



***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 des détecteurs**

**F. Kircher  
(DSM/Irfu/SACM/CEA Saclay)  
10 avril 2008**



# Plan

## 1. Introduction

## 2. Conception, montage et tests du système magnétique ATLAS

- 2.1 L'ensemble du système magnétique
- 2.2 Le solénoïde central CS
- 2.3 Le toroïde barrel BT
- 2.4 Les toroïdes d'extrémité ECT

## 3. Conception, montage et tests de l'aimant CMS

- 3.1 Conception et montage
- 3.2 Quelques résultats expérimentaux

## 4. Situation à ce jour

## 5. Conclusions



# Plan

## 1. Introduction

## 2. Conception, montage et tests du système magnétique ATLAS

2.1 L'ensemble du système magnétique

2.2 Le solénoïde central CS

2.3 Le toroïde barrel BT

2.4 Les toroïdes d'extrémité EC5

## 3. Conception, montage et tests de l'aimant CMS

3.1 Conception et montage

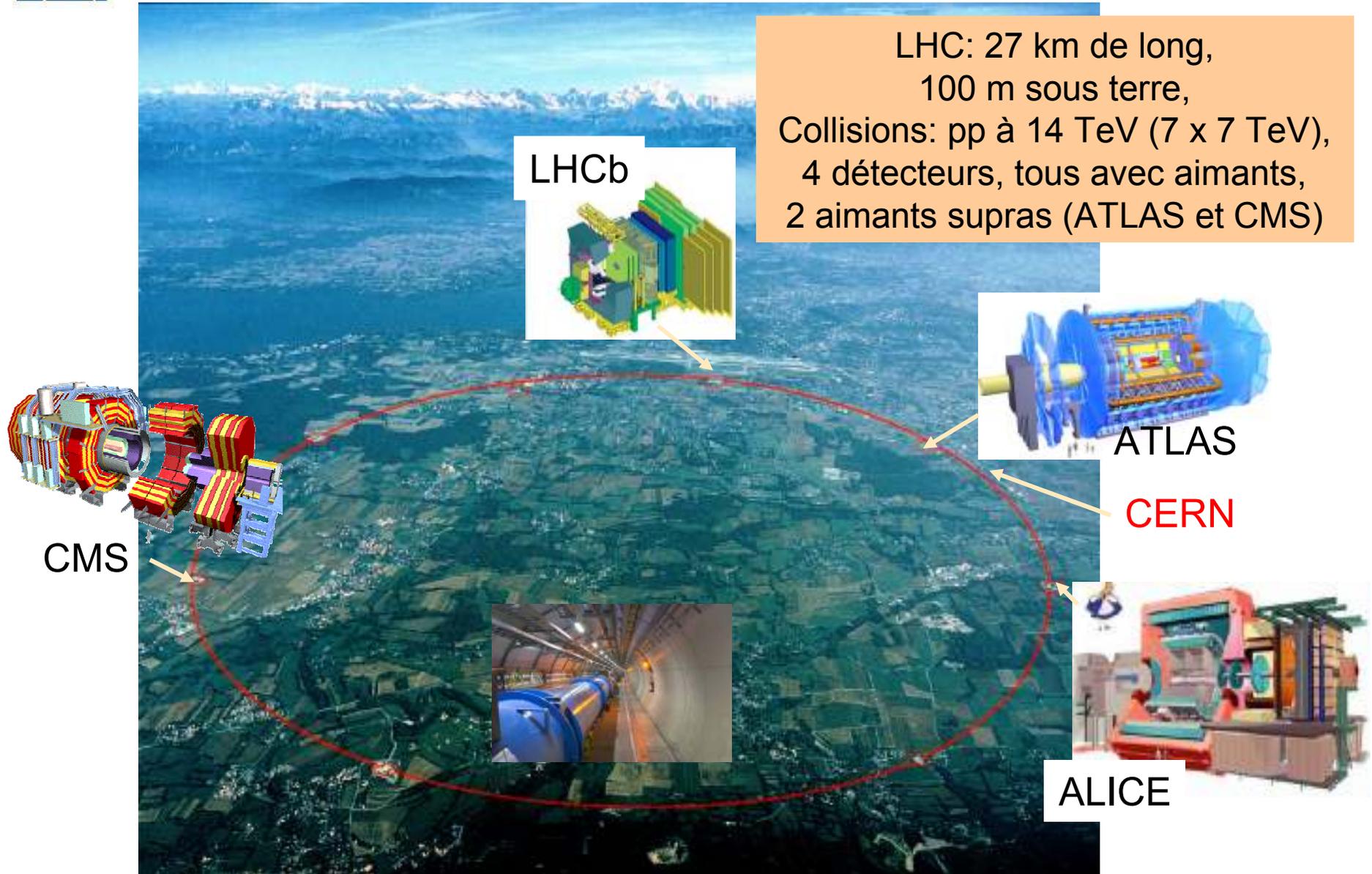
3.2 Quelques résultats expérimentaux

## 4. Situation à ce jour

## 5. Conclusions

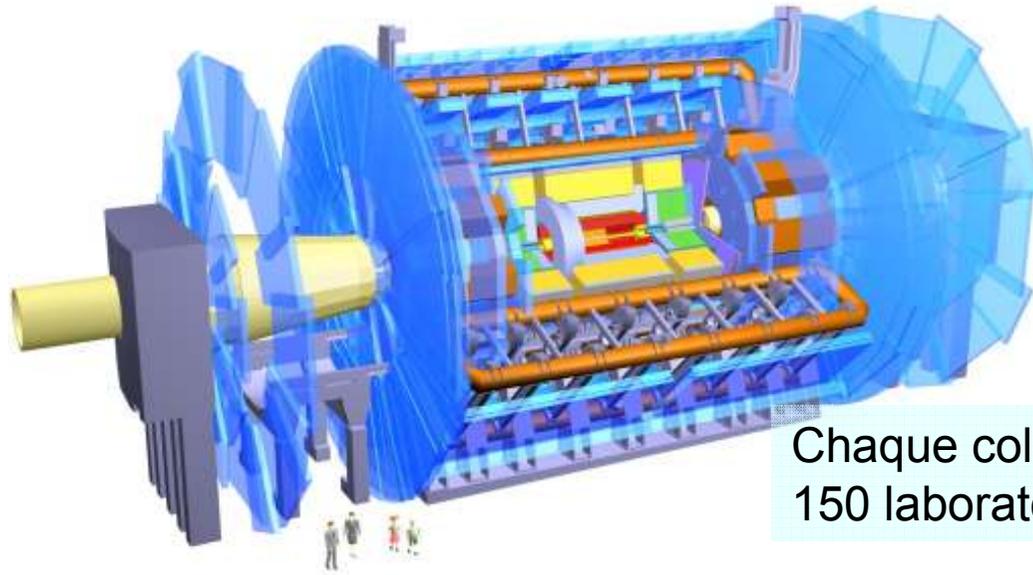


# Demain, le LHC





# Les détecteurs ATLAS et CMS



## ATLAS:

Longueur = 46 m

Diamètre = 25 m

Poids = 7000 t

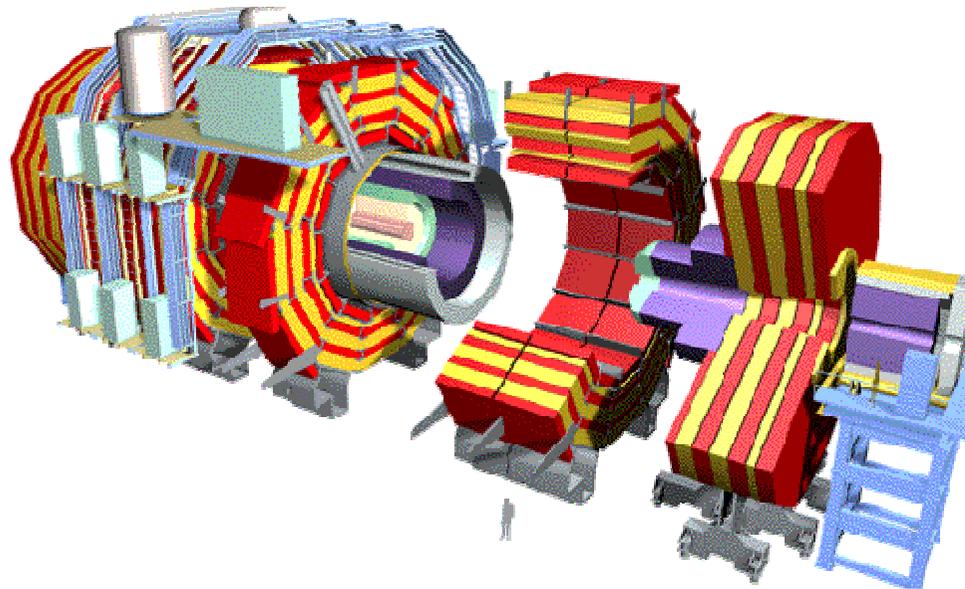
Chaque collaboration = 1500 chercheurs  
150 laboratoires dans ~ 35 pays

## CMS:

Longueur = 22 m

Diamètre = 15 m

Poids = 12500 t





## Pourquoi utiliser un champ magnétique dans un détecteur ?

- Pour une particule chargée (charge  $q$ ) qui se déplace dans un champ magnétique  $B$  sur une longueur  $L$  :
  - . Quantité de mouvement  $p = m v = q \rho B$  ( $\rho =$  rayon de courbure)
  - . Flèche  $s \sim q B L^2 / p$
  - . Précision sur la mesure de  $p$   $p / \sigma(p) \sim B L^2 / p$d'où l'intérêt **d'augmenter** le champ et les dimensions de l'aimant
- **Trois** configurations magnétiques peuvent être utilisées :
  - . Dipôles
  - . Solénoïdes (épais ou minces): ATLAS CS, CMS
  - . Toroïdes : ATLAS BT et ECT



# Aimants ATLAS et CMS

- Deux aimants supras avec des structures différentes :
  - ATLAS (solénoïde mince + toroïde Barrel + toroïdes End-cap)
  - CMS (solénoïde + blindage magnétique)
- Points en commun pour ces deux aimants:
  - large collaboration internationale
  - large participation des firmes industrielles
  - dimensions et performances requises jamais réalisées auparavant
  - des choix techniques similaires (conducteur, bobinage, refroidissement)
- Et aussi quelques différences, essentiellement dans la stratégie d'assemblage et de tests :
  - ATLAS : assemblage de chaque bobine et tests partiels en surface, assemblage global et test final en caverne
  - CMS : assemblage global et test en surface, transfert et remontage en caverne

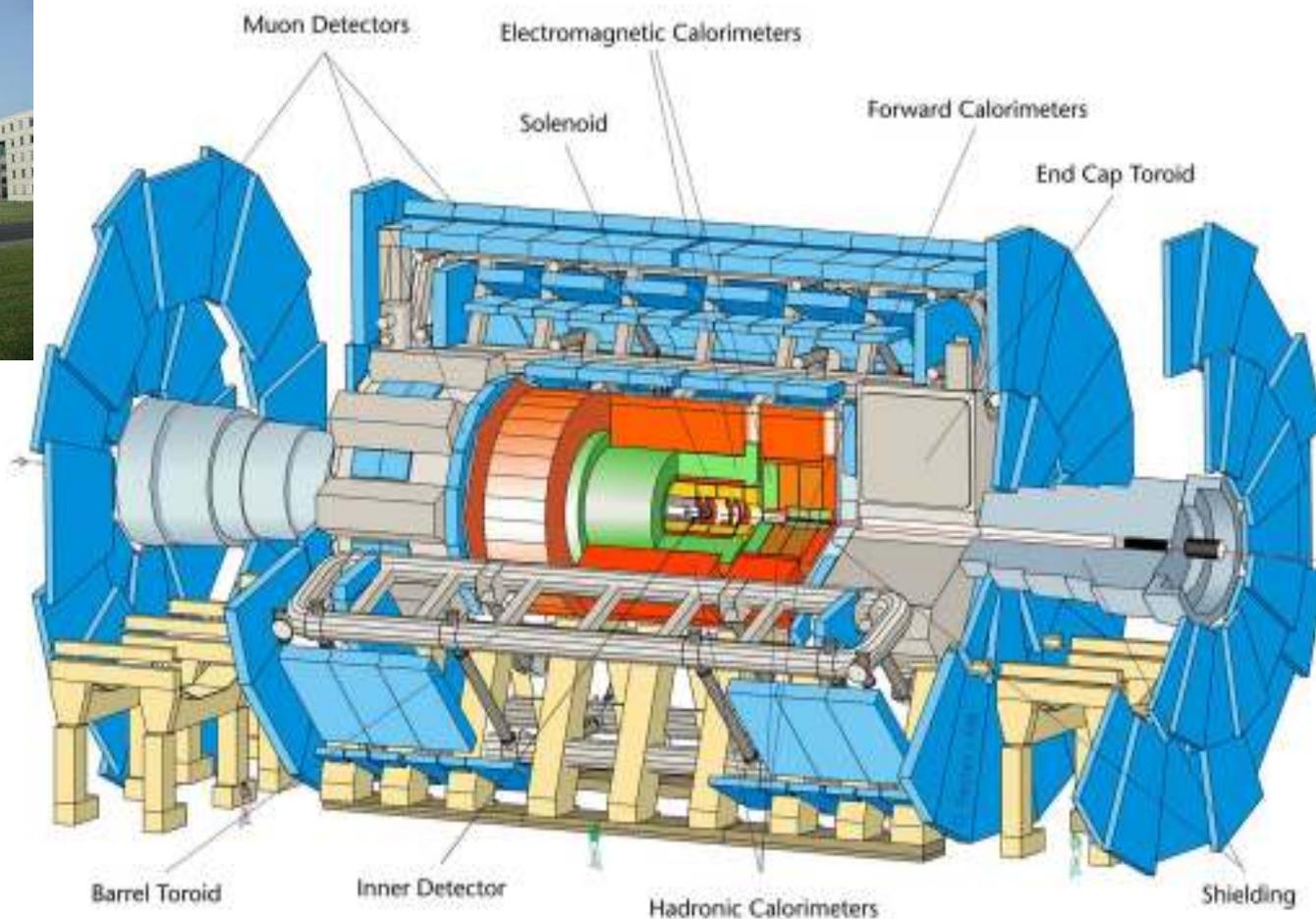


# Plan

1. Introduction
- 2. Conception, montage et tests du système magnétique ATLAS**
  - 2.1 L'ensemble du système magnétique
  - 2.2 Le solénoïde central CS
  - 2.3 Le toroïde barrel BT
  - 2.4 Les toroïdes d'extrémité EC5
3. Conception, montage et tests de l'aimant CMS
  - 3.1 Conception et montage
  - 3.2 Quelques résultats expérimentaux
4. Situation à ce jour
5. Conclusions



