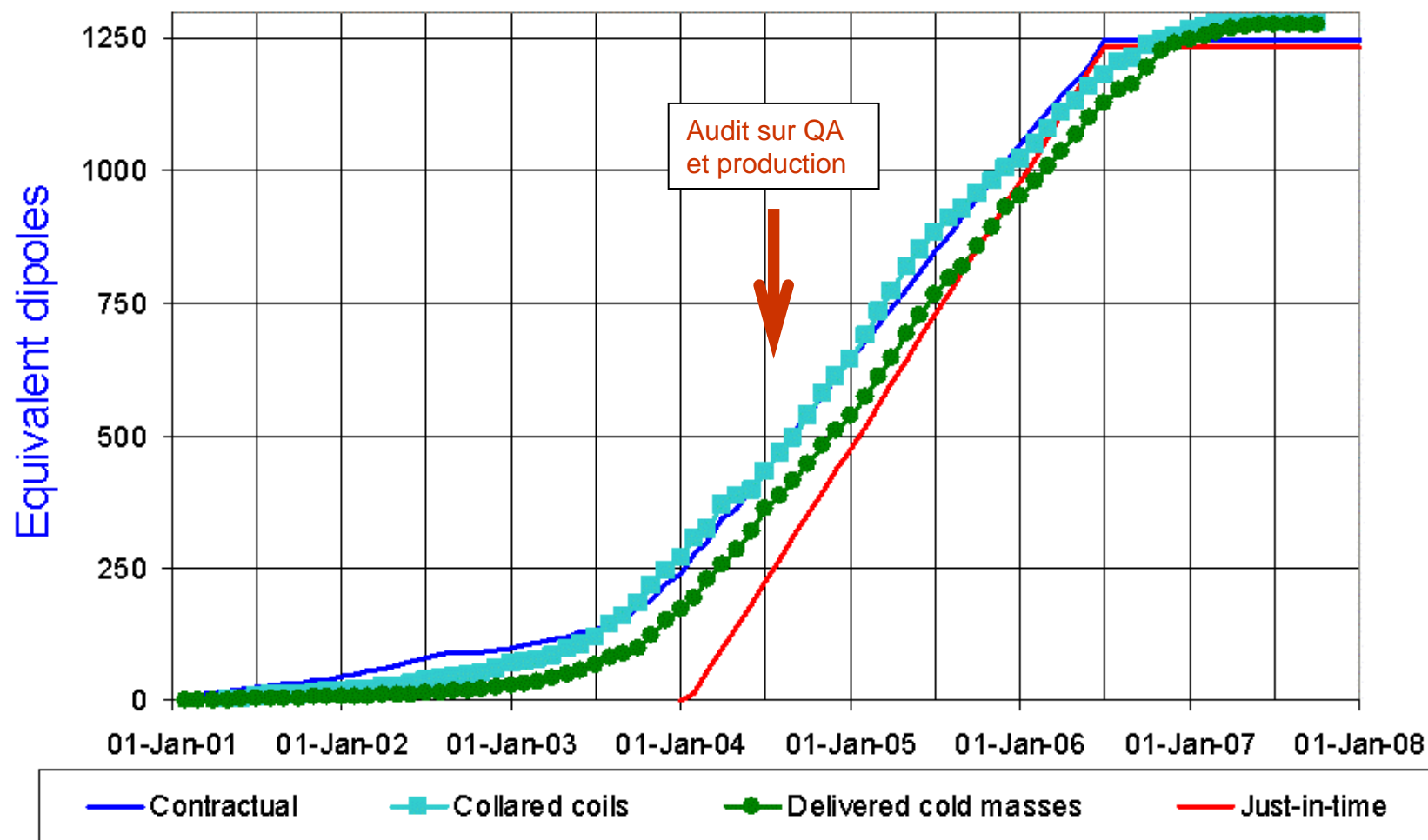
## La production: les enjeux principaux

- La production de série pour la majorité des aimants s'est étendue sur plusieurs\_années (ex. dipôles des l'Arcs: 6 années)
- Pour toute production critique, le CERN a prévu la présence constante de techniciens et d'inspecteurs résidant à l'usine de production.
- Des actions spécifiques (i.e. les corrections magnétiques ou des audits pour la production des dipôles et quadripôles principaux) ont été nécessaires dans certains cas.



