



***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

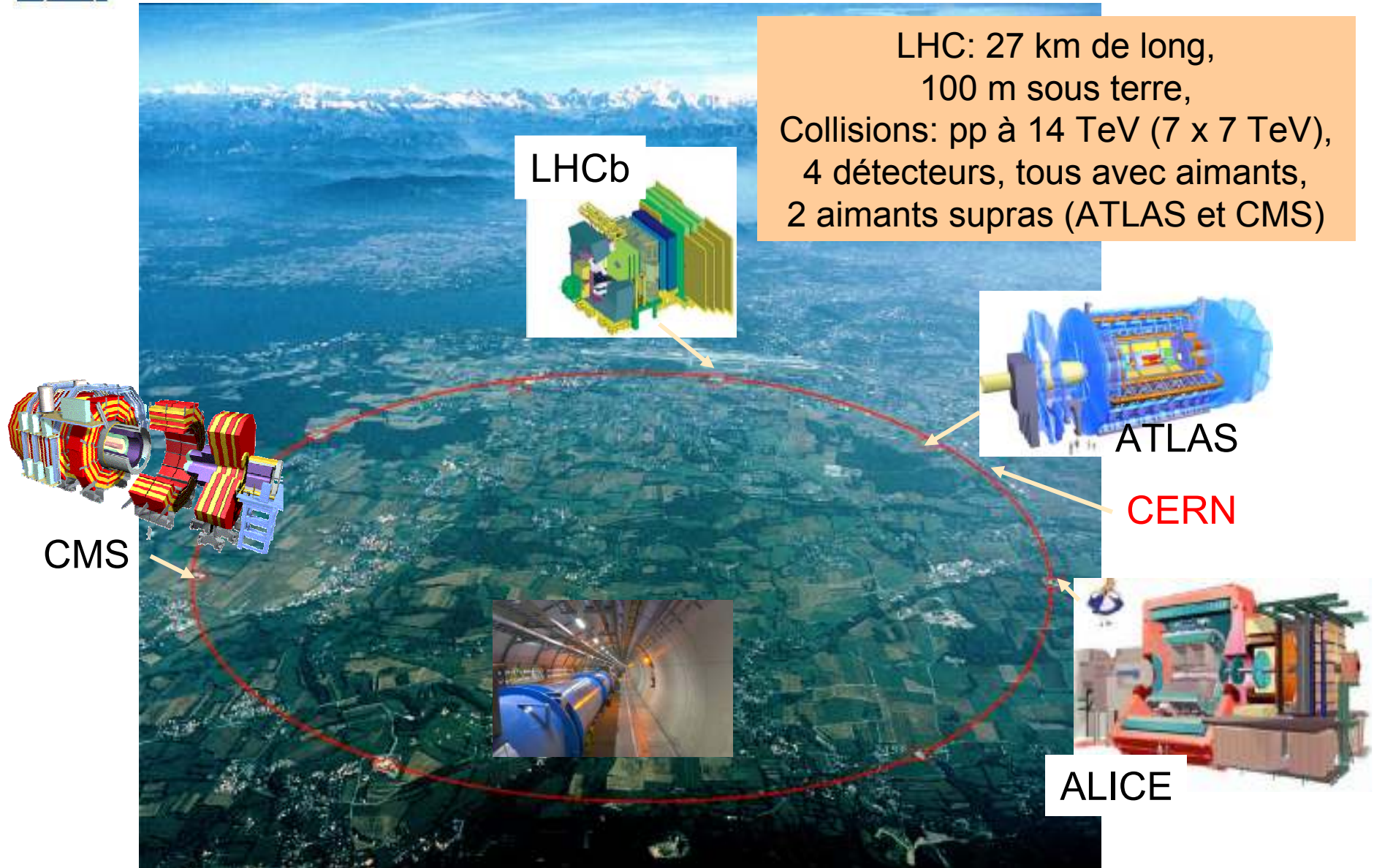
3.2 Quelques résultats expérimentaux

4. Situation à ce jour

5. Conclusions

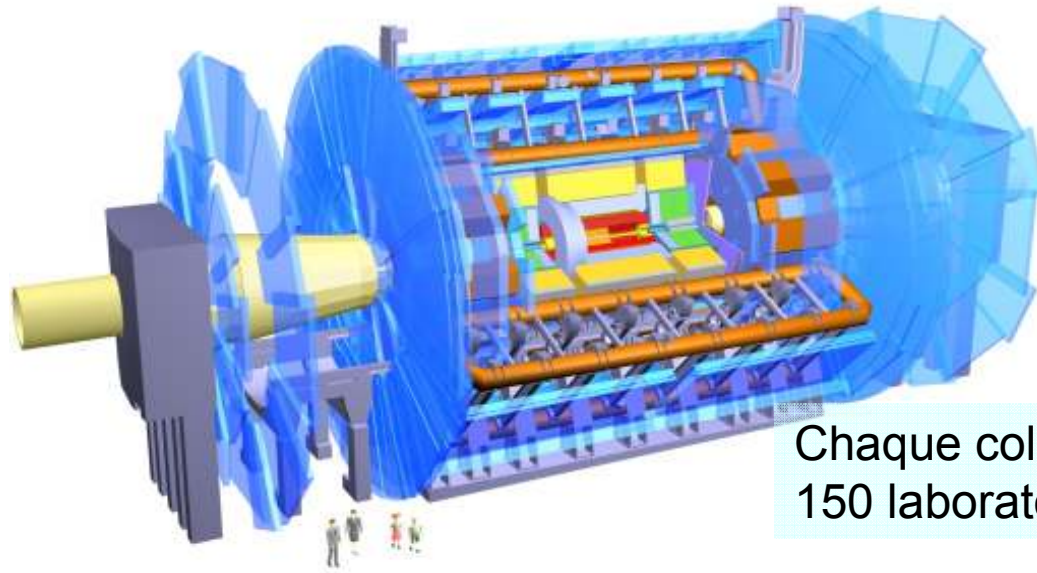


Demain, le LHC





Les détecteurs ATLAS et CMS



ATLAS:

Longueur = 46 m

Diamètre = 25 m

Poids = 7000 t

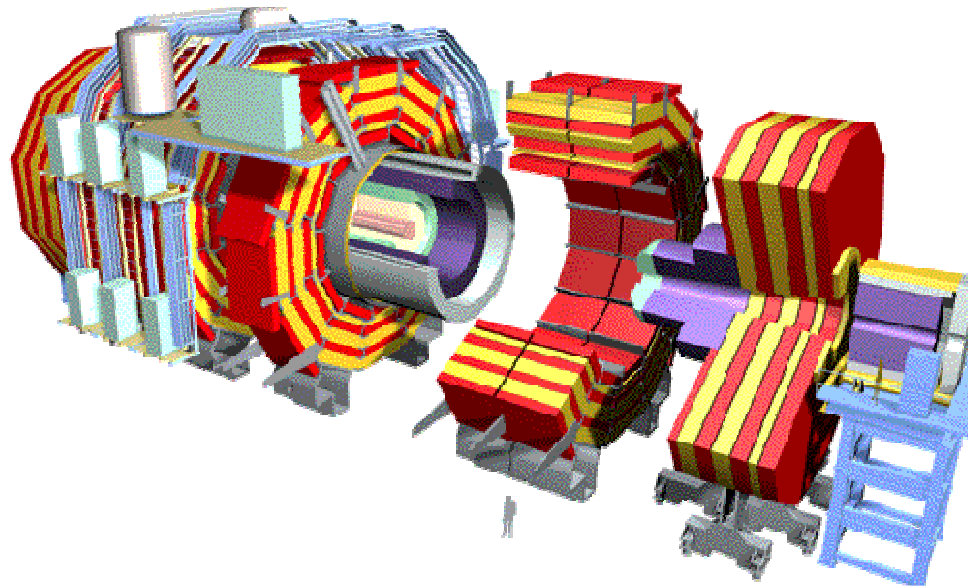
Chaque collaboration = 1500 chercheurs
150 laboratoires dans ~ 35 pays