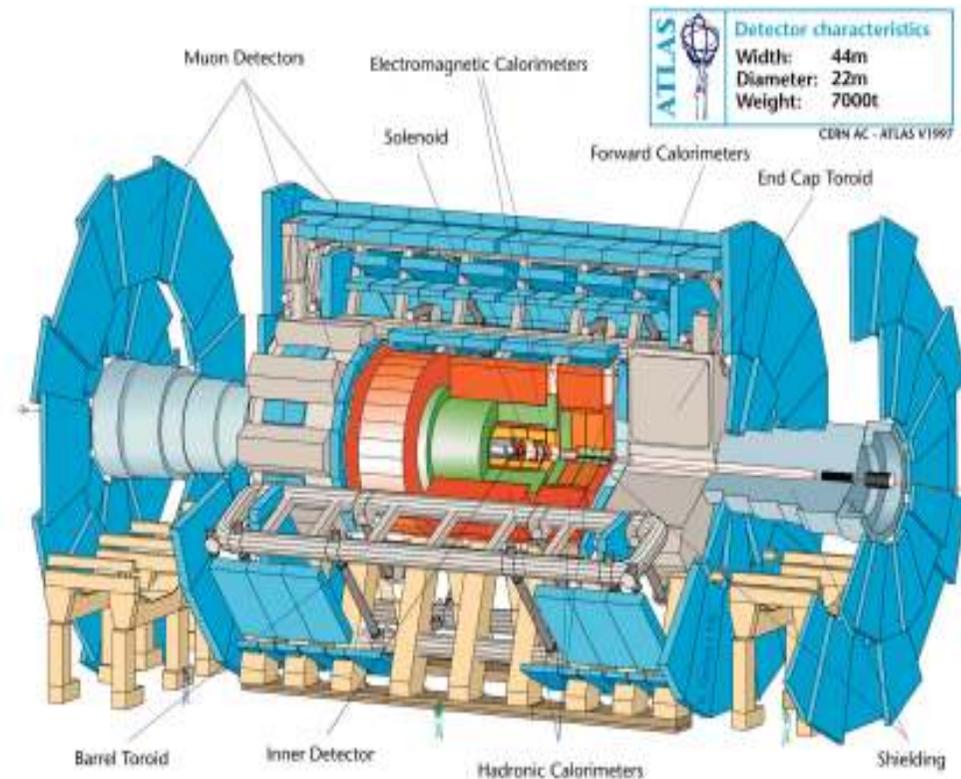
# Le détecteur ATLAS



**Diamètre** = 25 m  
**Longueur du toroïde** = 26 m  
**Longueur totale** = 46 m  
**Poids total** = 7000 t

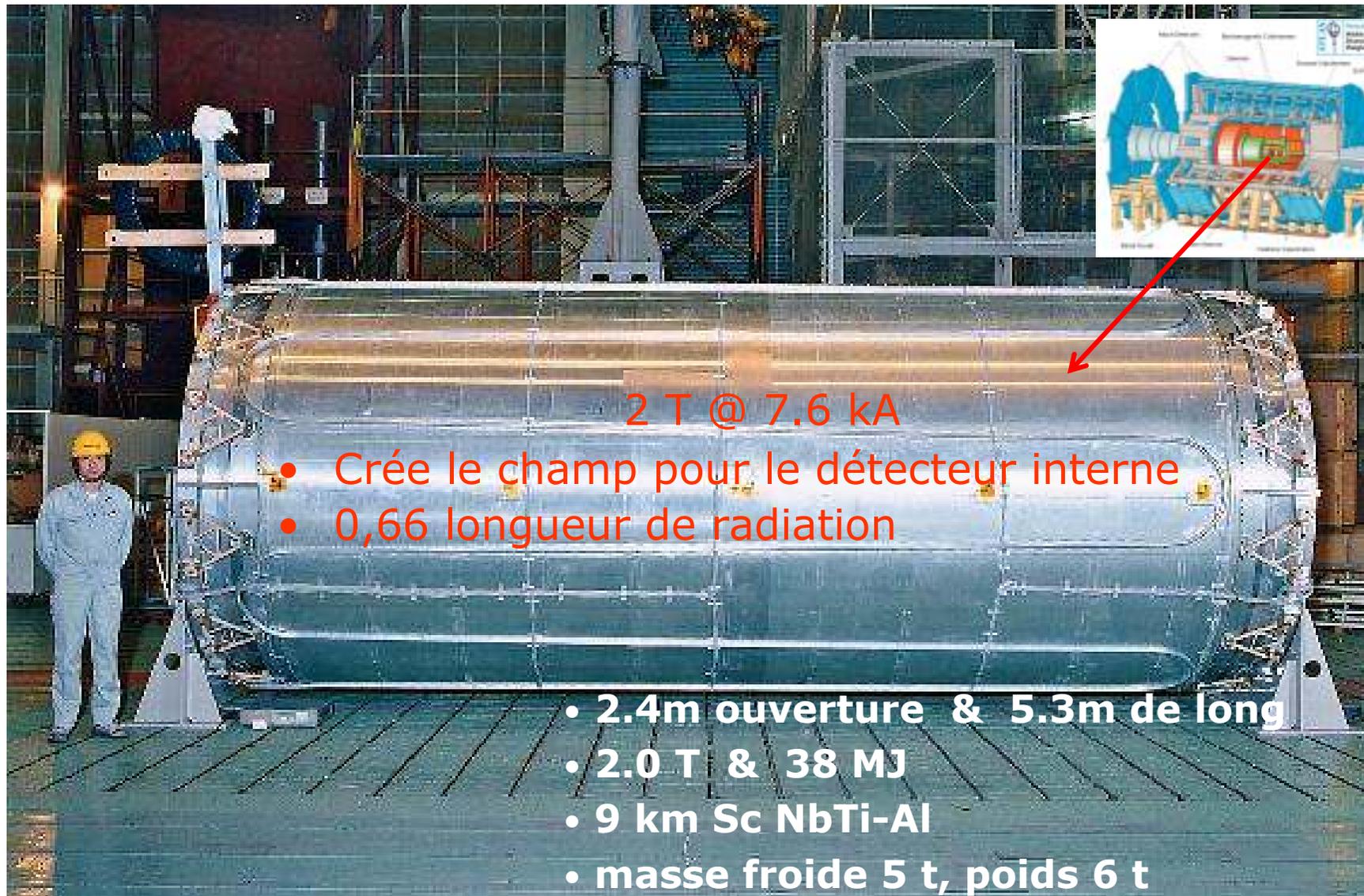
# Les aimants supras d'ATLAS

- Solénoïde central CS + Toroïde barrel BT + Toroïdes d'extrémité ECT
- **4 aimants** pour créer le champ dans le détecteur interne (solénoïde) et dans le détecteur de muons (toroïdes)
- 20 m de diamètre x 25 m de long
- Volume de **8200 m<sup>3</sup>**
- **170 t** de supracond (**90 km**)
- **700 t** de masse froide
- **1320 t** de poids total
- **20.5 kA à 4.1 T**
- **1.55 GJ** d'énergie stockée
- Refroid. par conduction à **4.8 K**
- **9 années** de construction 98-06
- **Le plus grand aimant supraconducteur au monde !**





# Solénoïde central



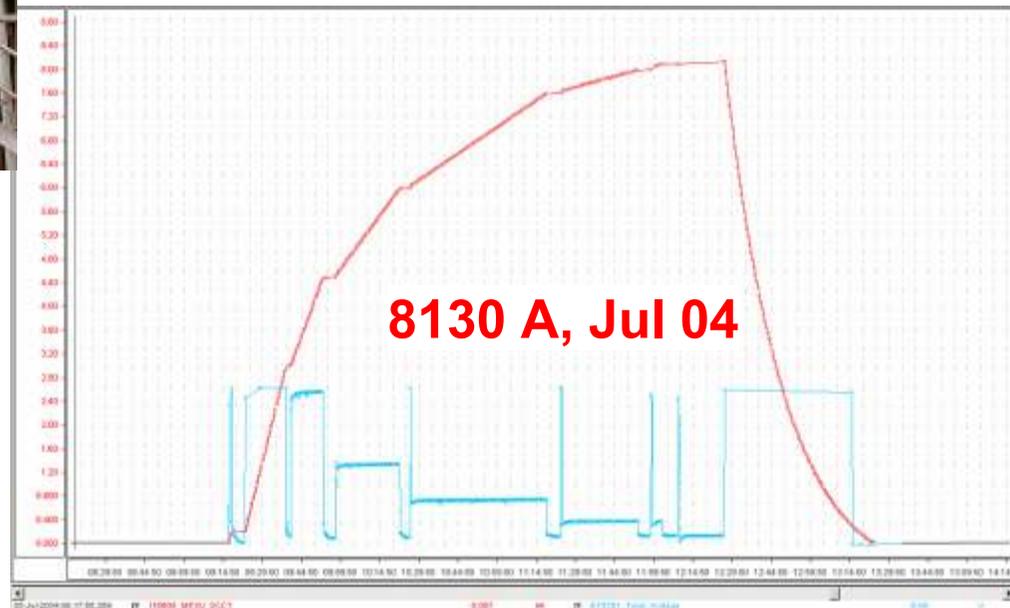
# Intégration et tests du solénoïde central CS



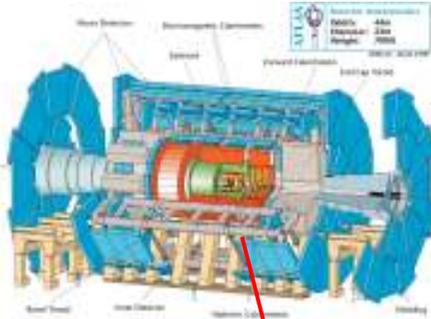
- Test au Japon avant envoi en 03
- Test en surface au CERN en été 04
- Installation en caverne en oct 04
- Re-testé en caverne en mai 06

Tests en surface en juillet 04:

- I nominal (7600 A) atteint sans transition
- 2 transitions à 7950 et 8110 A
- I max atteint : 8130 A (6% de marge de sécurité)

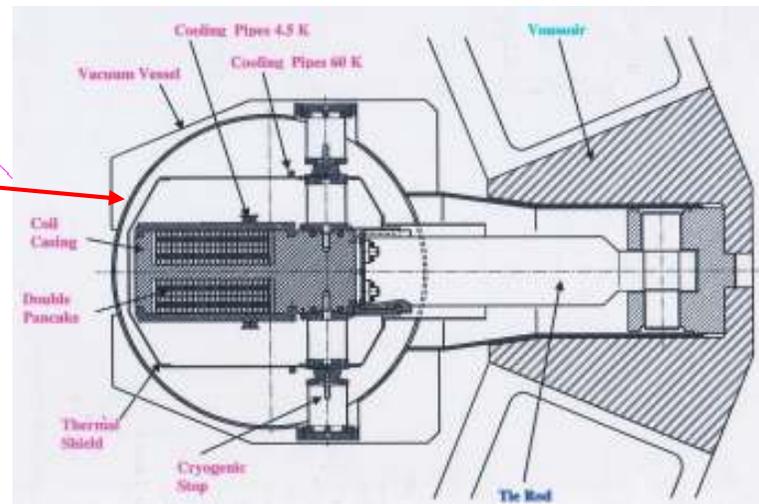
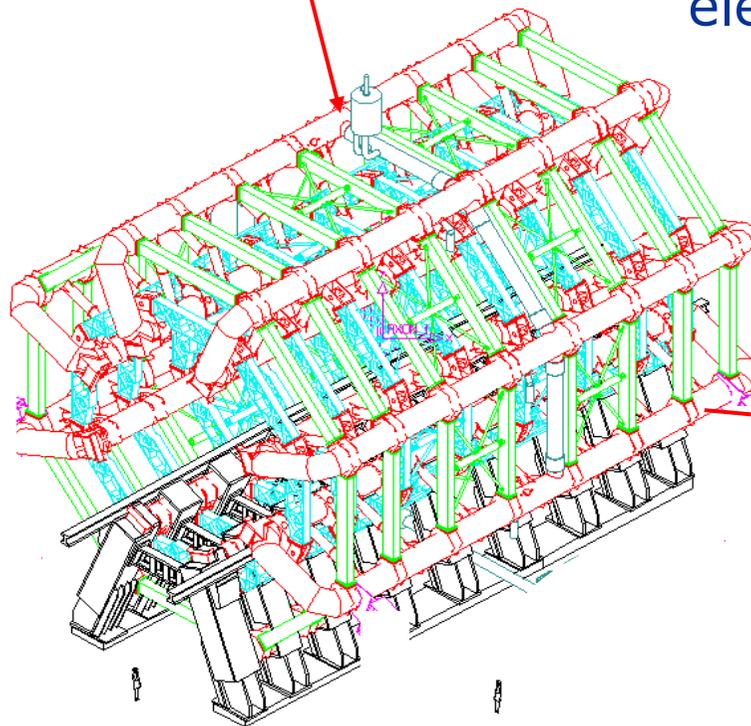