# La production industrielle des dipôles

## Dipole cold masses

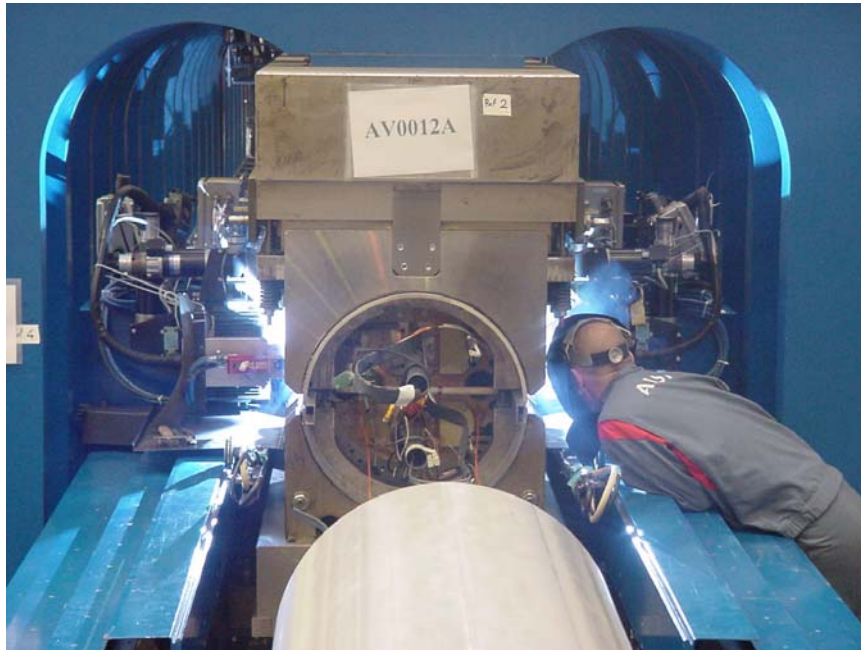






## La production industrielle: les enjeux principaux

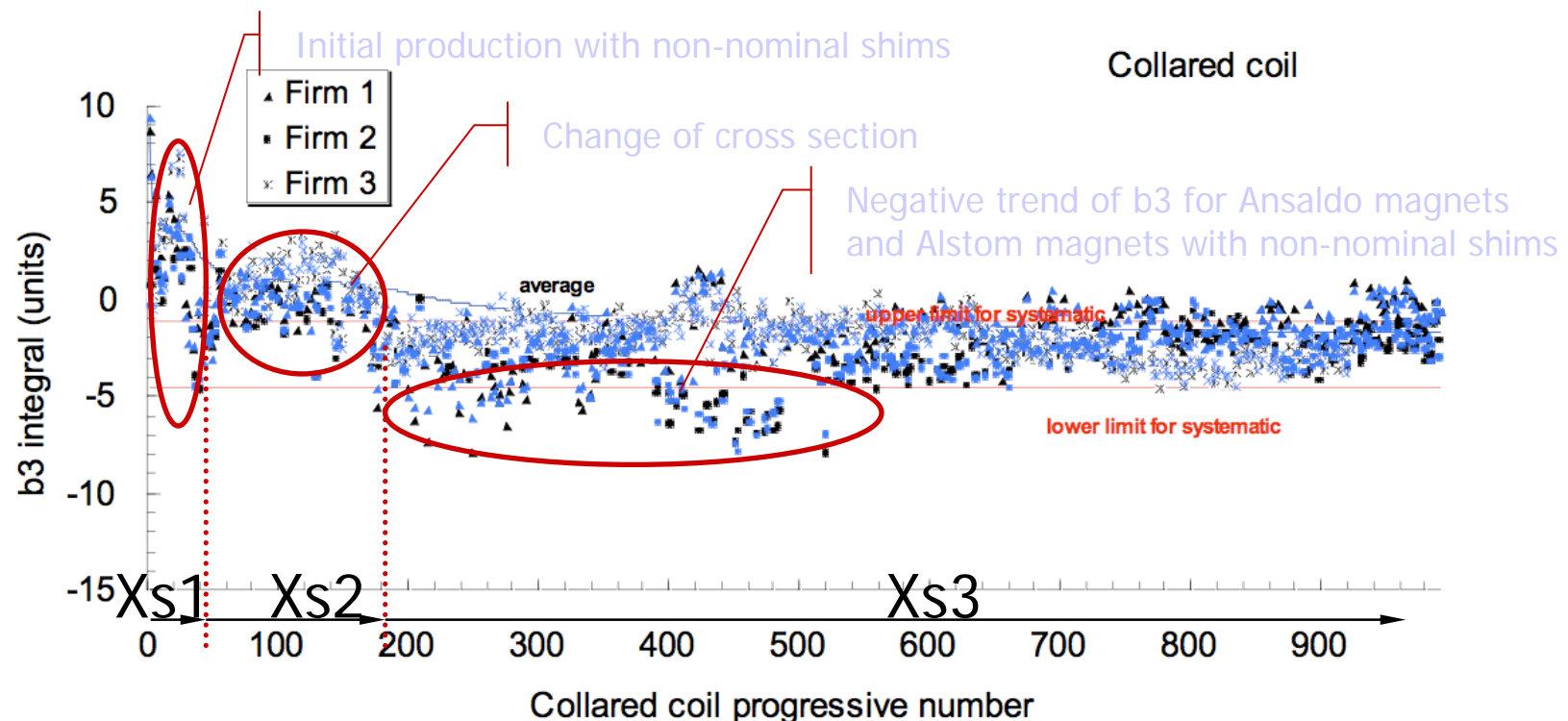
Différents choix techniques fondamentaux pris pour des raisons techniques ou historiques; ex. assemblage horizontal ou vertical des masses froides avec les conséquences constructives:



# La production industrielle : les enjeux principaux

Le rôle du contrôle de la production chez les fabricants:

- Ex. Qualité magnétique tenue sous un contrôle strict avec des actions correctives si nécessaire:





## La production au CERN: les défis principaux

- Dans d'autres cas le CERN a dû prévoir des «programmes d'urgence» pour assurer la production, ex.: la mise en cryostat de quadripôles et quadripôles spéciaux:
- *Oct.02: suite à la faillite du contractant, le CERN décide de rapatrier l'activité pour toute la production de série*
- *Été 03: nouveau site de production (Bld. 904) prêt*
- *Dec. 03: premiers assemblages complétés*
- *Feb. 07: production (474 unités) complétée*





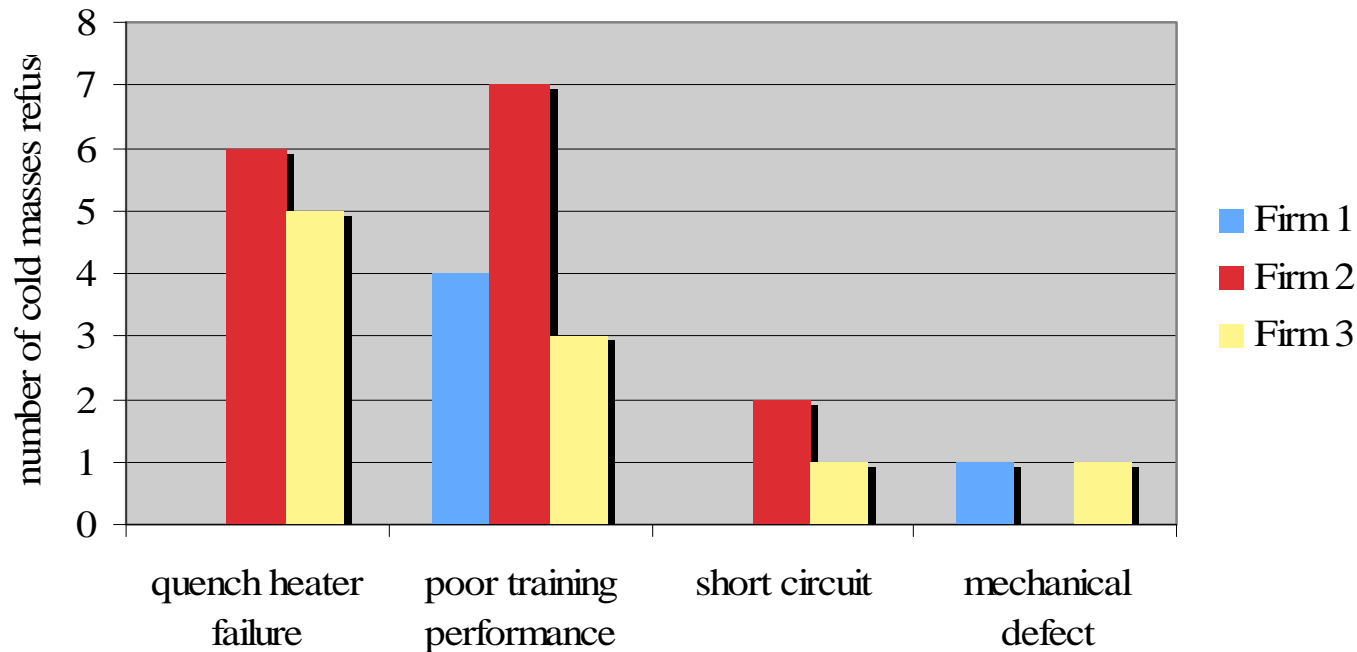


# La production au CERN: les enjeux principaux

## Le rôle des Tests d' Acceptation

- Tous les aimants testés à froid au champ magnétique ultime prévu

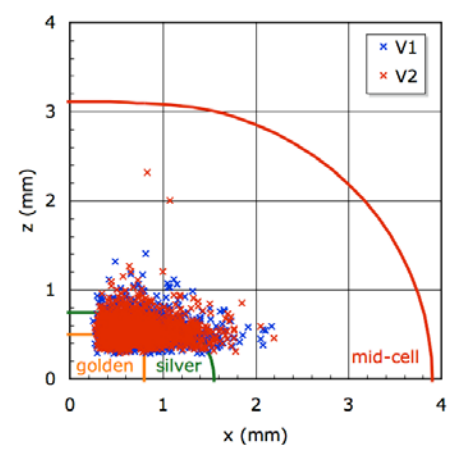