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

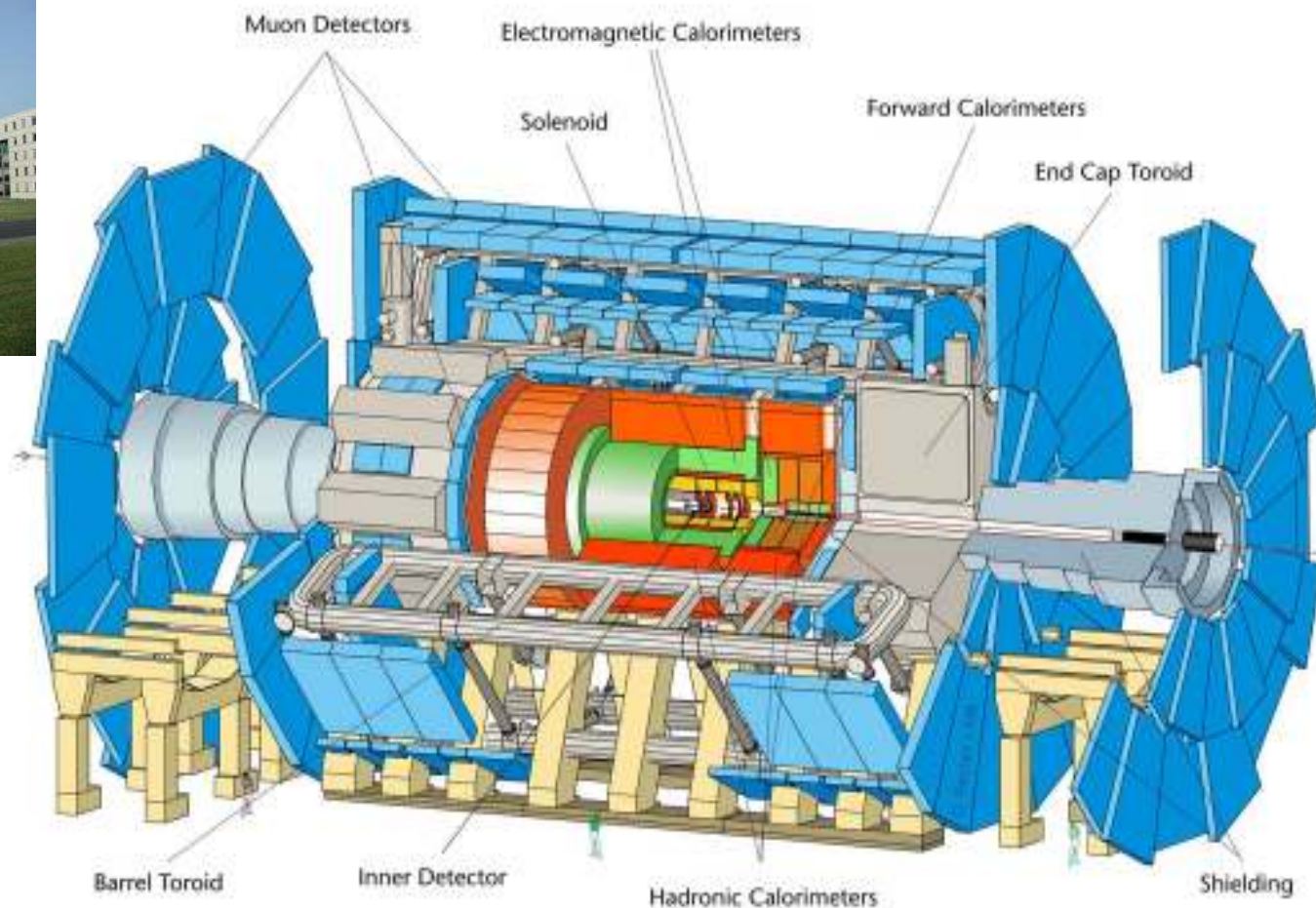


Plan

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



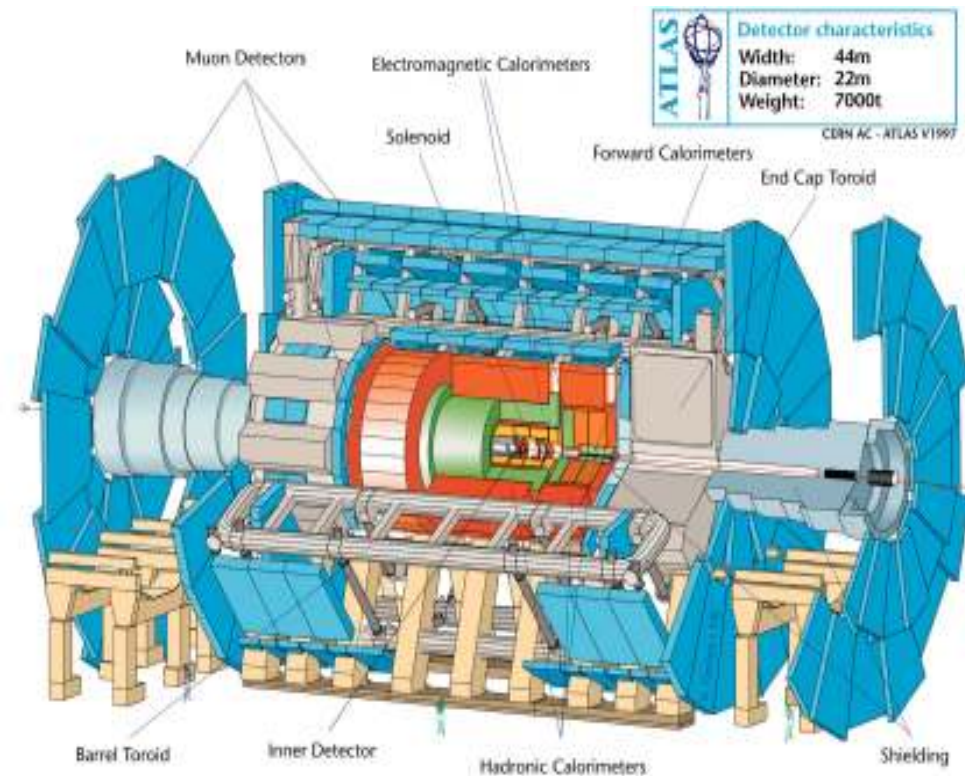
Le détecteur ATLAS



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

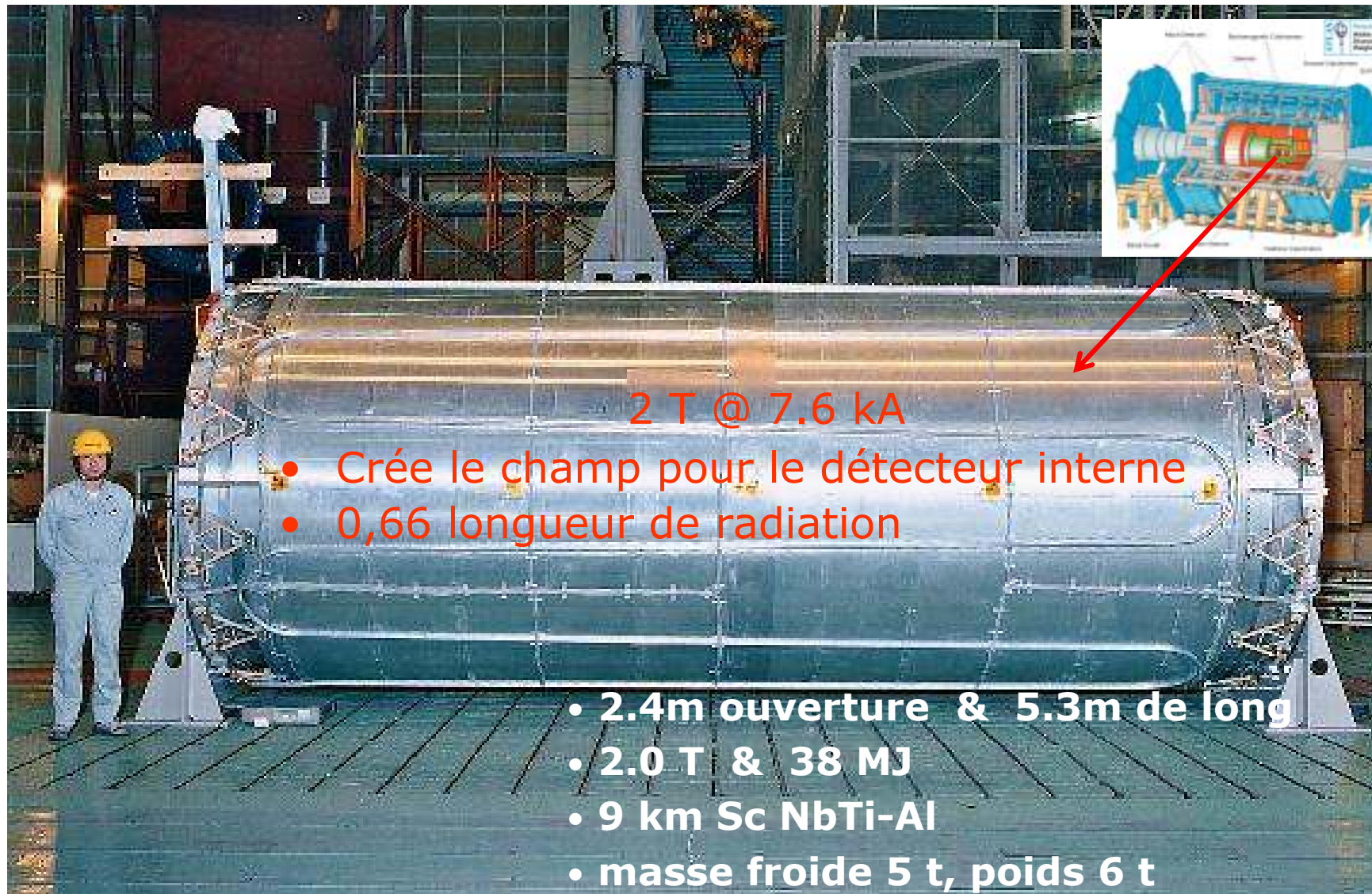
Les aimants supras d'ATLAS

- 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 m³**
- **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



2 T @ 7.6 kA