## Structure



- 8 bobines  $25 \times 5 \text{ m}^2$ , 20 kA,  $B_{\text{max}} 4.0 \text{ T}$
- Toroïde monté sur 18 pieds et 6 berceaux sur le sol de la caverne
- Un cryostat par bobine, mais alimentation électrique et cryogénique commune

- Deux double galettes par bobine, boîte à bobine en Al, tirants de suspension en Ti, enceinte à vide en inox



**En fonctionnement final, en série électriquement et cryogéniquement avec les 2 ECT**

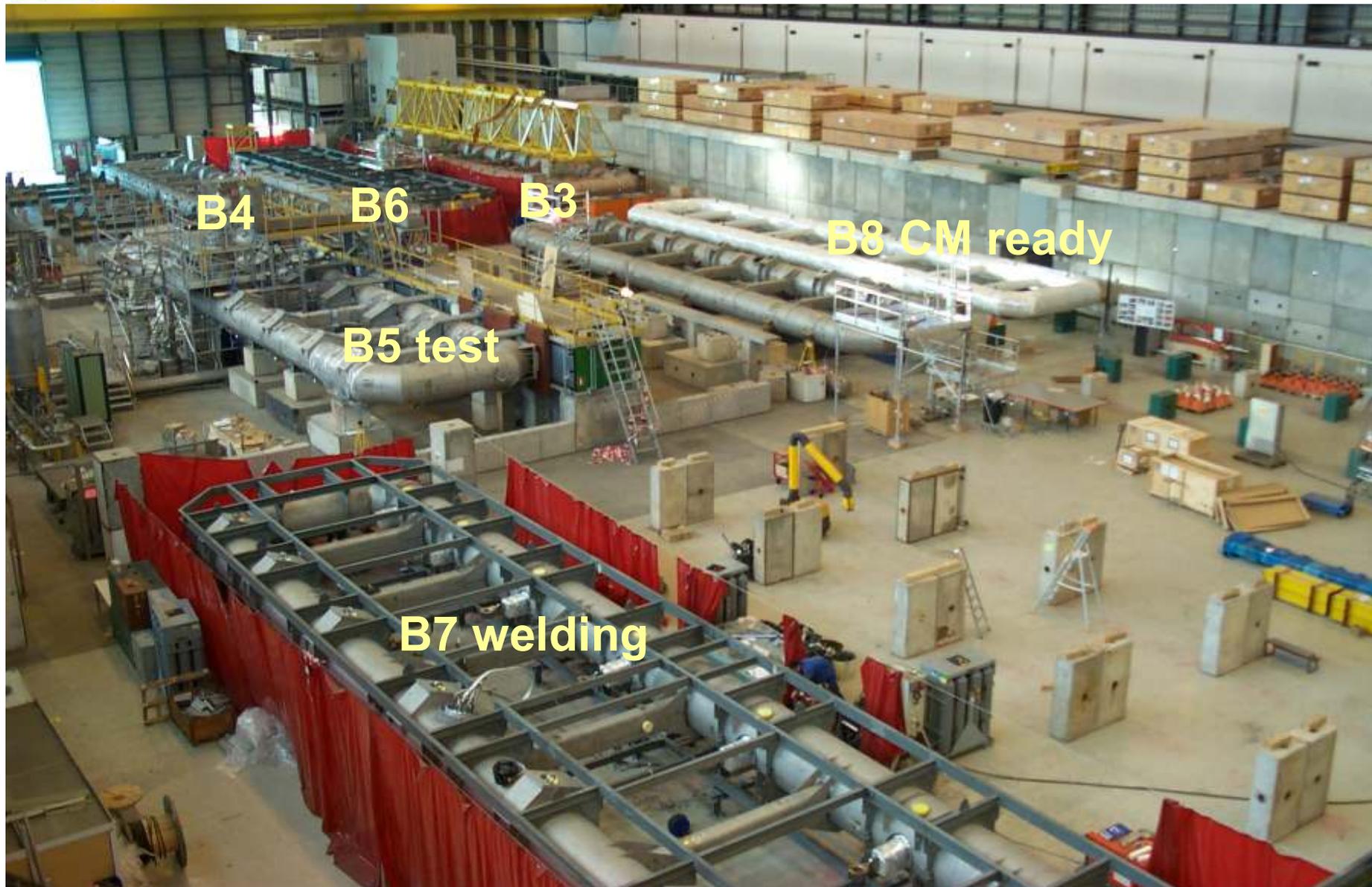


# Composants du BT pour l'intégration



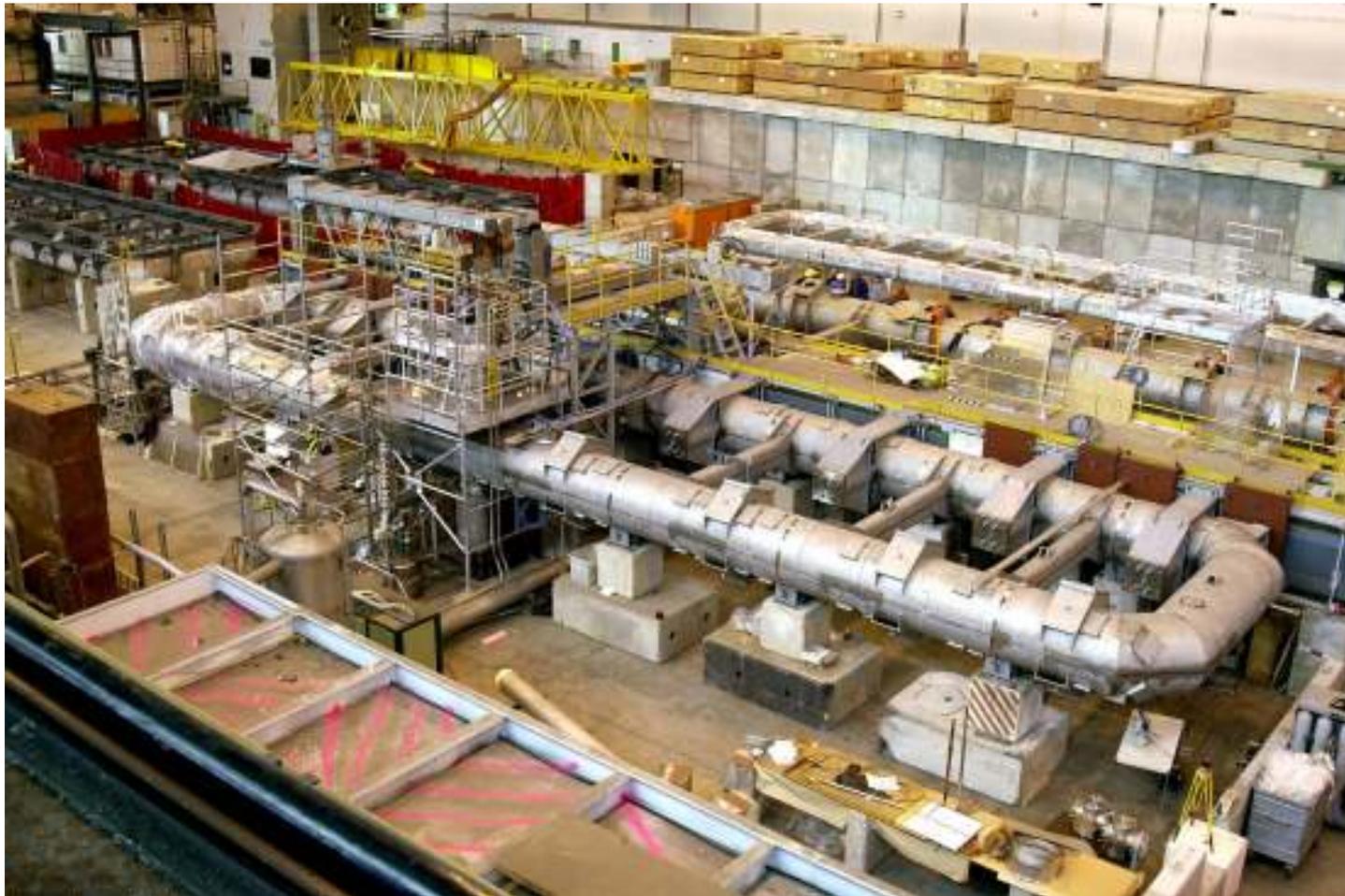


# Intégration et tests en surface au CERN





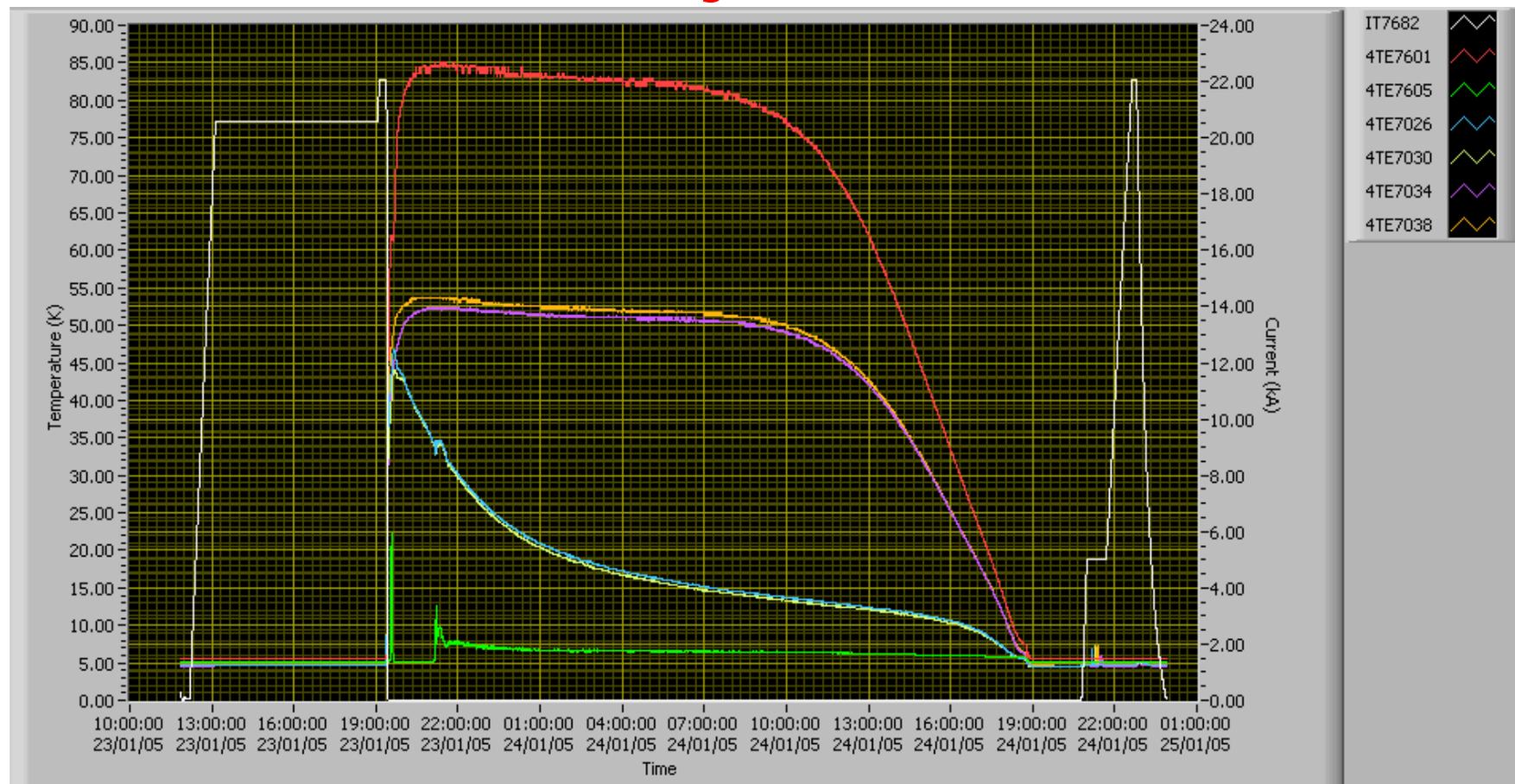
## Test individuel de chaque bobine en surface





# Test individuel de chaque bobine en surface

- Courant nominal 20.5kA, courant max de test 22 kA
- Figure : 6h de plateau au courant nominal, montée puis décharge rapide à 22 kA ; récupération cryo en 24 hrs; remontée à 22 kA et décharge lente





# Transfert en caverne



- Opération délicate, mais toujours en sécurité
- Descente de la bobine en position inclinée
- Treuil hydraulique de 190 t (100 t pour une bobine)