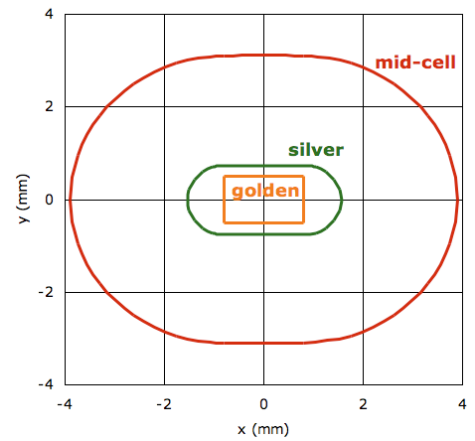
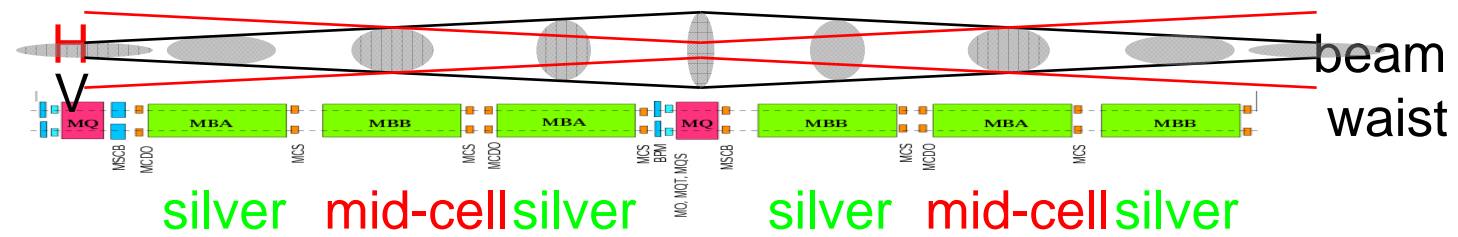
Ex. Pour les 1232 dipôles (la plus grande série et les aimants plus «critiques» a niveau défi industriel et du champ magnétique) les résultats suivants ont été obtenus:



# La production au CERN: les enjeux principaux

## Le rôle du MEB (Magnet Evaluation Board):

- Pour tous les aimants, les résultats: des performances à froid, des mesures magnétiques, des mesures géométriques (alignement), Non Conformités, etc., ont été discutés dans un comité «ad hoc», le MEB: 157 réunions hebdomadaires du 3 Mai 03 au 7 Mars 07.





- *Quelques exemples de "fait divers" survenus pendant la production et les tests*
  - 1: le cas du Noell 4*
  - 2: le cas des Triplets*



# « Fait divers » : Noell 4 (I)

## Noell 4 - Test History in SM18

- Before installation on a test bench in SM18 the cryodipole passed all electrical tests.