- Crée le champ pour le détecteur interne
- 0,66 longueur de radiation

- 2.4m ouverture & 5.3m de long
- 2.0 T & 38 MJ
- 9 km Sc NbTi-Al
- masse froide 5 t, poids 6 t

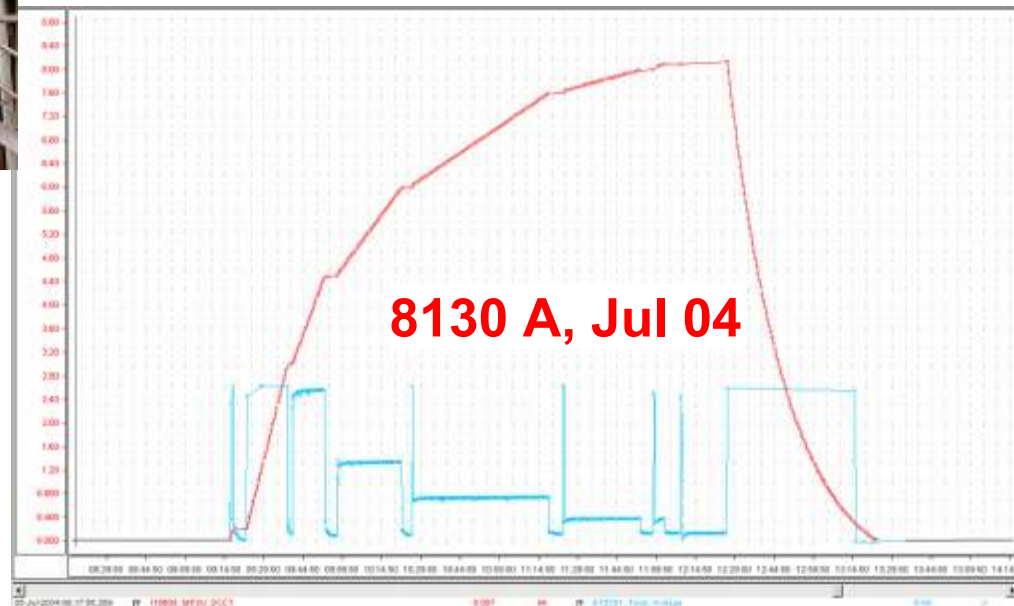
Intégration et tests du solénoïde central CS



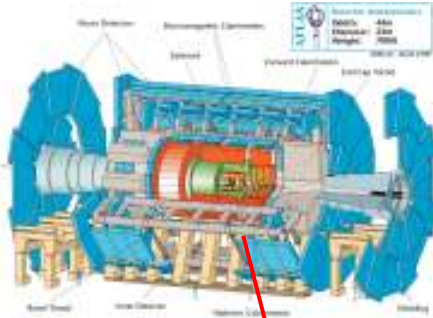
- Test au Japon avant envoi en 03
- Test en surface au CERN en été 04
- Installation en caverne en oct 04
- Re-testé en caverne en mai 06

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)