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





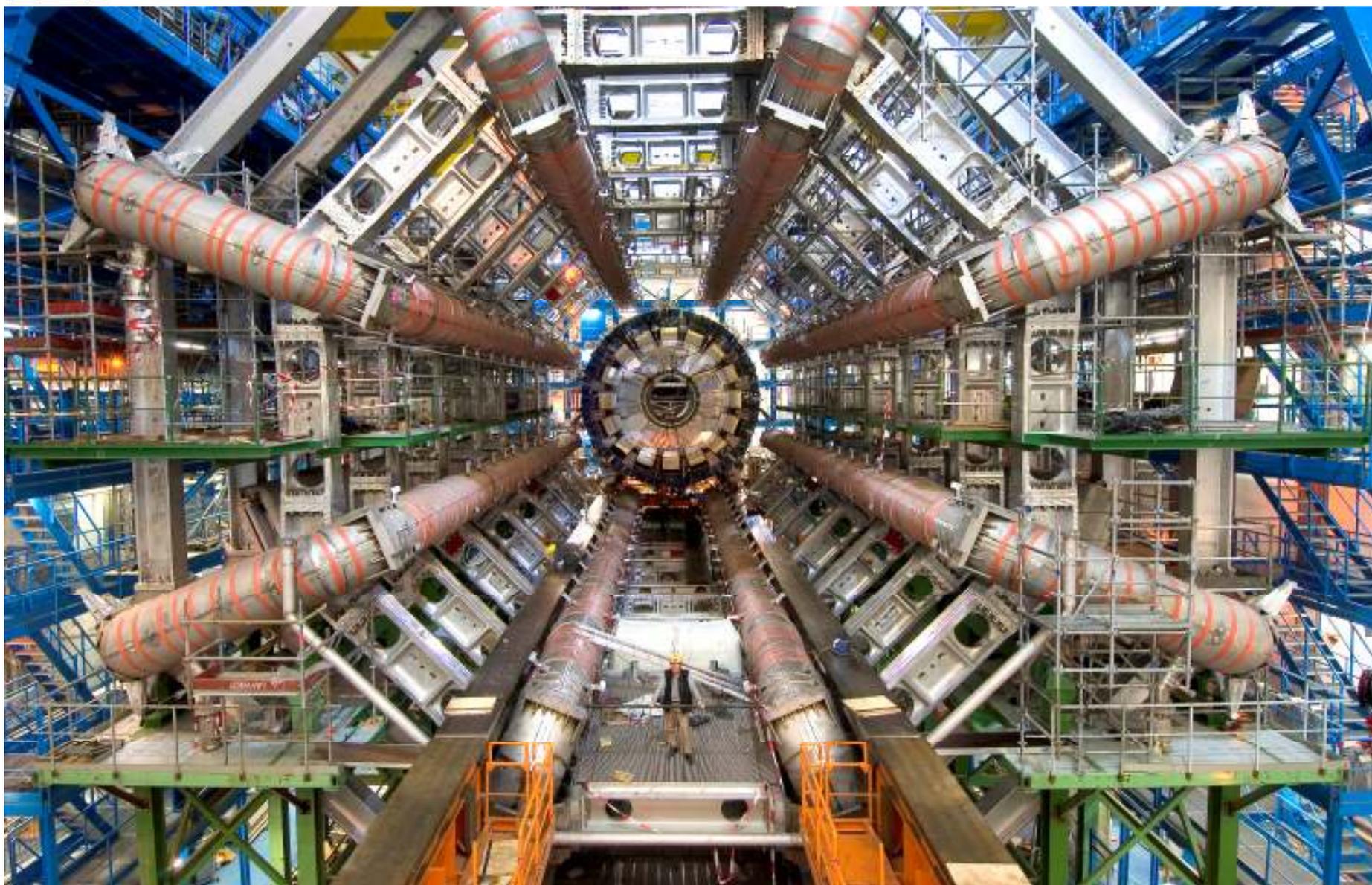
# Assemblage mécanique du BT



- Installation des 4 bobines inférieures
- .... avec beaucoup de supports provisoires



# Le toroïde barrel terminé (4 nov 05)



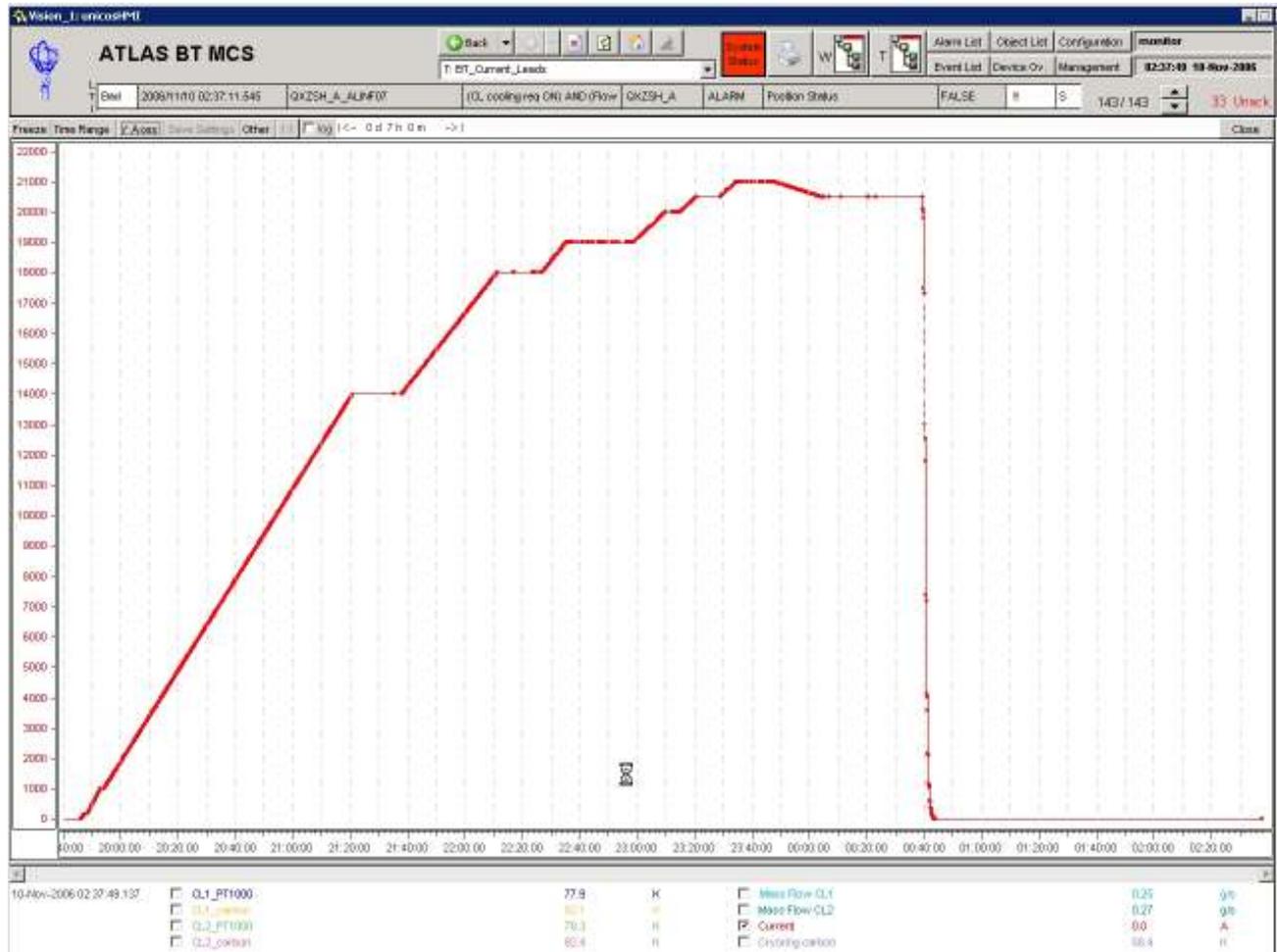
Les Journées Thématiques AFF-CCS,  
CERN, Genève, Suisse

20

F. Kircher, 10 avril 2008



# Tests du toroïde BT en caverne

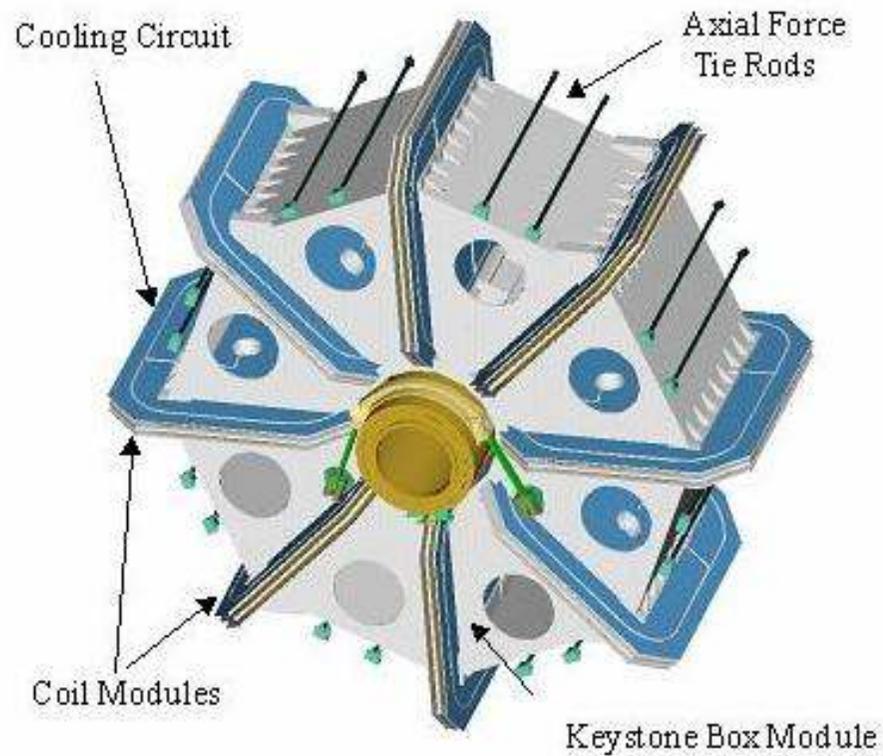


9 nov. 2005 :

- $I_{nom}$  (20,5 kA) atteint sans transition
- $I_{max}$  atteint : 21 kA
- Transition induite par arrêt du refroidissement des amenées de courant ( $T_{max} = 55$  K après transition)



# Toroïdes d'extrémité ECT



Masse froide (8 bobines, 1 cryostat)



Enceinte à vide

F. Kircher, 10 avril 2008

# Tests des toroïdes d'extrémité



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

- **En surface (S1 07)**
  - » à 77 K (vide, refroidissement, pertes, tenue mécanique, continuité électrique)
  
- **En caverne (T4 07)**
  - » à courant réduit
    - 15 kA pour ECTA (déplacement inopiné)
    - 10 kA pour ECTB

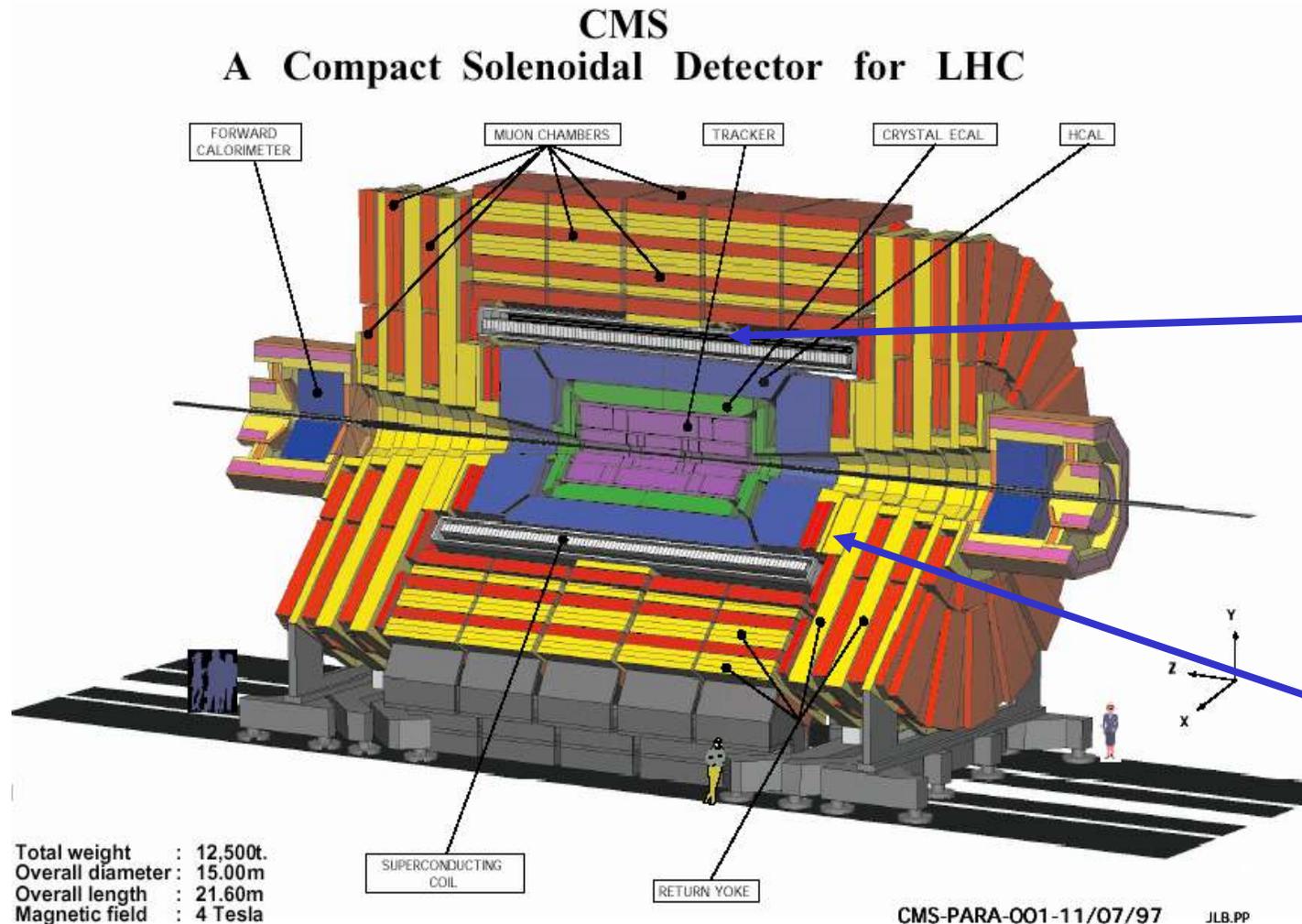


# Plan

1. Introduction
2. Conception, montage et tests du système magnétique ATLAS
  - 2.1 L'ensemble du système magnétique
  - 2.2 Le solénoïde central CS
  - 2.3 Le toroïde barrel BT
  - 2.4 Les toroïdes d'extrémité EC5
- 3. Conception, montage et tests de l'aimant CMS**
  - 3.1 Conception et montage
  - 3.2 Quelques résultats expérimentaux
4. Situation à ce jour
5. Conclusions