INSULATION TEST AT WARM CONDITIONS				Cryodipole Id.3004				
Performed with Diagnostic Insulation Tester Megger S1-5010				Date of test: 7/10/2002				
Test type: Warm initial before connection to CFU				Operators : MTA operators				
Polarity +	Polarity -	Temperature [K]	Humidity [%]	Voltage [V]	Duration [mn:s]	Final Current [A]	Resistance [ $\Omega$ ]	Capacitance [F]
Dipole-Quench heaters	Ground	295	35	616	2:00	3.65E-08	1.69E+10	3.80E-07
Dipole	All Quench heaters-Ground	295	35	539	2:00	4.33E-08	1.25E+10	5.10E-07
Dipole	Ground	295	35	616	2:00	1.47E-08	4.20E+10	3.20E-07
Dipole	All Quench heaters	295	35	539	2:00	5.12E-08	1.05E+10	3.80E-07
All Quench heaters	Ground	295	35	616	2:00	5.99E-08	1.03E+10	2.90E-07
Dipole	MCS & MCD correctors	295	35	257	1:01	4.87E-09	5.27E+10	< 1.00 E-08
MCS & MCD correctors	Ground	295	35	257	1:01	7.01E-09	3.67E+10	
Dipole	MCO Correctors				1:01			
MCO Correctors	Ground				1:01			
Precision of Measurements		± 1	± 2	± 2% ± 1		± 5% ± 0.2		± 5% ± 10

A. Siemko  
MARIC 30.10. 2002

## Noell 4 - Test History in SM18

Powering History		
Powering No.	Current (A)	Test Description
1	1500.0	Provoked quench
2	1500.0	Provoked quench
3	1500.0	Provoked quench
4	1500.0	Provoked quench
5	1500.0	Provoked quench
6	3000.0	Mag Meas Pos
7	6000.0	Mini Loadline
8	6000 to 10000	Spikes Aquisition
9	12744.0	Trainig quench
10	12847.0	Ultimate field
11	11850.0	Minimum Energy Quench
12		

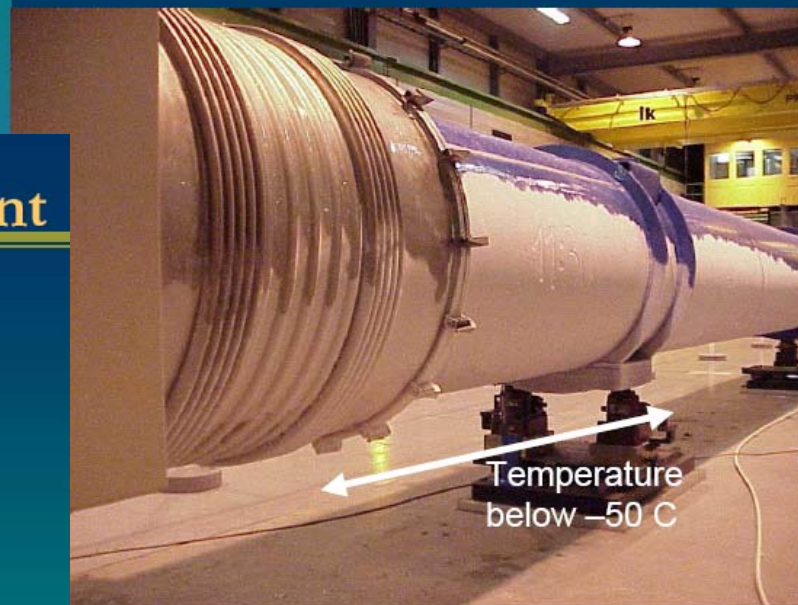
After provoked quench at 11850A remaining cold tests were abandoned and cryodipole warmed up.

2002

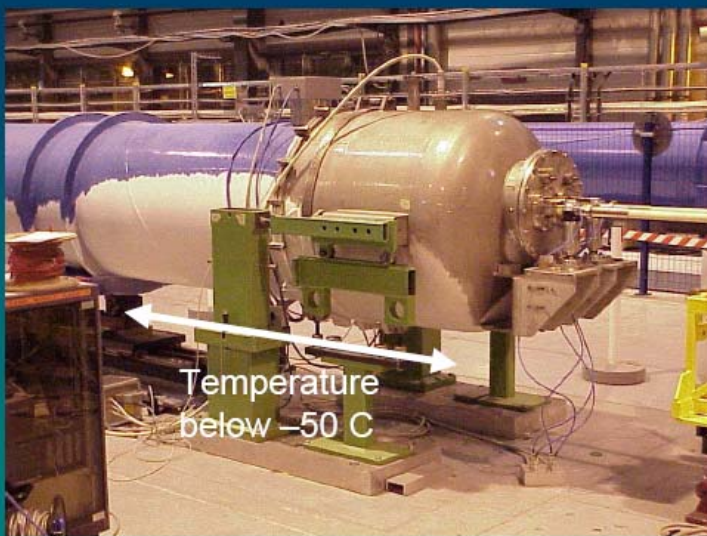


## « Fait divers » : Noell 4 (II)

### Noell 4 Shortly After the Incident



### Noell 4 Shortly After the Incident



A.Siemko  
ARIC 30.10. 2002



## « Fait divers » : Noell 4 (III)

### Electrical State After the Incident

- Coil is short to ground through potential tape E219, most probably in the bottom of IFS.
- Coil is short to ground inside the cold mass in D2.
- Quench heater Y212 is short to ground in D2 Up.
- Quench heater Y212 is short to Coil.
  