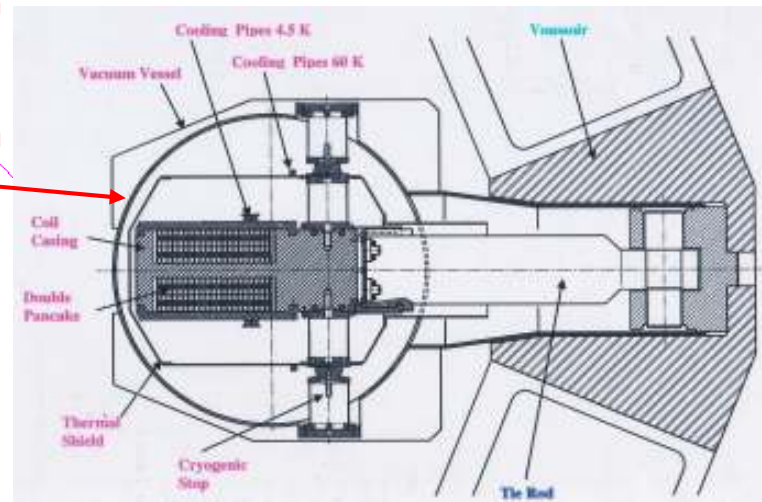
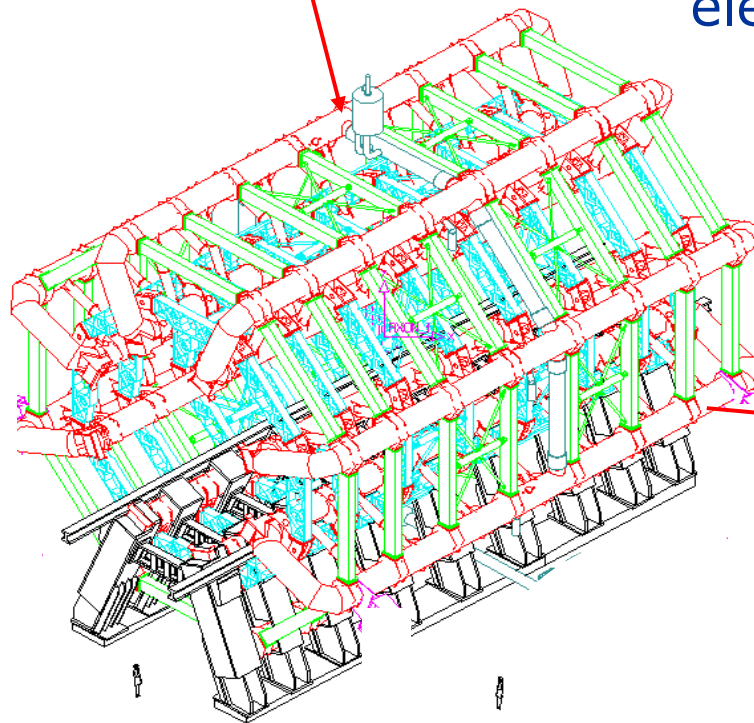