# Détecteur CMS (Compact Muon Solenoid)



Design compact

Basé sur un solénoïde SC

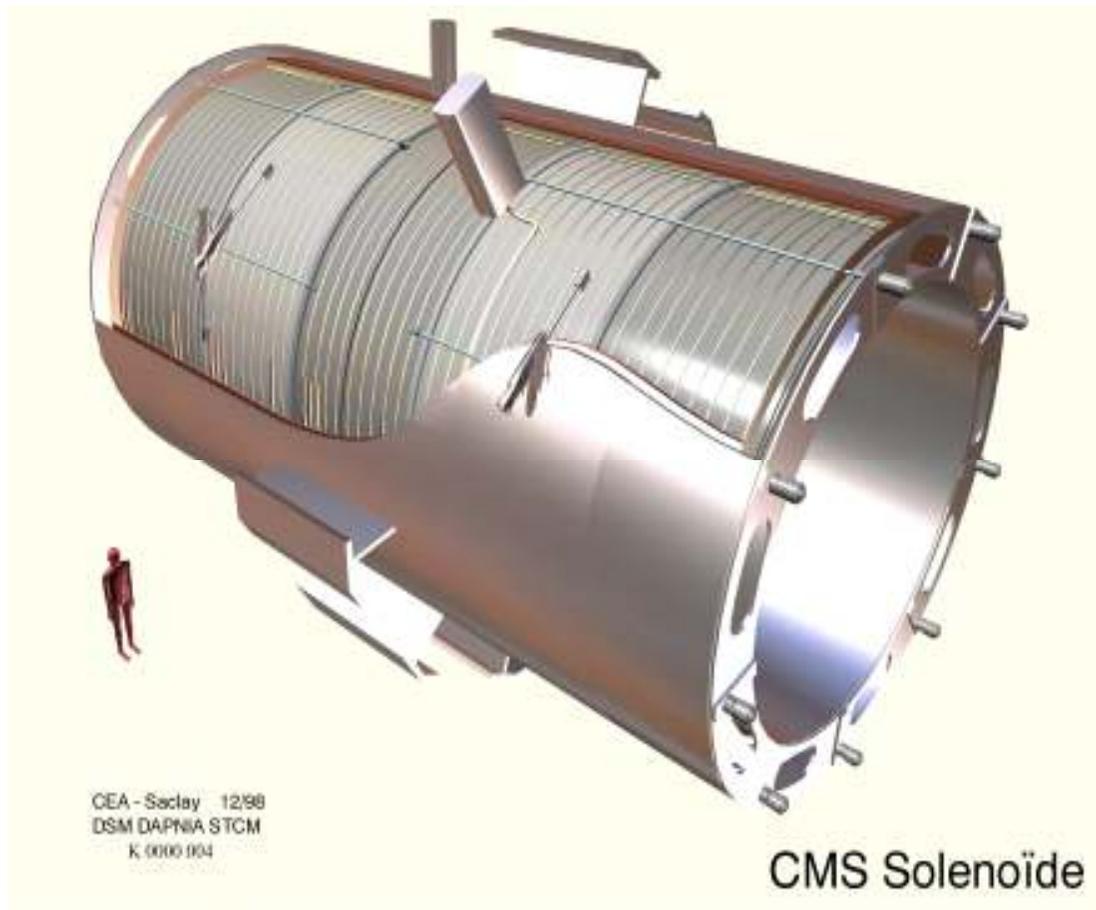
6 m de diamètre

13 m de long

**Champ élevé 4T**

+ culasse en fer doux

## Du Virtuel au Réel : 1998-2006



Champ central : 4 T

Courant nominal : 20 kA

Energie stockée : 2.6 GJ

Masse froide

Longueur : 12.5 m

Diamètre interne : 6 m

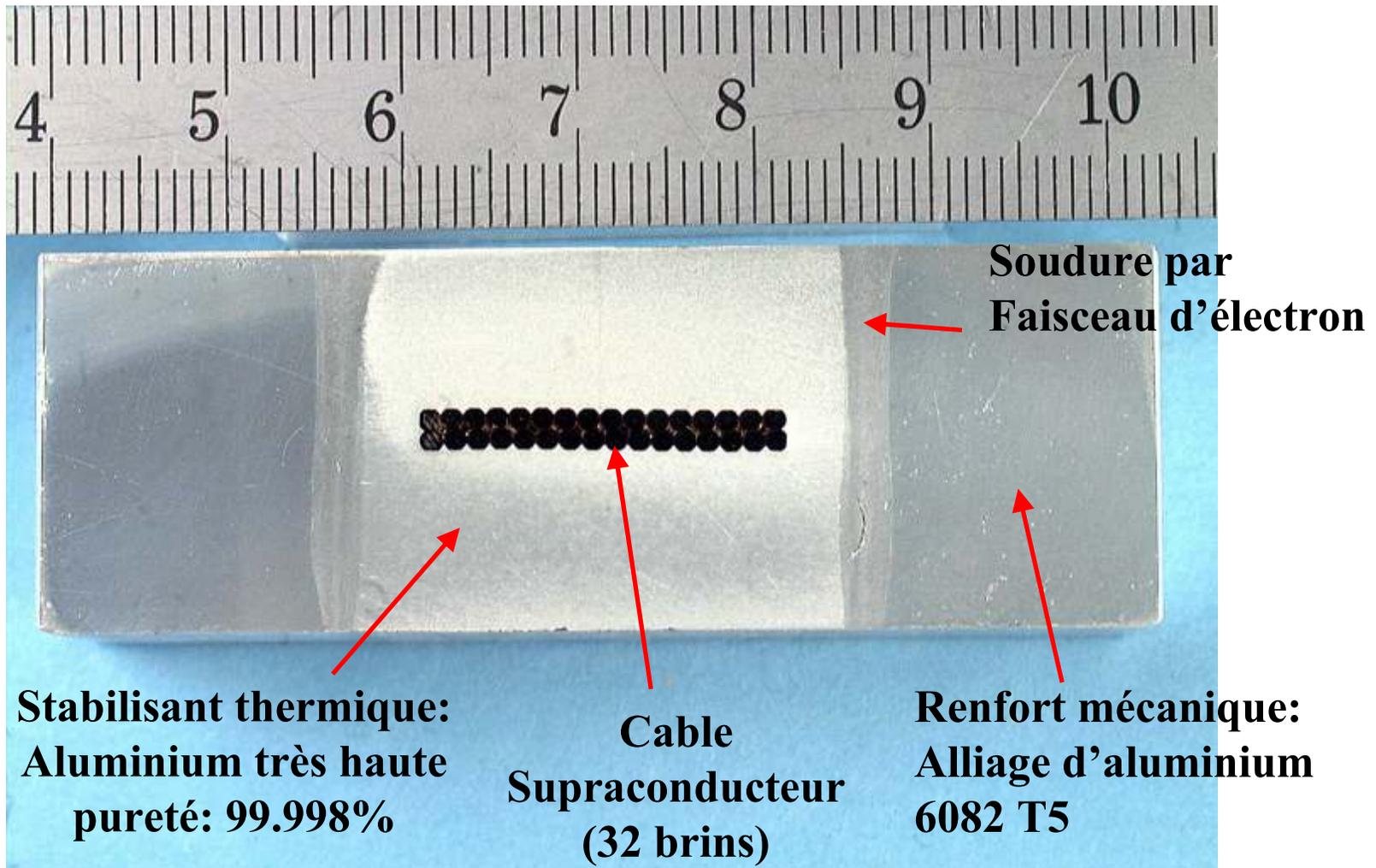
Poids : 220 t



## Quelques challenges de l'aimant CMS

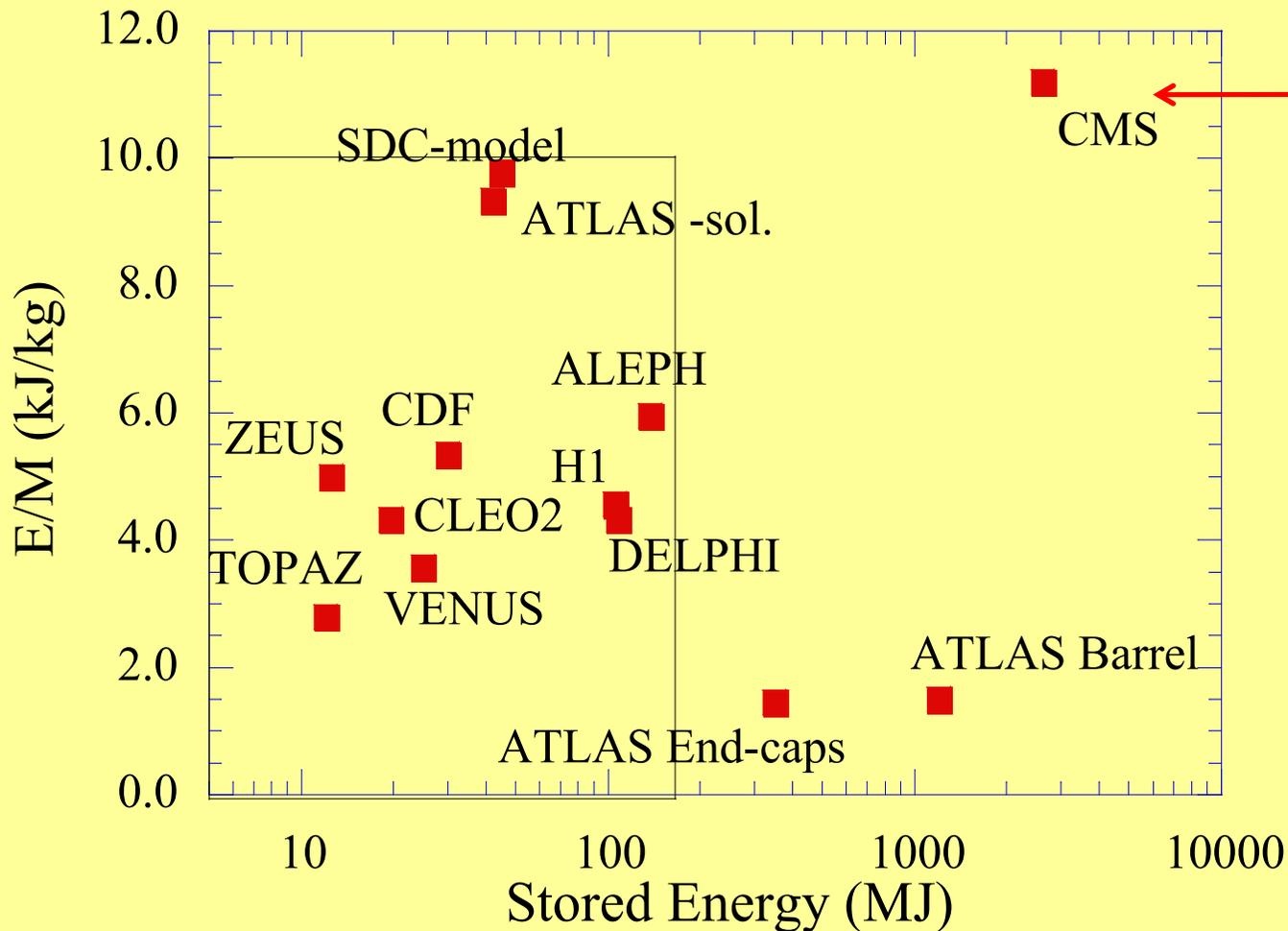
- Conducteur 20 kA, **renforcé mécaniquement** par un alliage d'aluminium de haute résistance mécanique pour tenir la pression magnétique (64 bars)
- Bobinage en **5 modules**, de **4 couches** chacun. Le conducteur est bobiné à l'**intérieur** du mandrin
- Transmission entre module de la **force magnétique axiale** de 12 000 t, nécessitant un très bon contact
- Energie stockée de **11,6 kJ/kg** de masse froide

# Le conducteur CMS





# Densité d'énergie stockée des aimants SC



Parmi les aimants de détecteur, **CMS** a à la fois :

- la plus large énergie stockée (2.6 GJ)
- la plus large densité d'énergie stockée (11.6 kJ/kg)