- Resistance of all quench heaters is correct.
- Protection diode electrically behaves as expected.
- CFU instrumentation is OK.
  
- Present state of the magnet with multi-short circuits to ground do not allow more precise diagnostics.

A.Siemko  
MARIC 30.10. 2002

### – Post Mortem Inspection



- Measuring shaft and anticryostat were removed from the magnet.

A.Siemko  
MARIC 30.10. 2002

# « Fait divers » : Noell 4 (IV)

## Noel 4 – Post Mortem Inspection



- Damage to the anticyrostat in the middle.

A Siemko  
MARIC 30.10.2002

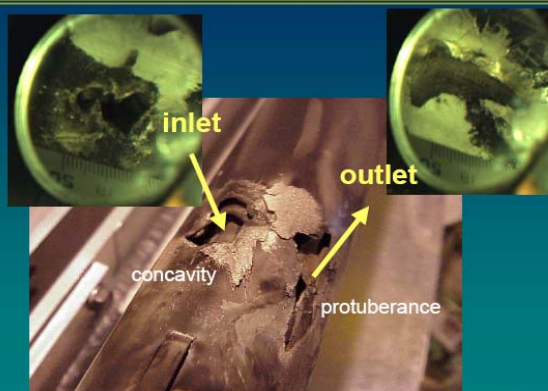
## Noel 4 – Post Mortem Inspection



- Melted ceramic body of the measuring shaft

A Siemko  
MARIC 30.10.2002