Structure



- 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



56 km de supraconducteur



16 double-galettes



8 boîtes à bobine



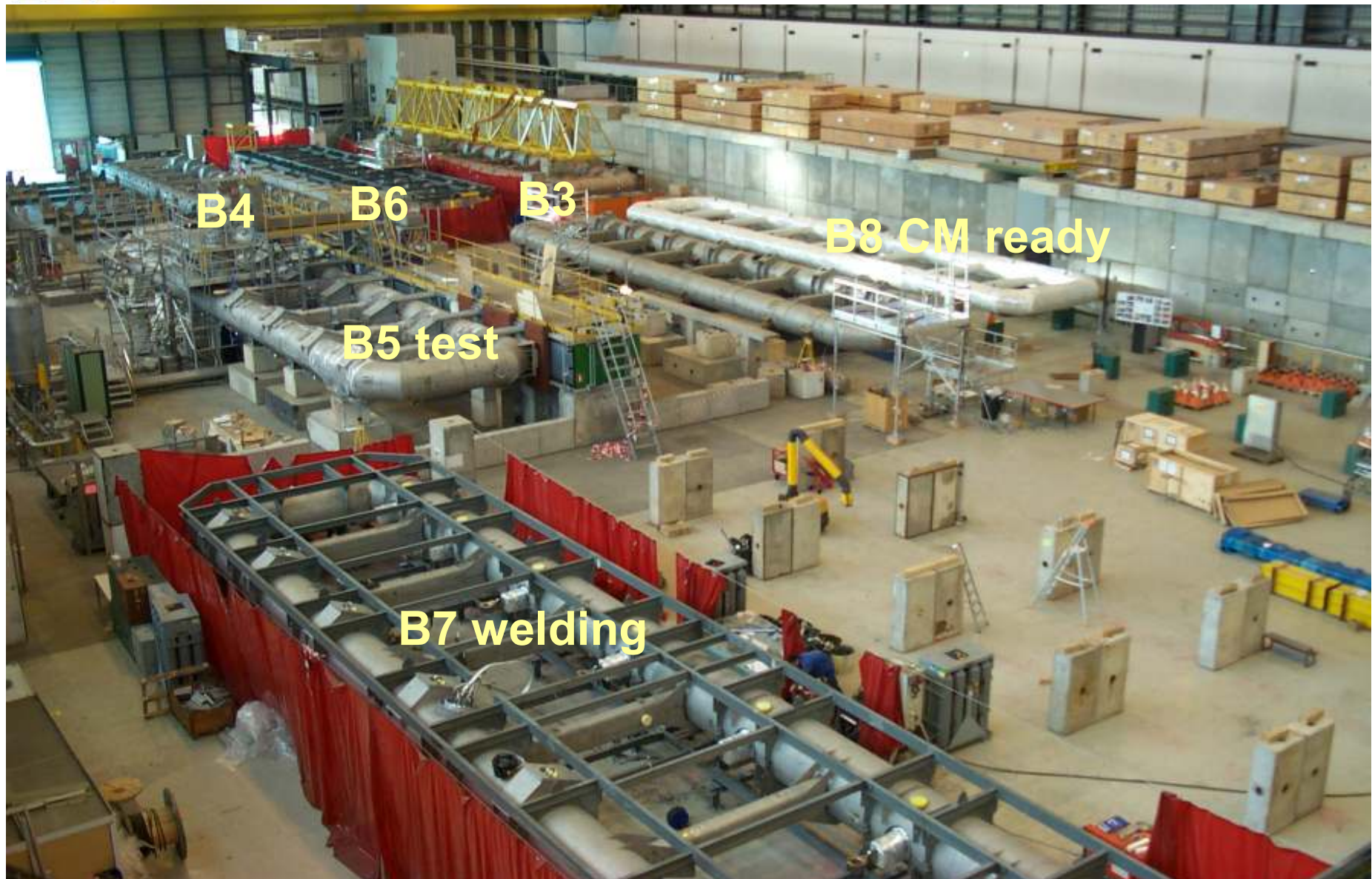
8 masses froides



8 enceintes à vide

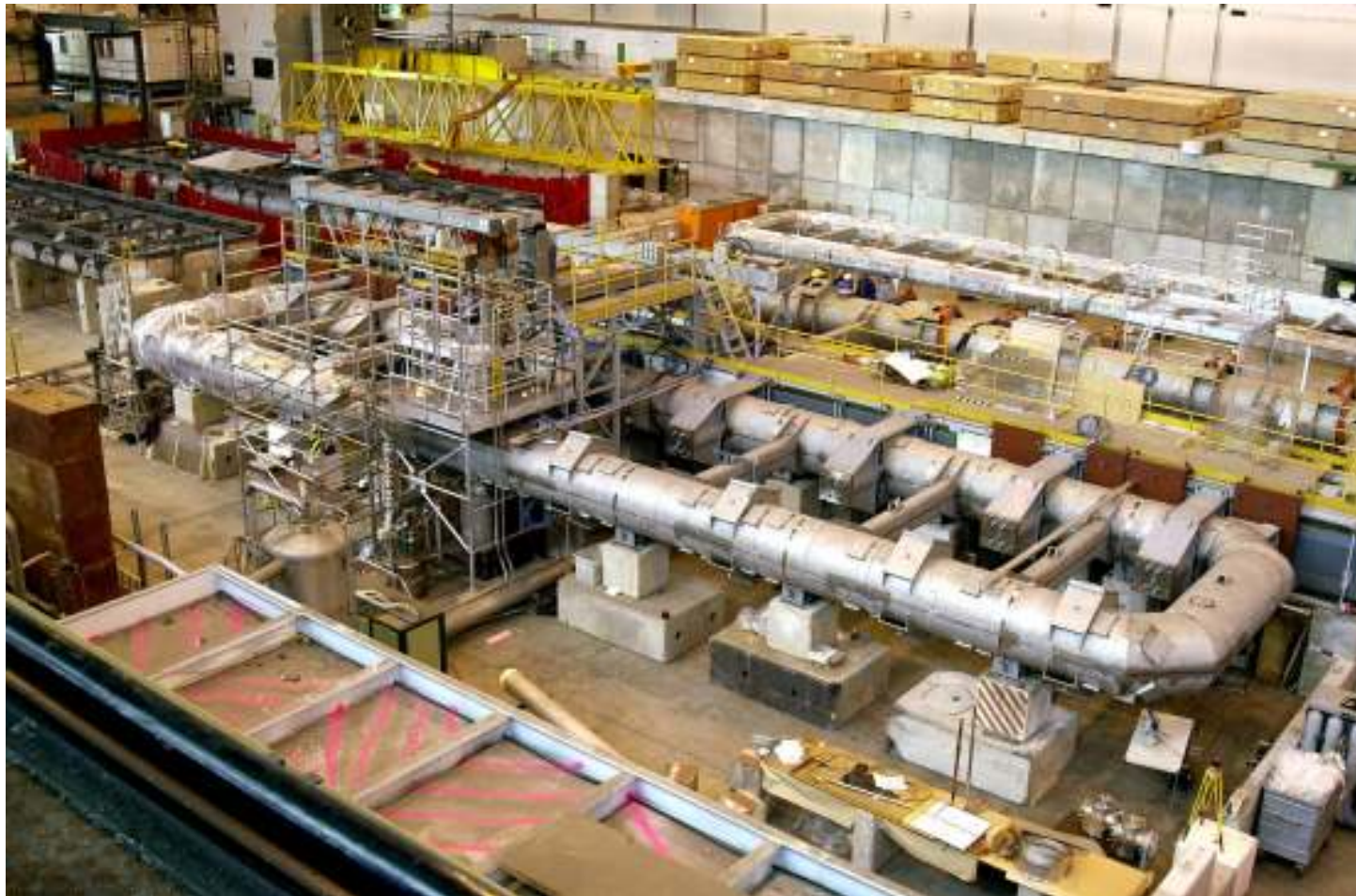


Intégration et tests en surface au CERN





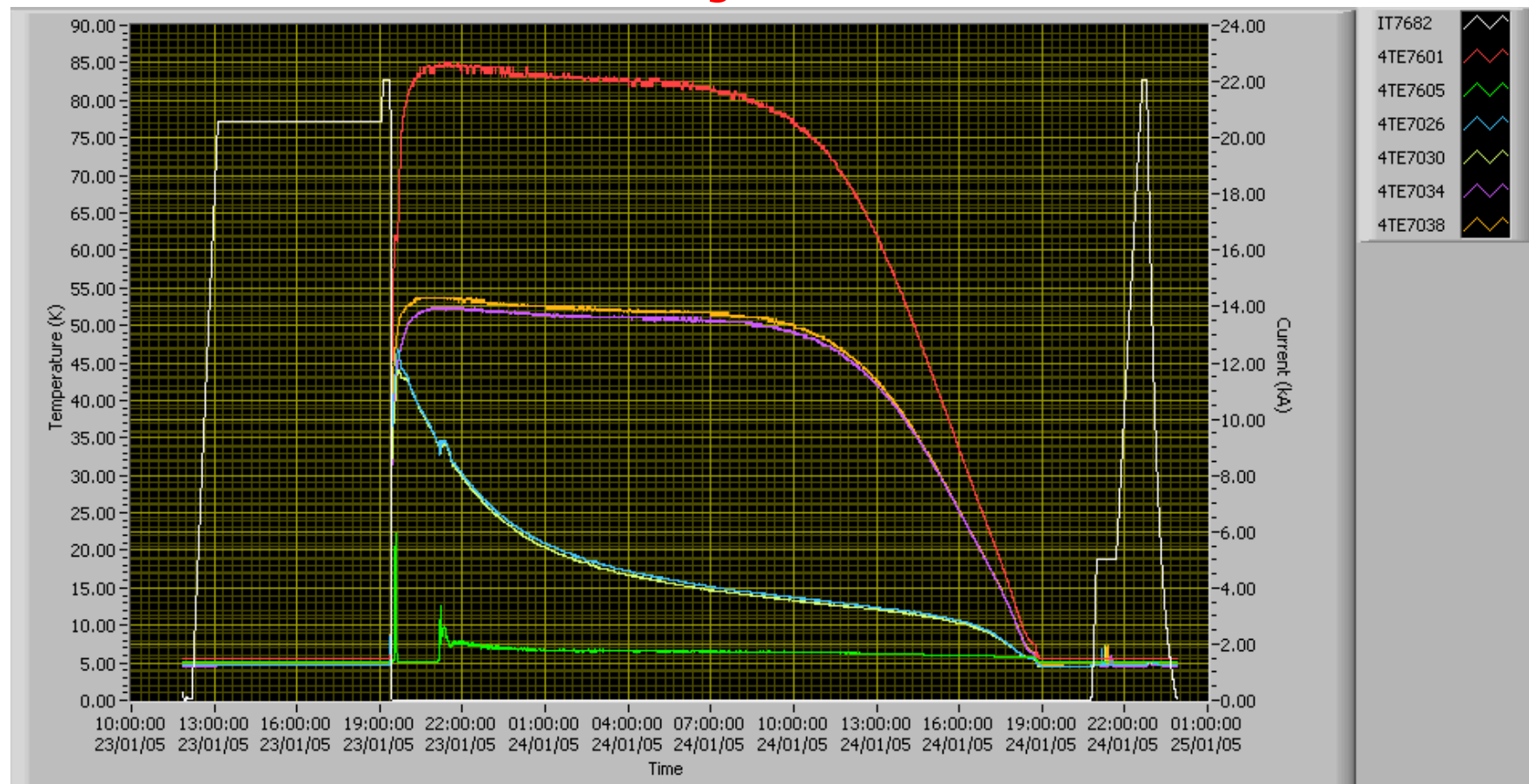
Test individuel de chaque bobine en surface