# Réalisation des modules (06/04)



Polymérisation  
CB-1



Finition CB0



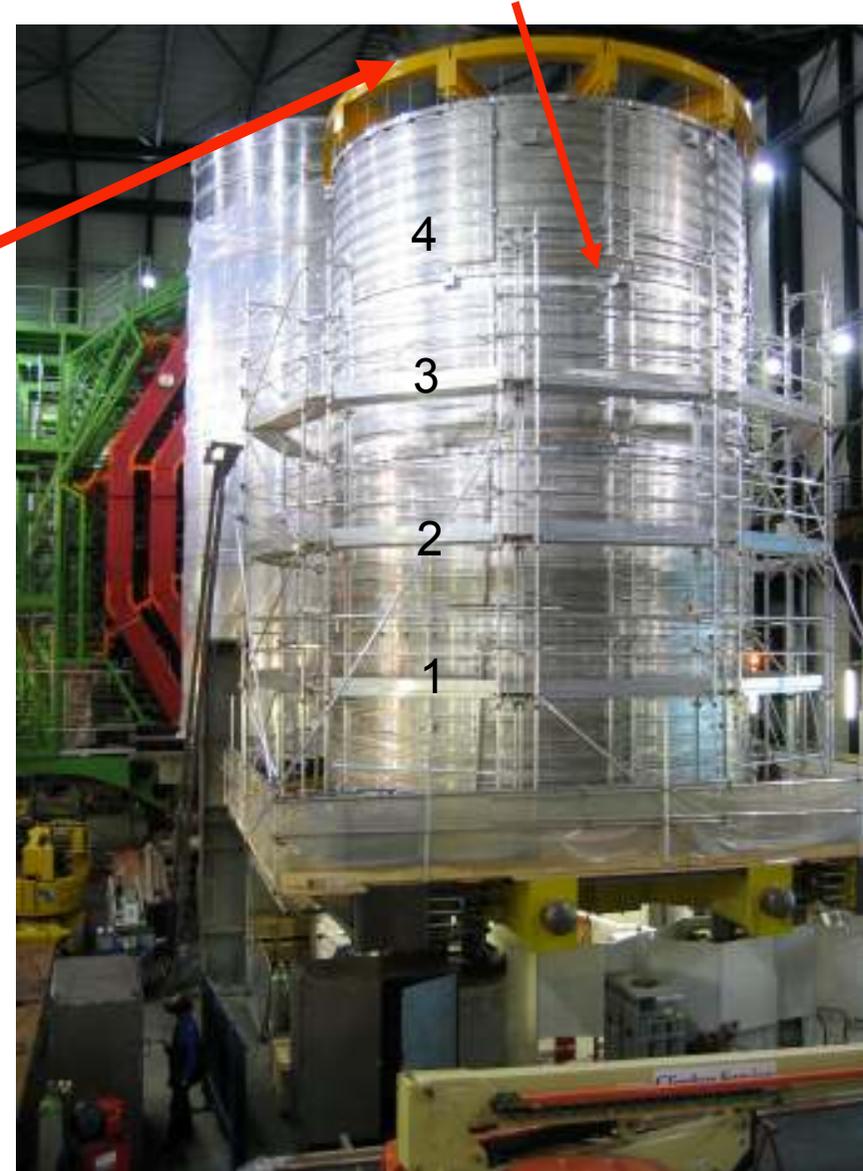
Bobinage CB+1



Réalisation  
cylindre  
CB+2



# Assemblage de la bobine en vertical



Permet en particulier un couplage mécanique précis



## Août 05: basculement à l'horizontal





# Août 05 : insertion de la bobine dans l'enceinte à vide

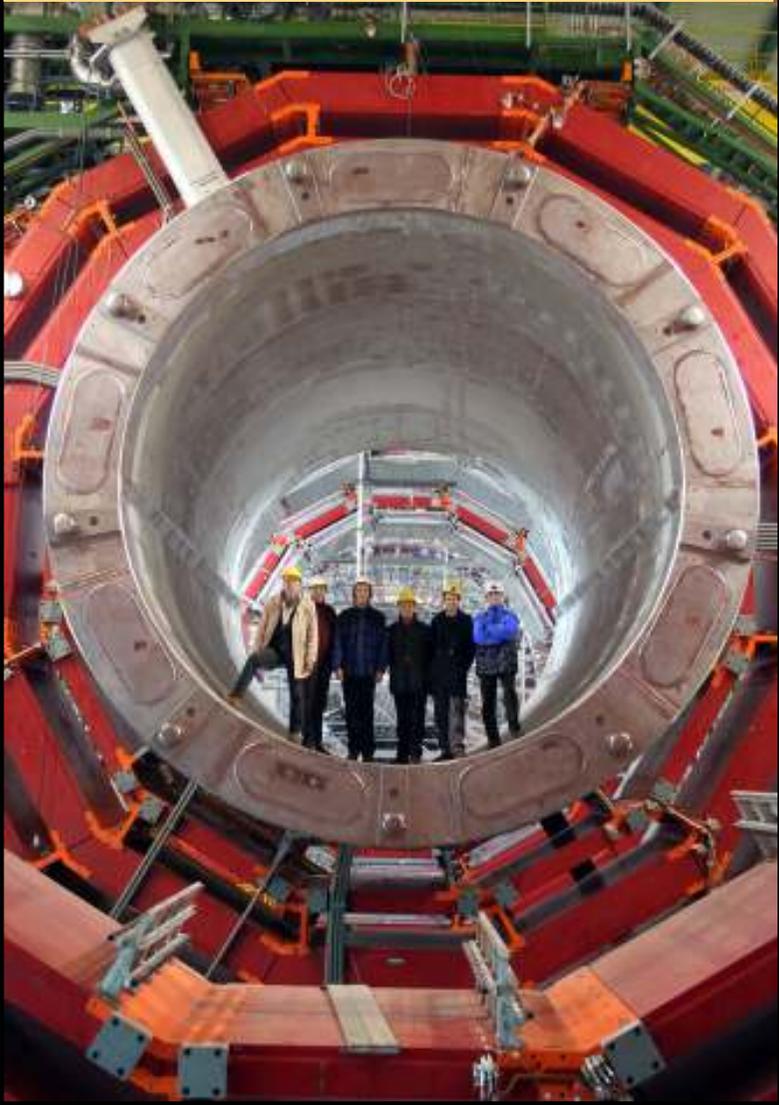


Les Journées Thématiques AFF-CCS,  
CERN, Genève, Suisse



# Mise en froid (février 2006)

## Refroidissement du solénoïde



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

Emisior : W. DUTHIL      Statut : Etude du prérefroidissement      Date : 25.09.01  
 Destinataires : MM. BENICHO, DESPORTES, GENIE, LOTTIN J.C., FAILLER      Feuille: 1/1

- Principe



$\Delta T \leq 40^\circ$   
 - Le circuit de gaz est refroidi par une boîte  
 froide de refroidissement de pré-refroidissement par  $Li_2$   
 - On se donne 25 jours pour arriver à  $4K$   
 et espère de plus pour arriver à  $4.5K$  (total = 3 jours)  
 - Masse à refroidir : Alu  $R_c = 230$ ,  $R_s = 2075$   
 Longueur de cylindre = 13763 d'où  $M = 214$  tonnes  
 - Calcul de la densité de refroidissement  
 de  $3W/m^2$  à  $100^\circ$  :  $\Delta T = \frac{R \cdot \Delta T}{\rho \cdot c_p} = 40^\circ$   
 On fait varier  $m_{ref}$  pour arriver à  $\Delta T < 25$  jours

300 K

4 K

3 février

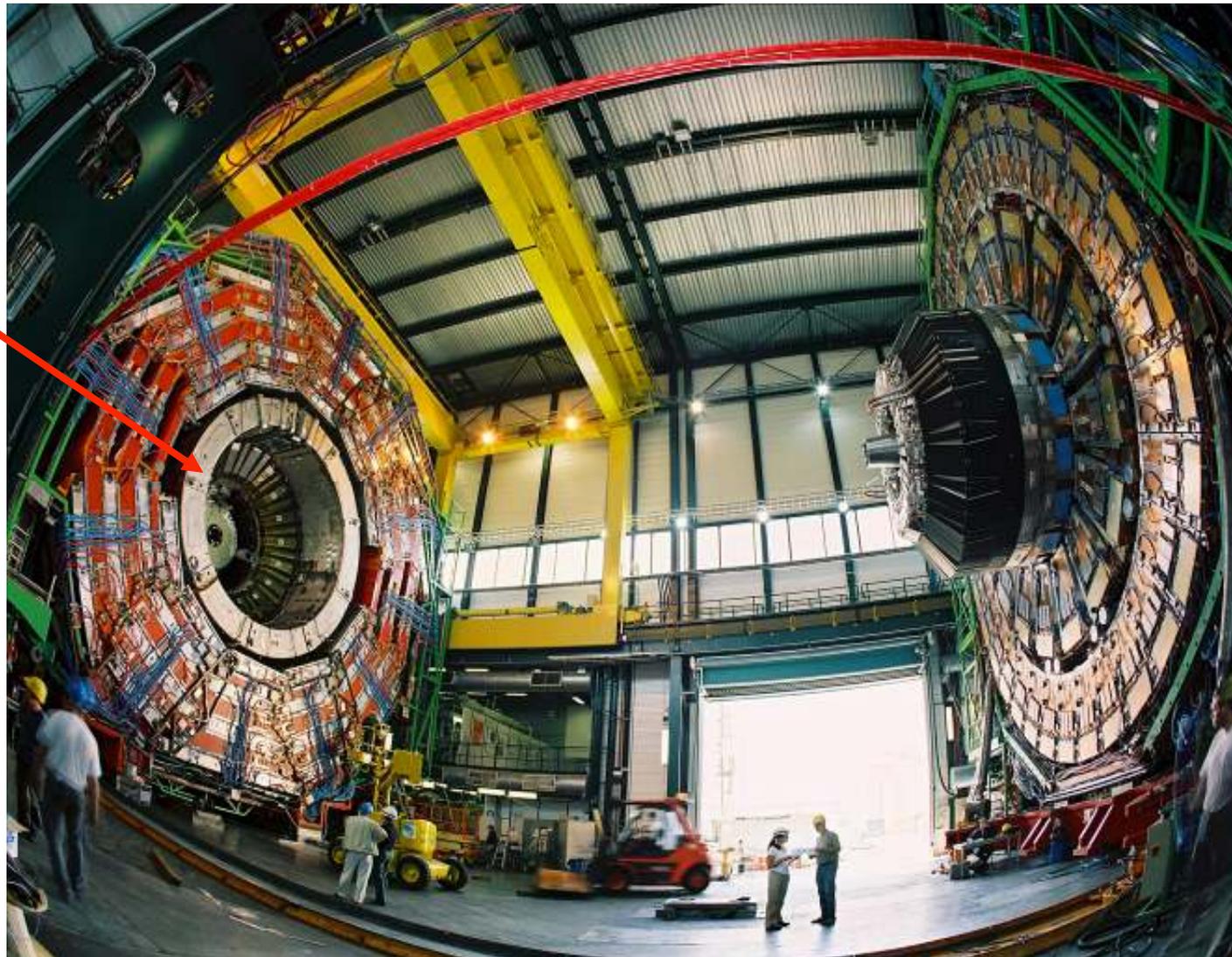
(En fait 223 tonnes)

25 février



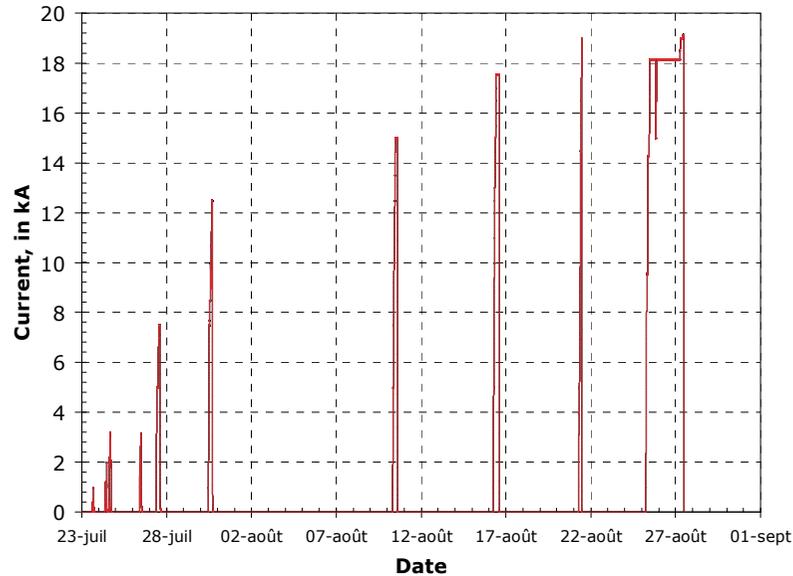
# Fermeture du blindage (juillet 06)