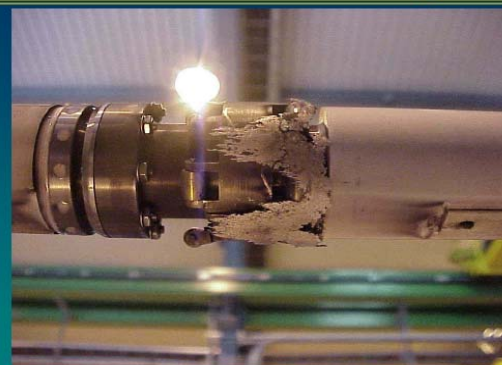
## Mechanism of the Damage



- Pressurized liquid metal was injected to the magnet aperture

A Siemko  
MARIC 30.10.2002

## Noel 4 – Post Mortem Inspection



- Melted martensitic phase found 1m far from the spot

A Siemko  
MARIC 30.10.2002



## « Fait divers » : Noell 4 (V)

### Main Conclusions

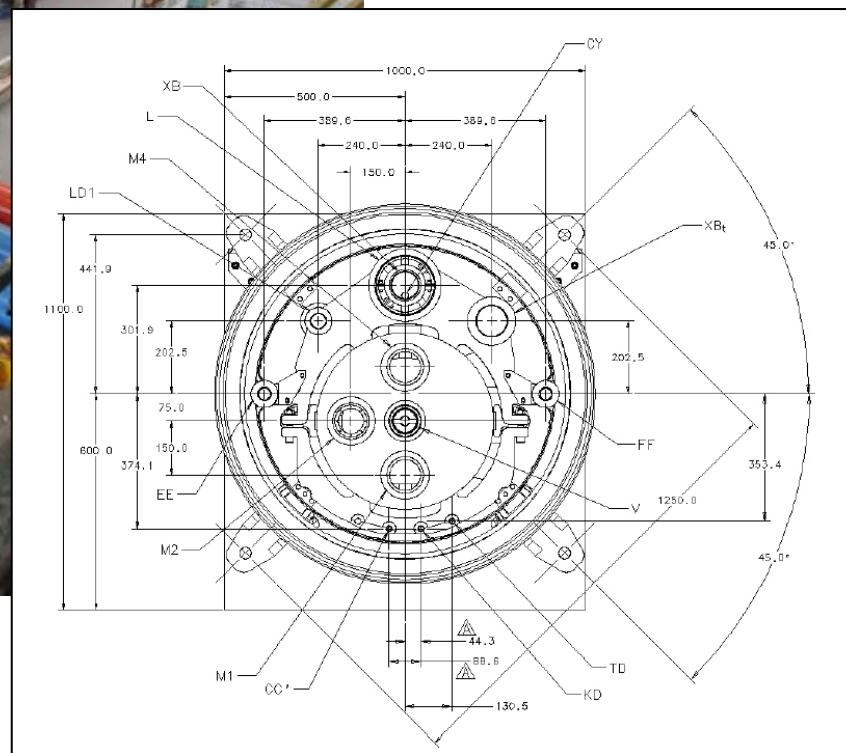
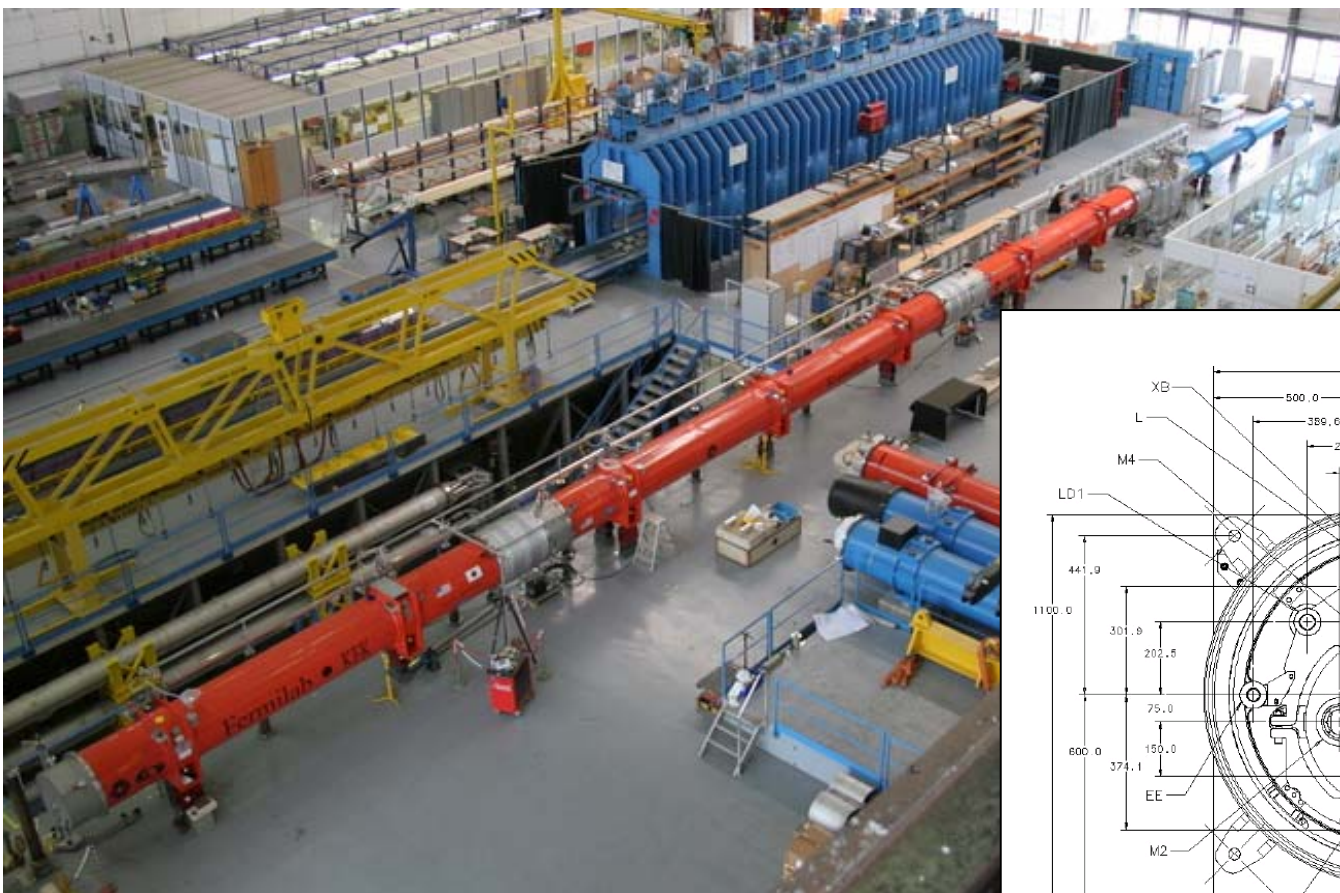
- Noell 4 magnet suffered from an inter-turn short circuit in D2 Upper pole, which appeared during a quench at nominal current
  - Excessive heat deposited in the short-circuited turn caused a meltdown of the cable and then of the cold bore
  - Negligible damaging role of the leakage current to ground