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





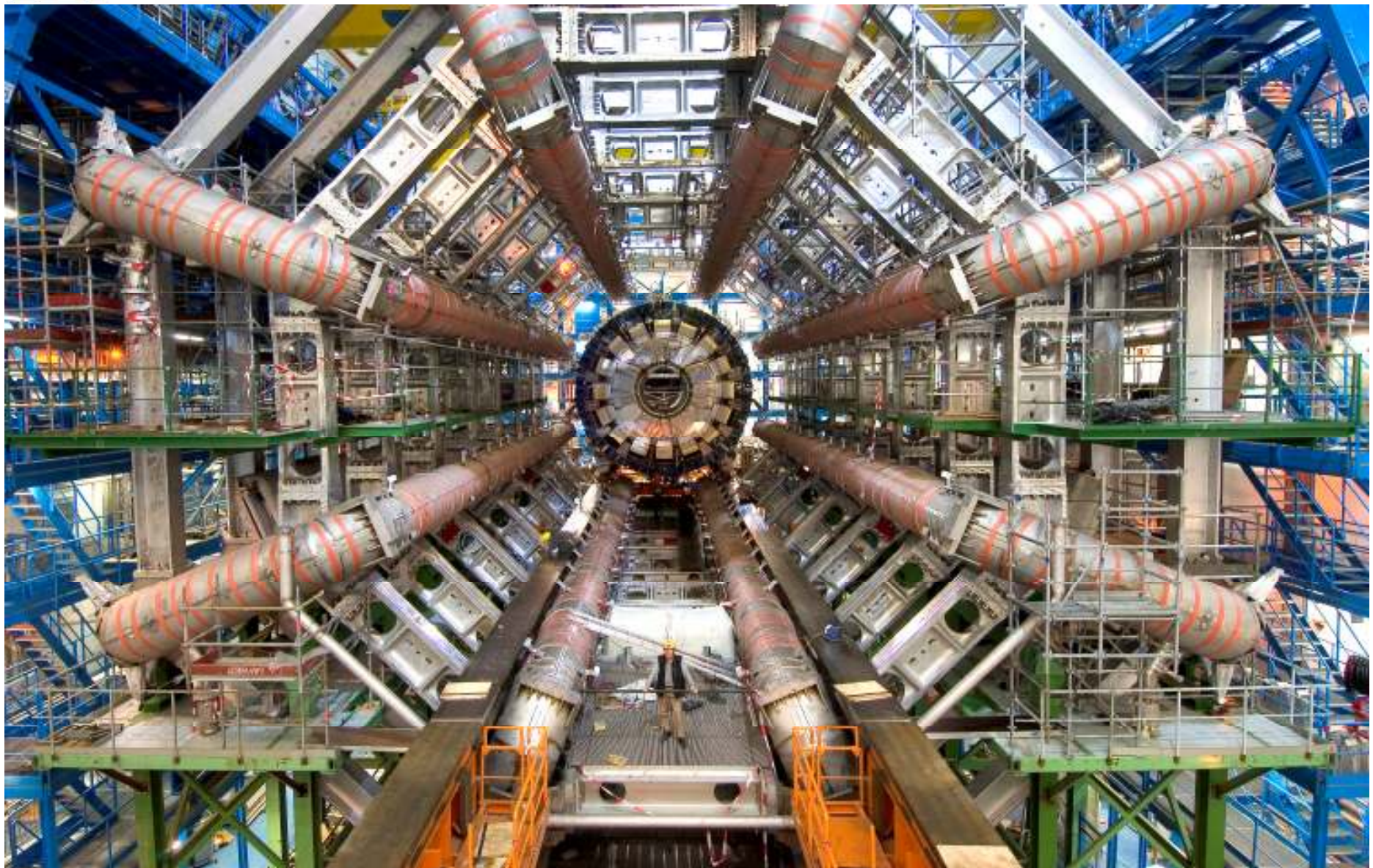
Assemblage mécanique du BT



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



Le toroïde barrel terminé (4 nov 05)



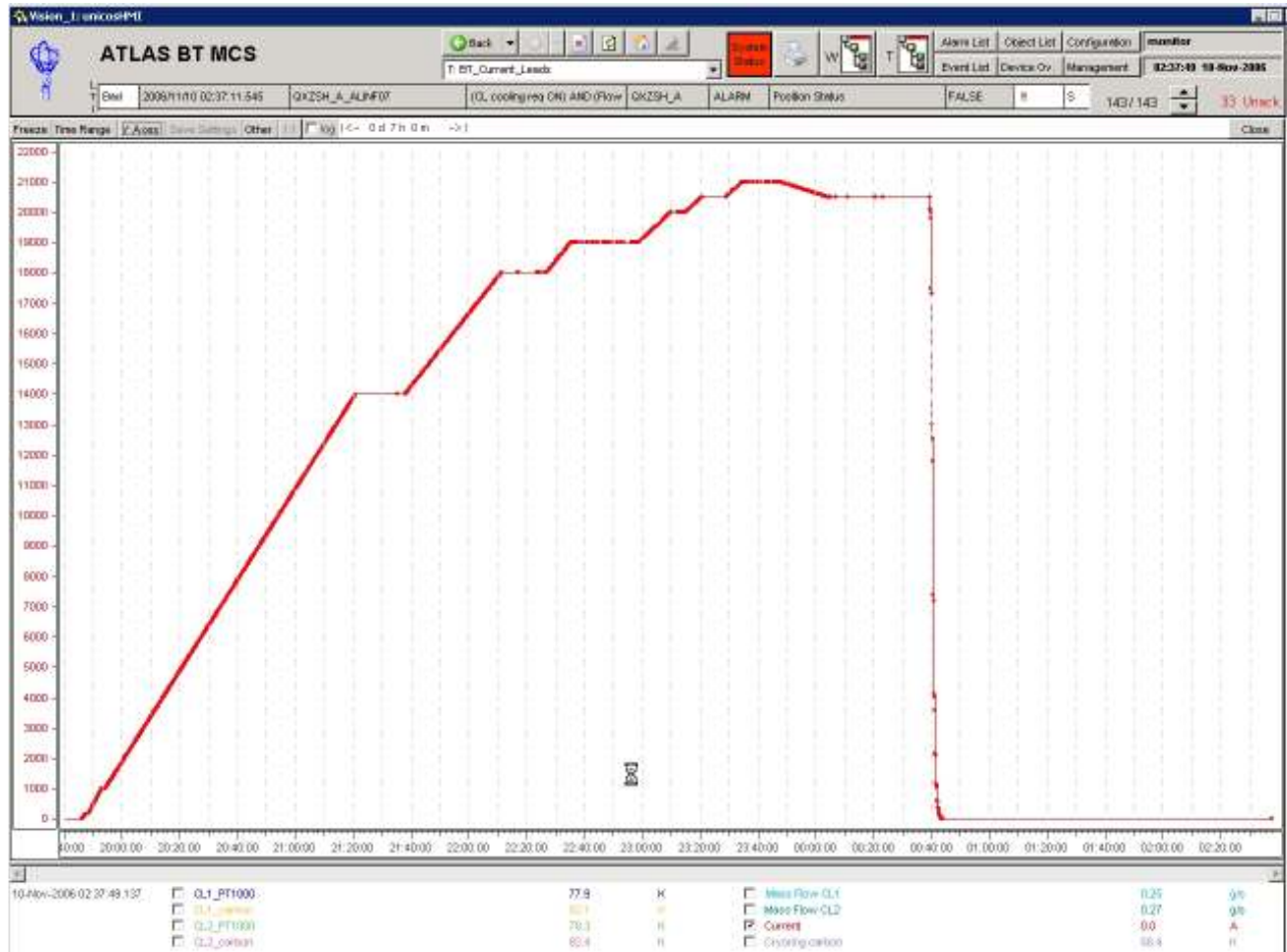
Les Journées Thématiques AFF-CCS,
CERN, Genève, Suisse