Bobine





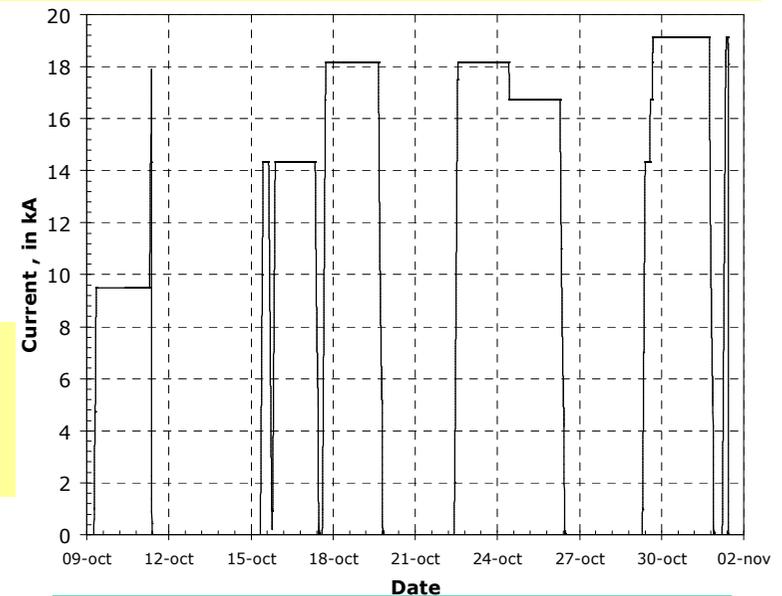
# Cycles électriques



1ère campagne

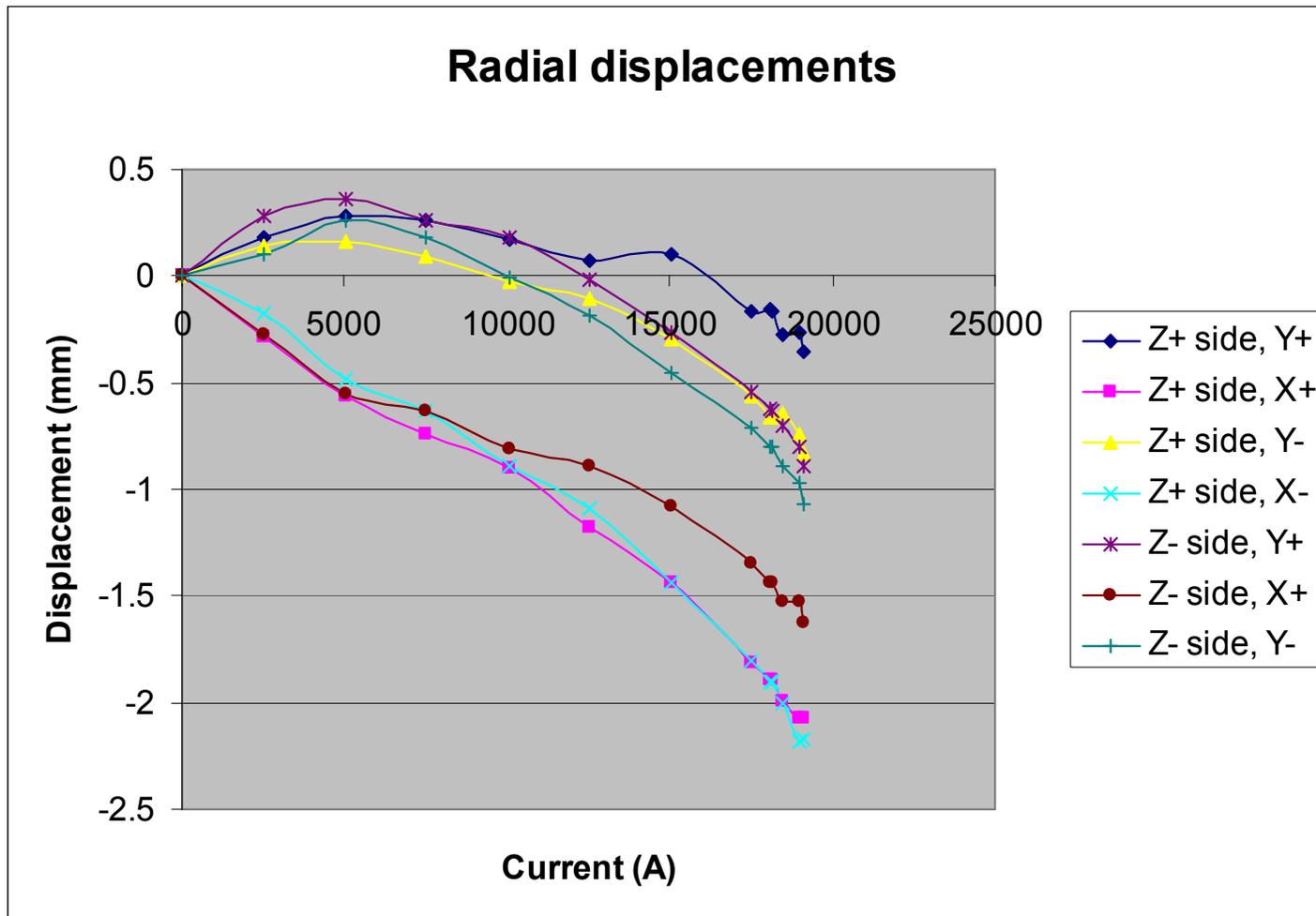
- Cartes de champ
- **Longs paliers (~ 2 jours)**
- Décharge rapide en final

- Accroissement progressif jusqu'à  $I_{nom}$
- Courts paliers (~1 h)
- Test des modes de décharge
- Pas de transition naturelle, mais effet de quench-back pour  $I > 7,5$  kA
- Deux problèmes mineurs avec des auxiliaires

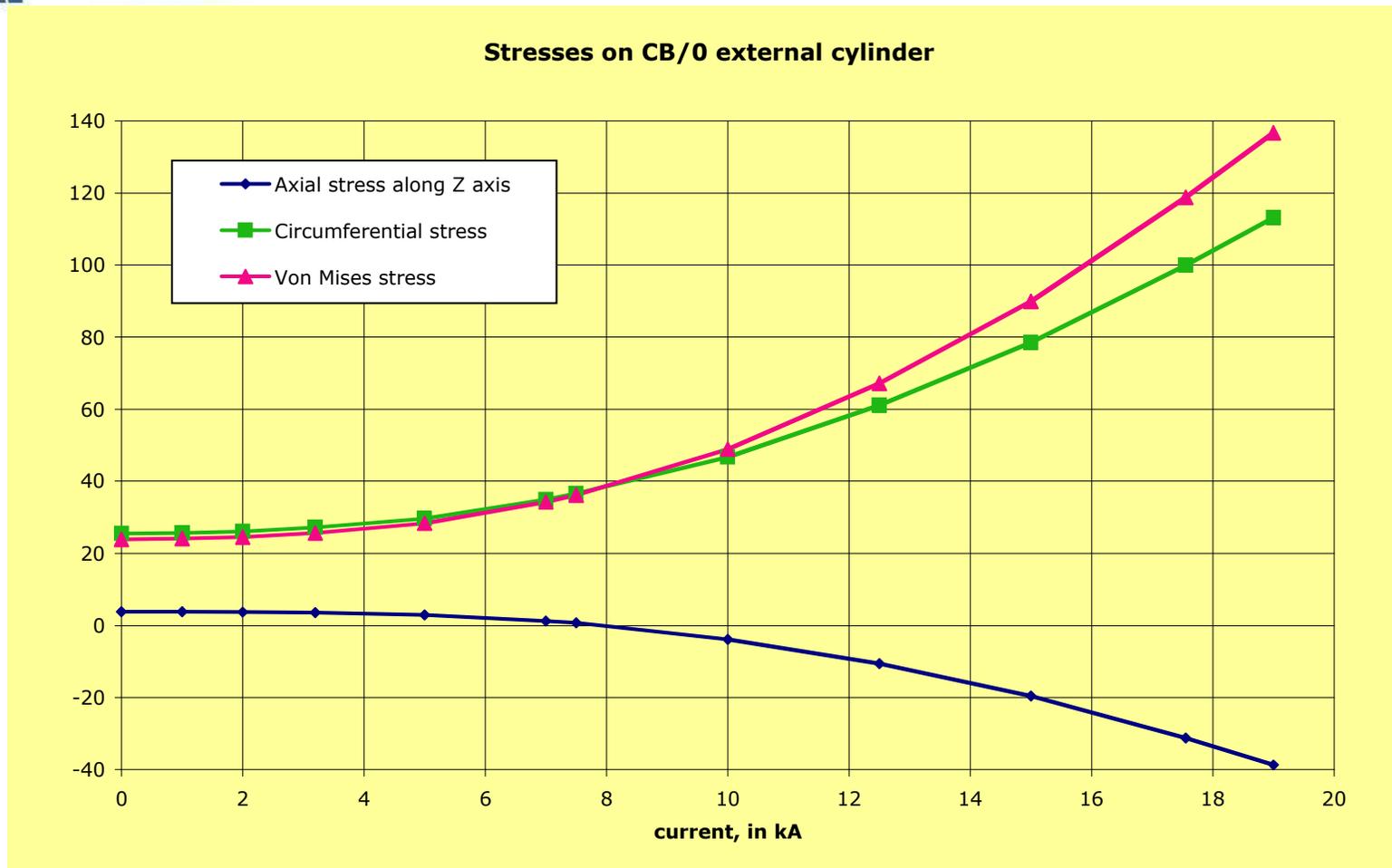


2ème campagne

# Décentrage de la masse froide dans le blindage



- ❖ A partir des capteurs de déplacement et de contrainte
- ❖ Valeur max :  
2.5 mm en z  
3.0 mm en x  
1.2 mm en y
- ❖ Très en deçà des tolérances (10 mm)

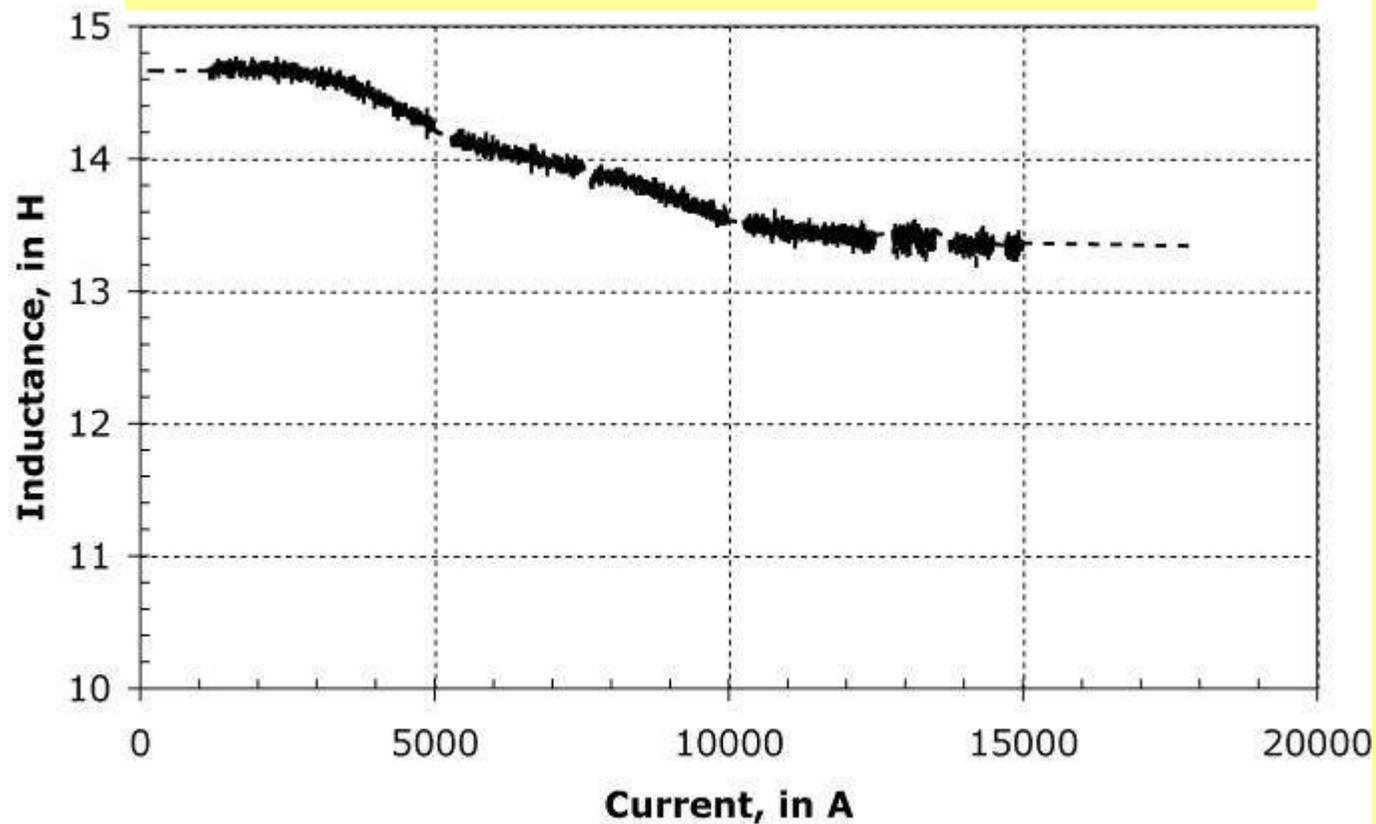


- **Contrainte de Von Mises mesurée à 4T : 138 MPa.**
- **En accord complet avec les calculs de 1998.**



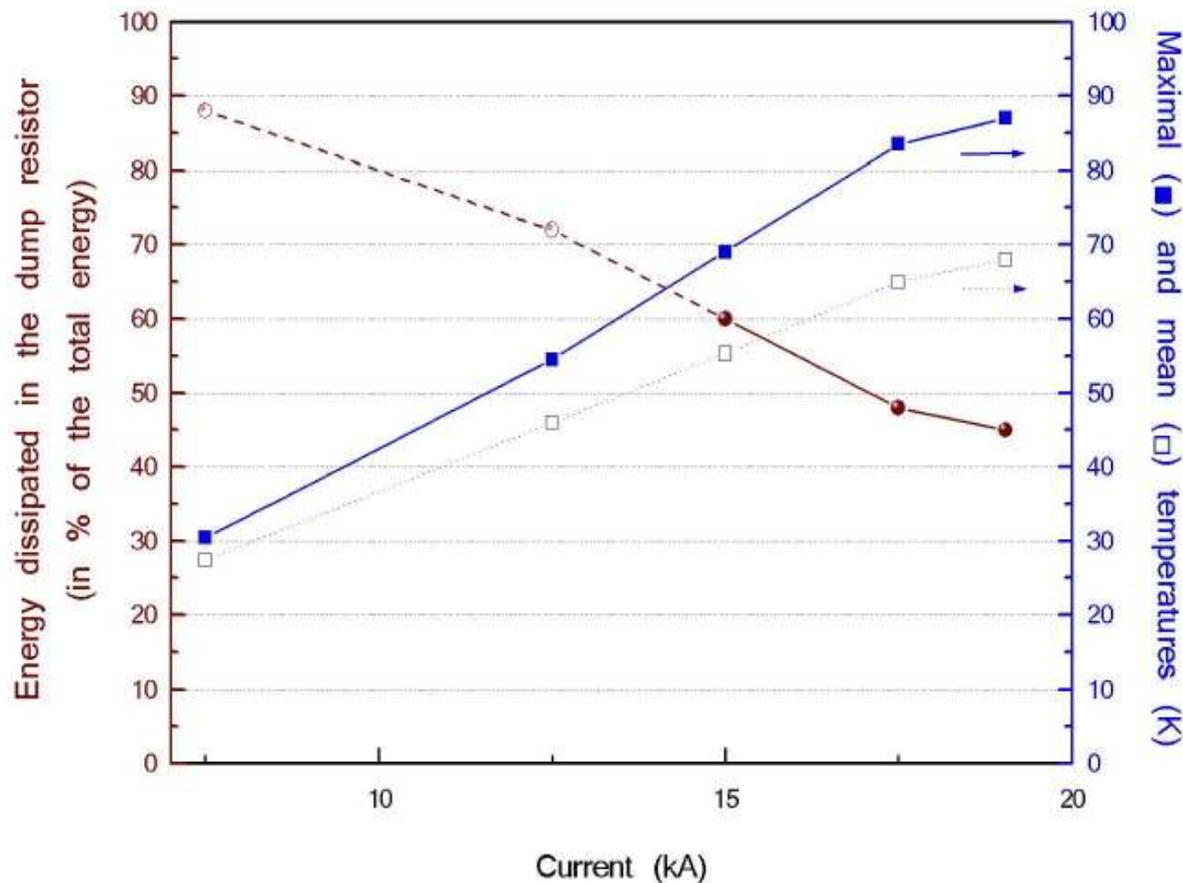
# Paramètres électriques

Inductance de l'aimant en fonction du courant



- Isolation bobine/masse > 50 M $\Omega$  @ 2.2 kV
- L'inductance apparente de la bobine décroît lorsque le courant croît (saturation du blindage)
- Résistance de chaque jonction entre 0.7 et 1.6 n $\Omega$