A.Siemko  
MARIC 30.10. 2002





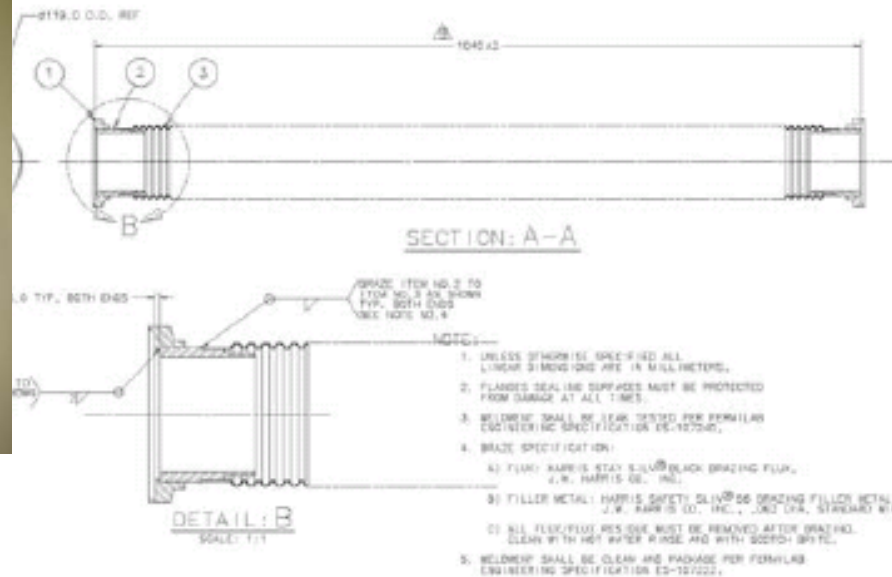
## « Fait divers » : Triplet (I)



# « Fait divers » : Triplet (II)



## Source of the problem



- ➔ Design and execution of the brazed joints anneals the extremities of the tubes (including fixed points in Q1 and Q3).
- ➔ Length of heat affected zone ~ 250-300 mm.
- ➔ Absence of mechanical support in the heat affected length.

**All low-beta quadrupoles need to be repaired.**



## « Fait divers » : Triplet (III)

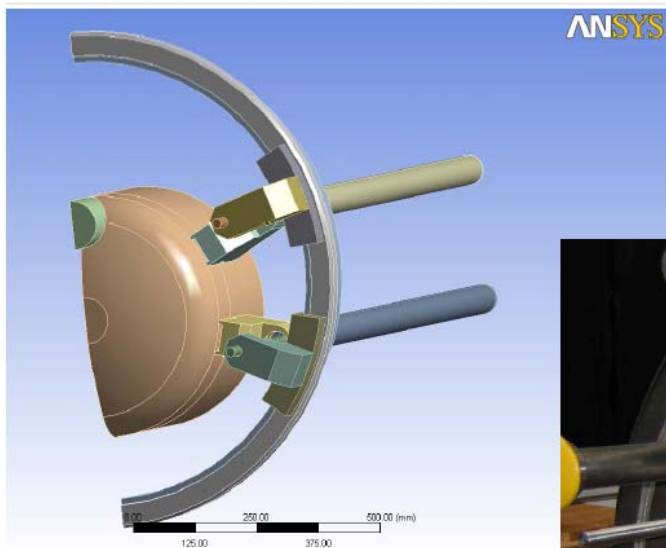


Les Journées Thématiques AFF-CCS,  
CERN, Genève, Suisse



## « Fait divers » : Triplet (IV)

Low- $\beta$  repair: conceptual drawing to implementation



← Cartridge model for fixed point reinforcement

Cartridge installation in Q1.R1 →  
(done in Bld. 181)





## *Conclusion*

**Sujet ...TRES VASTE! pour plus d'informations concernant le LHC (conception de la Machine, des aimants, de tous les systèmes annexes) une très bonne référence est :**

**<http://ab-div.web.cern.ch/ab-div/Publications/LHC-DesignReport.html>**

*Merci à Nuria Catalan Lasheras pour l'aide dans la révision de cette présentation et...*

*Merci pour votre attention .*