20

F. Kircher, 10 avril 2008



Tests du toroïde BT en caverne

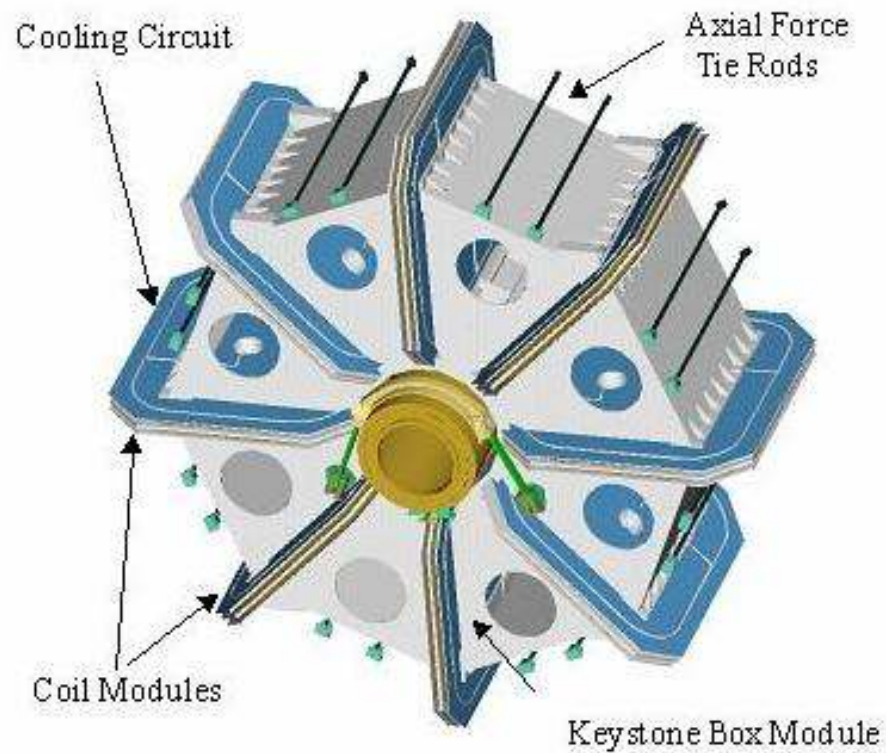


9 nov. 2005 :