# Décharge rapide



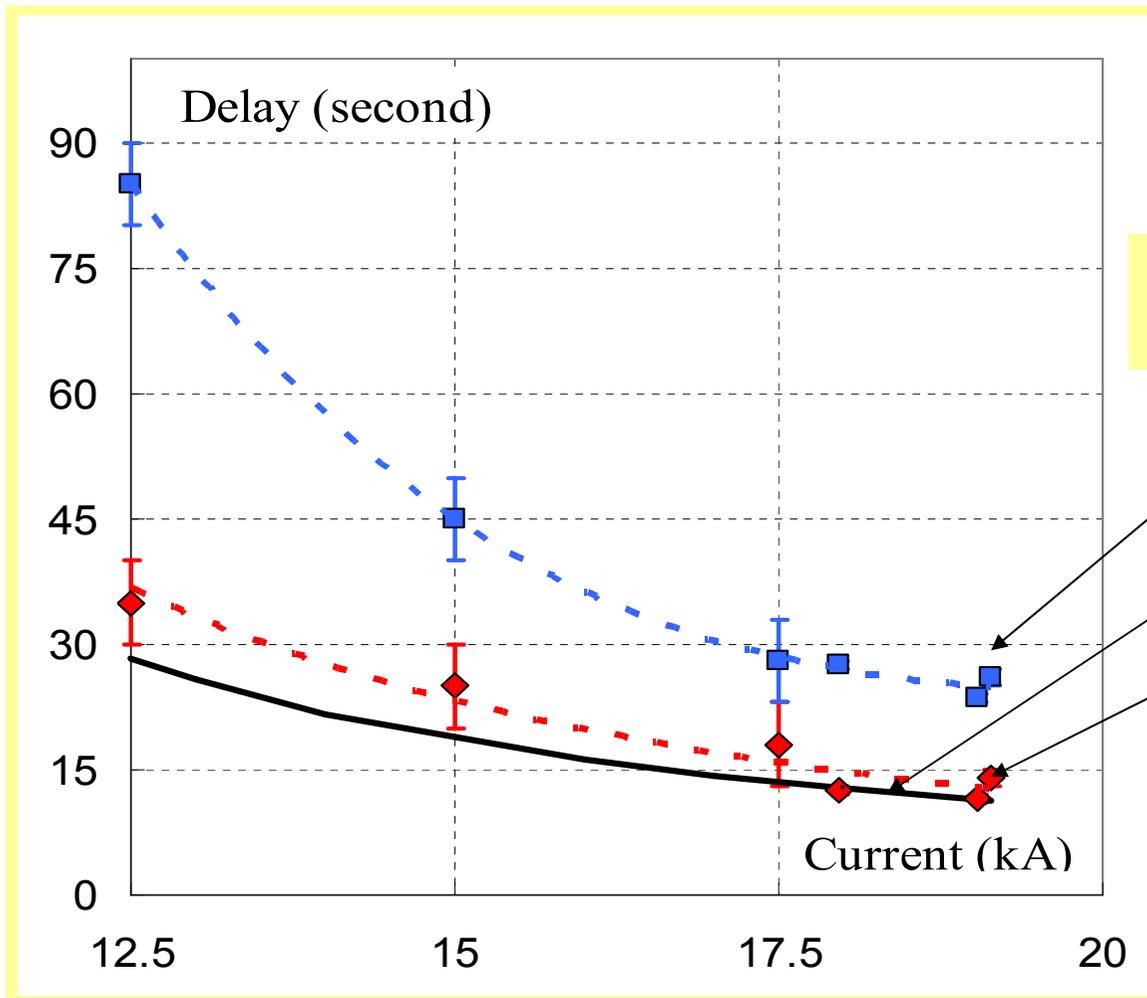
Pas de transition naturelle, mais effet de quench-back au dessus de 7,5 kA

Au courant nominal:

- Tmax 85 K
- 45 % de l'énergie stockée est extraite



# Délai pour le quench-back



Délai déduit des mesures de température

CB+/-2

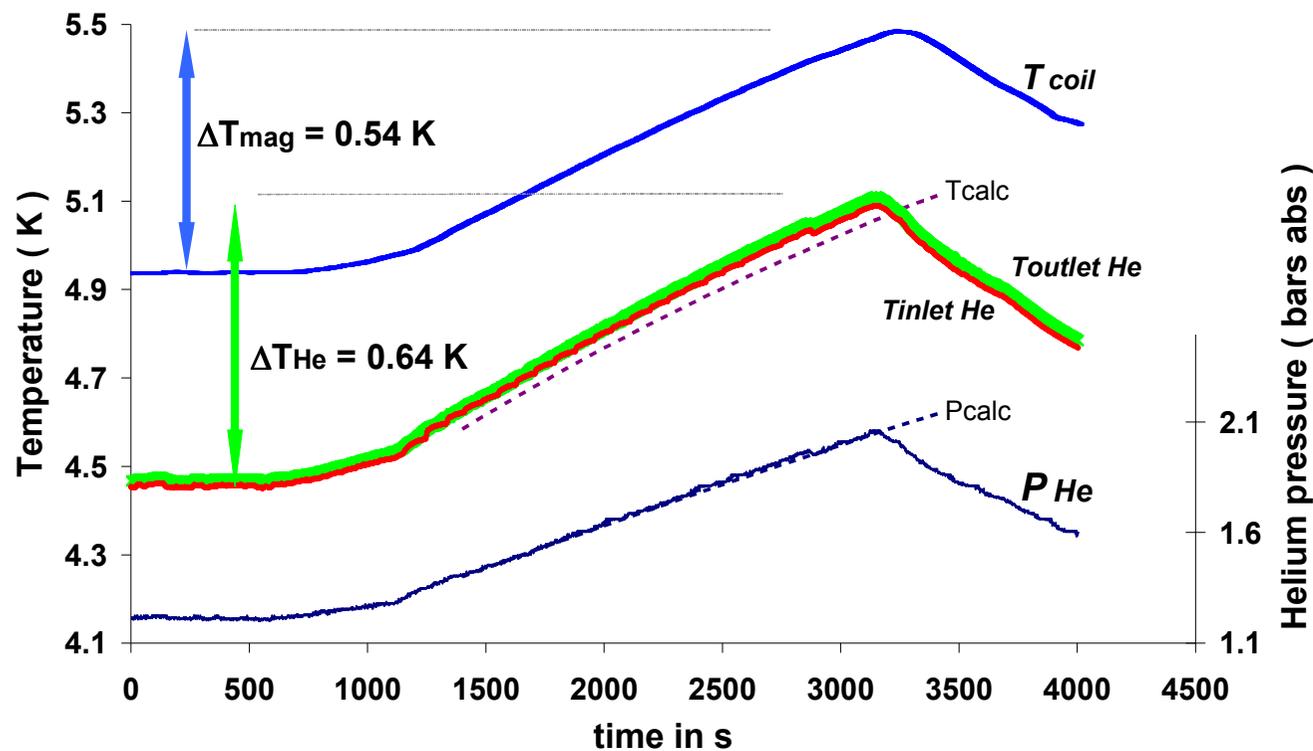
Calculs par E.F.

CBO



# Stabilité de la bobine

P and T increases 2<sup>nd</sup> November 2006



- $B_0 = 4\ T$
  - Température de current sharing calculée: **6.44 K**
  - Au moins 0.6 K de marge de température à 4 T
- (T et P calculés pour **226 W** de pertes totales)



# Descente de la bobine en caverne (28/02/07)



Début de la descente

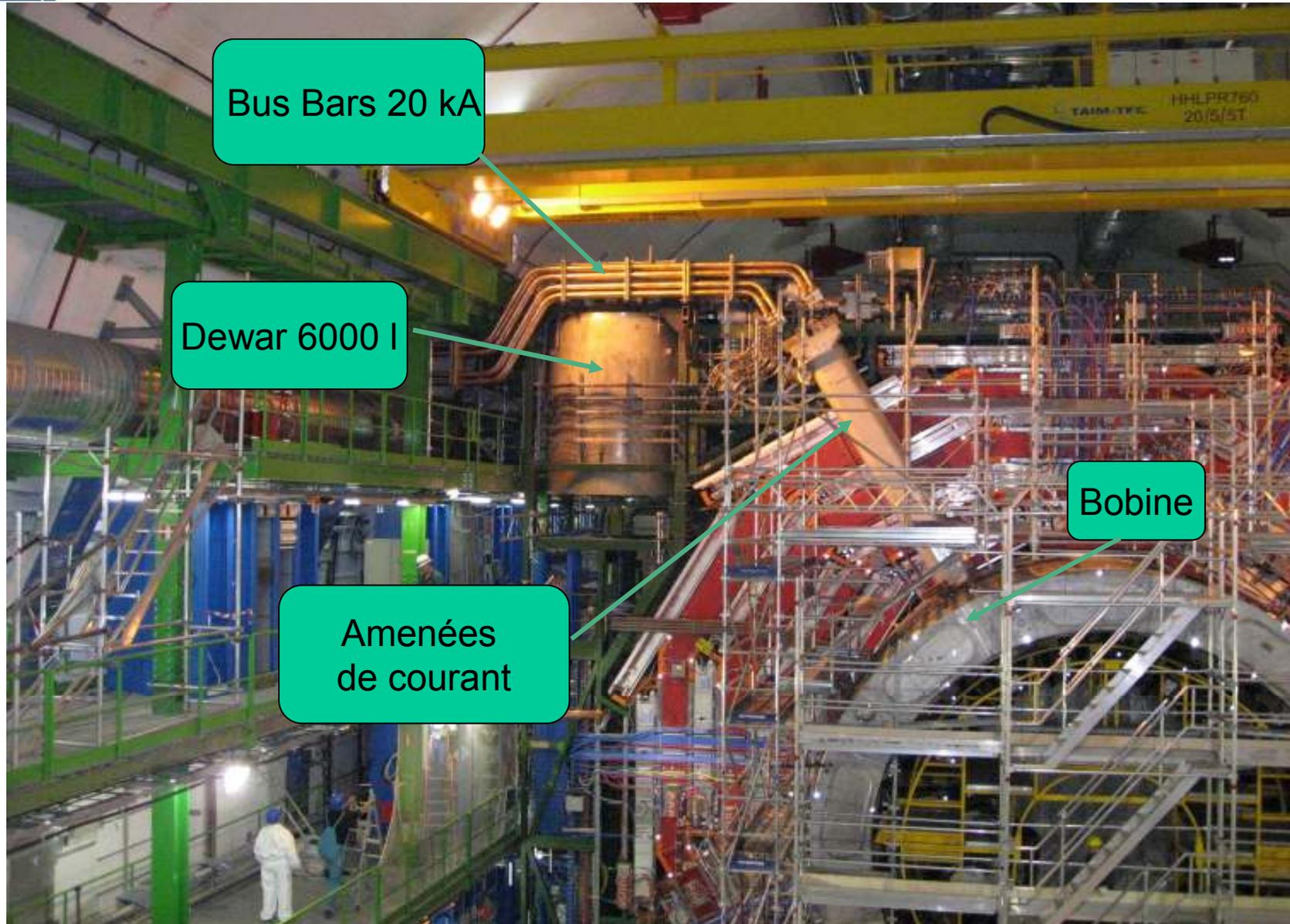


YB0 landing in the CMS experiment hall

Atterrissage en caverne ....  
10 h après



# Le remontage de la bobine en caverne est terminé





# Plan

1. Introduction
2. Conception, montage et tests du système magnétique ATLAS
  - 2.1 L'ensemble du système magnétique
  - 2.2 Le solénoïde central CS
  - 2.3 Le toroïde barrel BT
  - 2.4 Les toroïdes d'extrémité EC5
3. Conception, montage et tests de l'aimant CMS
  - 3.1 Conception et montage
  - 3.2 Quelques résultats expérimentaux
- 4. Situation à ce jour**
5. Conclusions



# Situation à ce jour

- **ATLAS**

- » tous les aimants ont été testés
  - au nominal (CS, BT) avec des résultats satisfaisants
  - à courant réduit (ECT)
- » ils sont installés en caverne, en position finale
- » le refroidissement de l'ensemble BT + ECT est en cours
- » le test électrique est prévu à partir de mi-mai : chaque ECT séparément, puis l'ensemble BT + ECT en série, puis l'ensemble BT+ECT et CS

- **CMS**

- » les tests en surface ont permis d'atteindre le champ nominal sans problème
- » l'aimant est complètement réinstallé en caverne, et est maintenant à 4 K
- » les tests électriques sont prévus
  - à bas courant (blindage ouvert) dans les semaines qui viennent
  - au courant nominal (blindage fermé) en juin



# Plan

1. Introduction
2. Conception, montage et tests du système magnétique ATLAS
  - 2.1 L'ensemble du système magnétique
  - 2.2 Le solénoïde central CS
  - 2.3 Le toroïde barrel BT
  - 2.4 Les toroïdes d'extrémité EC5
3. Conception, montage et tests de l'aimant CMS
  - 3.1 Conception et montage
  - 3.2 Quelques résultats expérimentaux
4. Situation à ce jour
- 5. Conclusions**



## Conclusions

- Après de nombreuses années d'études, de suivi de réalisation, d'assemblage, de tests, les aimants des détecteurs ATLAS et CMS sont maintenant **quasiment prêts** pour le démarrage de la physique sur le LHC
- Tous les tests cryomagnétiques faits à ce jour sur les aimants ATLAS et CMS, ont donné des **résultats conformes** aux performances demandées. En particulier, la configuration de test en surface de l'aimant CMS est **similaire** à celle en caverne
- La reprise des tests des aimants en caverne au **2<sup>e</sup> trimestre 2008** devrait confirmer la justesse des choix technologiques faits et la bonne qualité de la réalisation de ces aimants, qui devraient rester pour de nombreuses années, les **plus performants** dans leur configuration



# Remerciements

A vous,

et à H. Ten Kate, E. Baynham  
ainsi qu'à toute l'équipe de l'aimant CMS