- 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

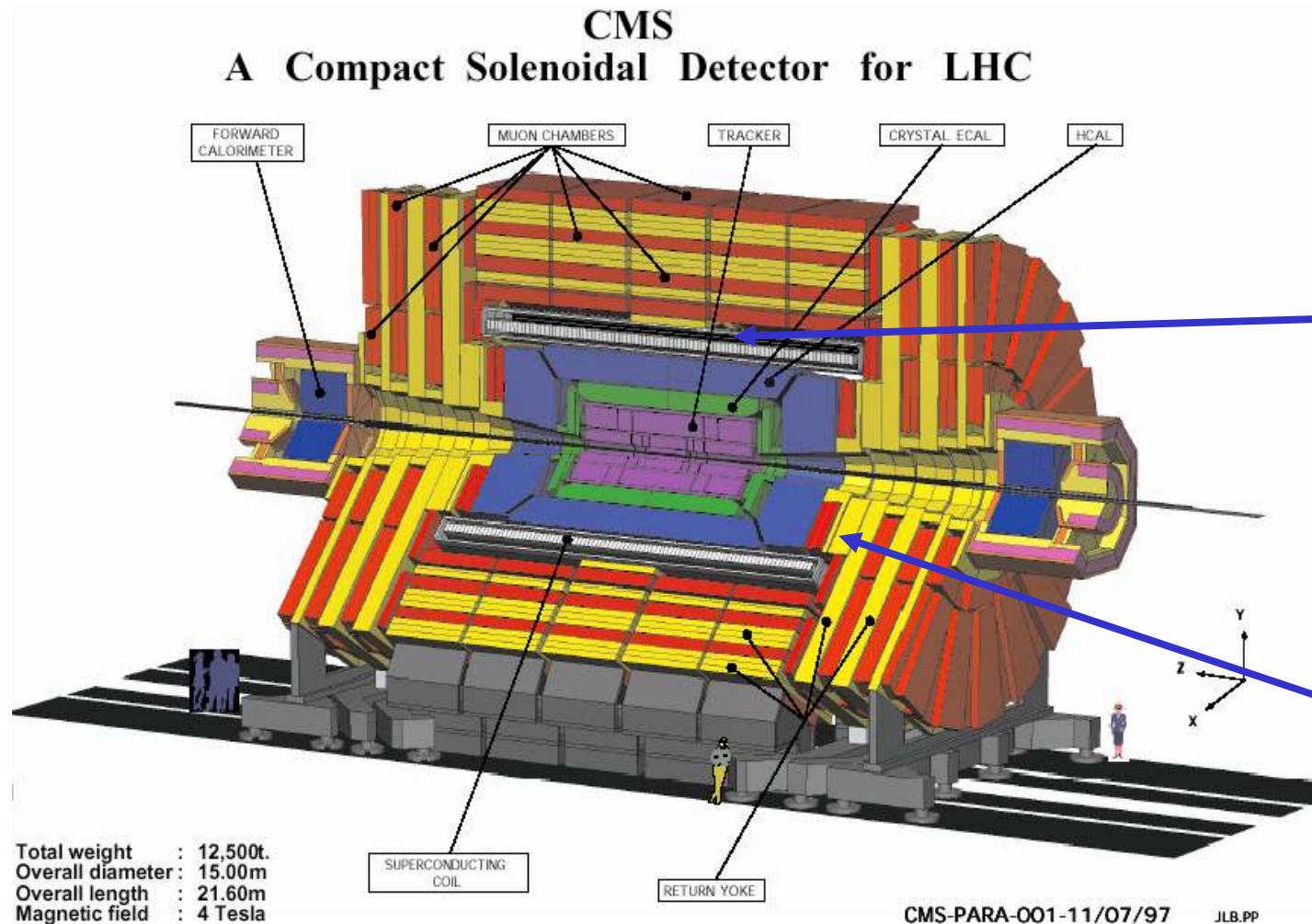


Plan

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

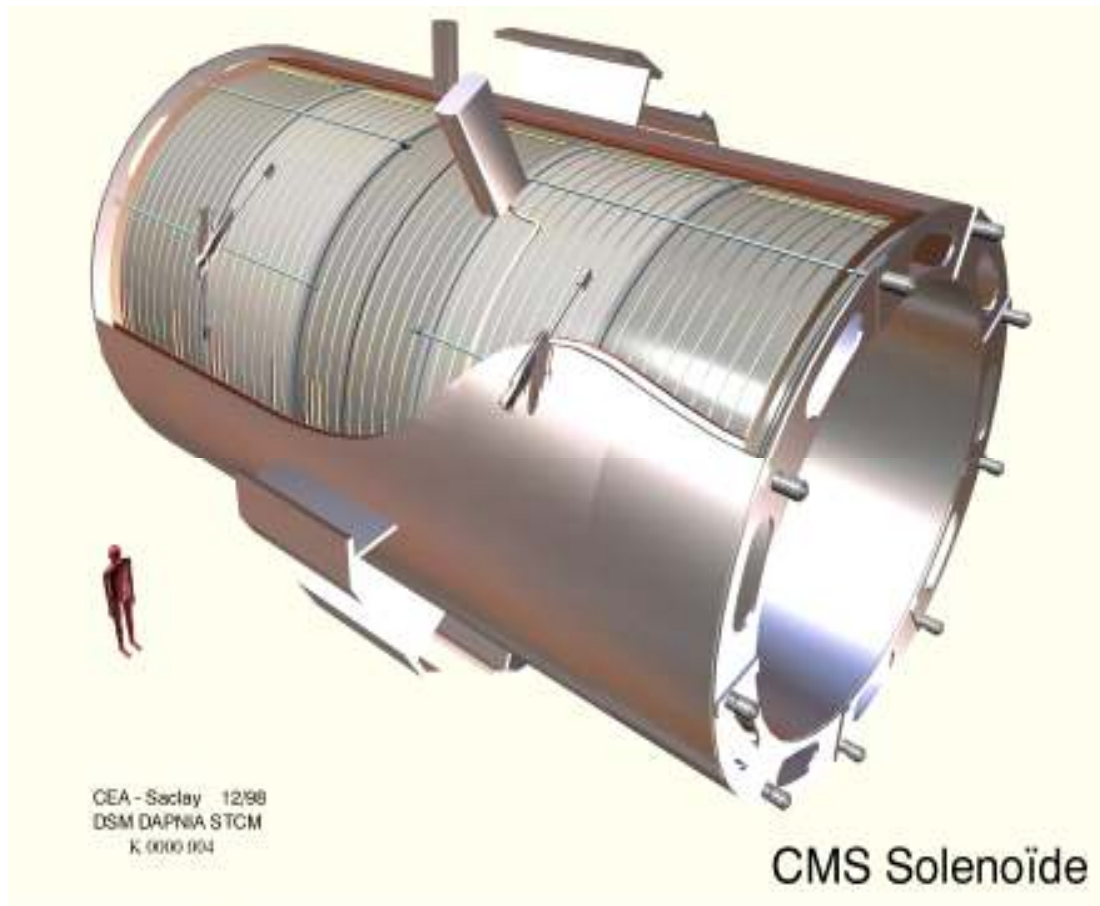
13 m de long

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

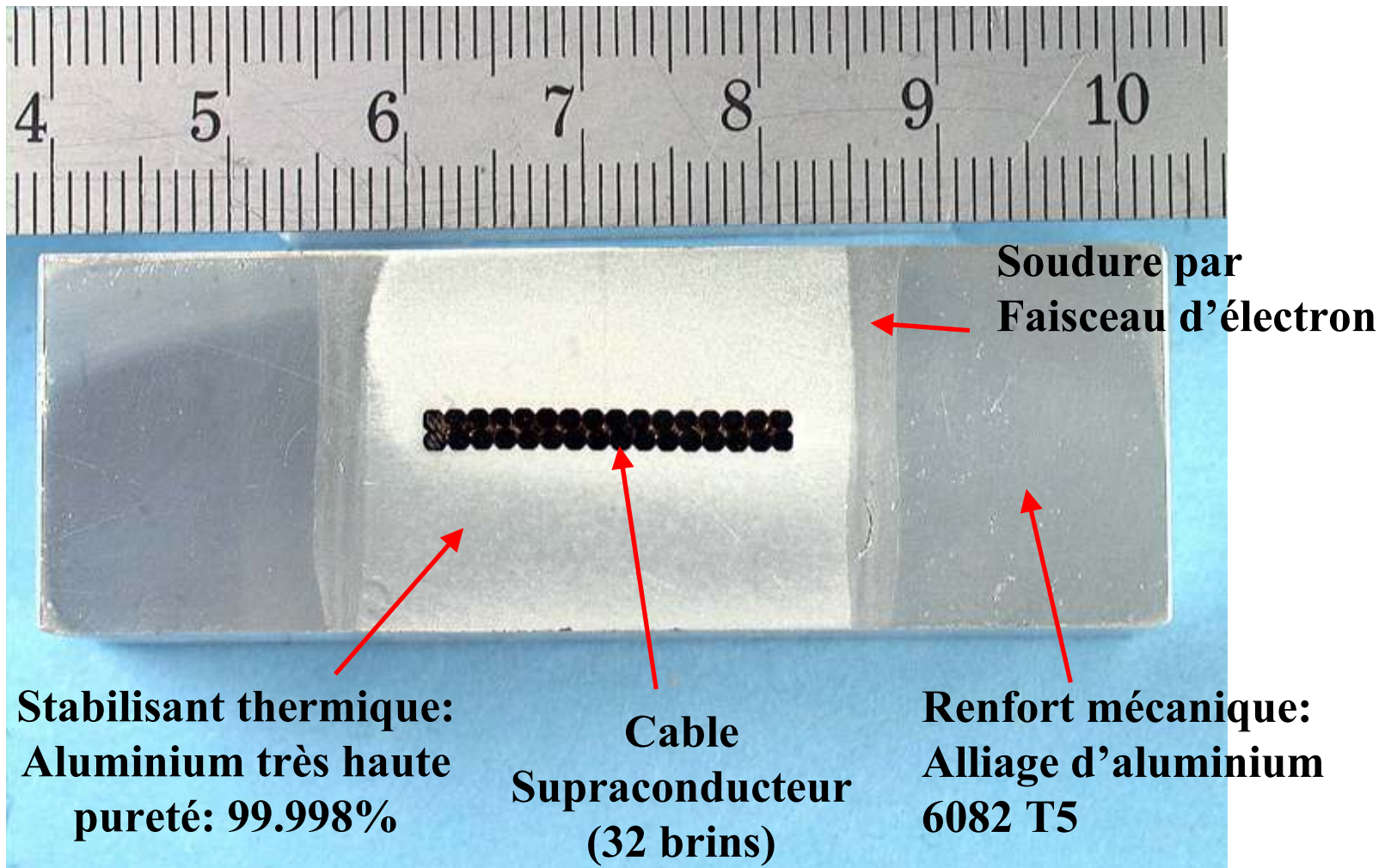


Quelques challenges de l'aimant CMS

- 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

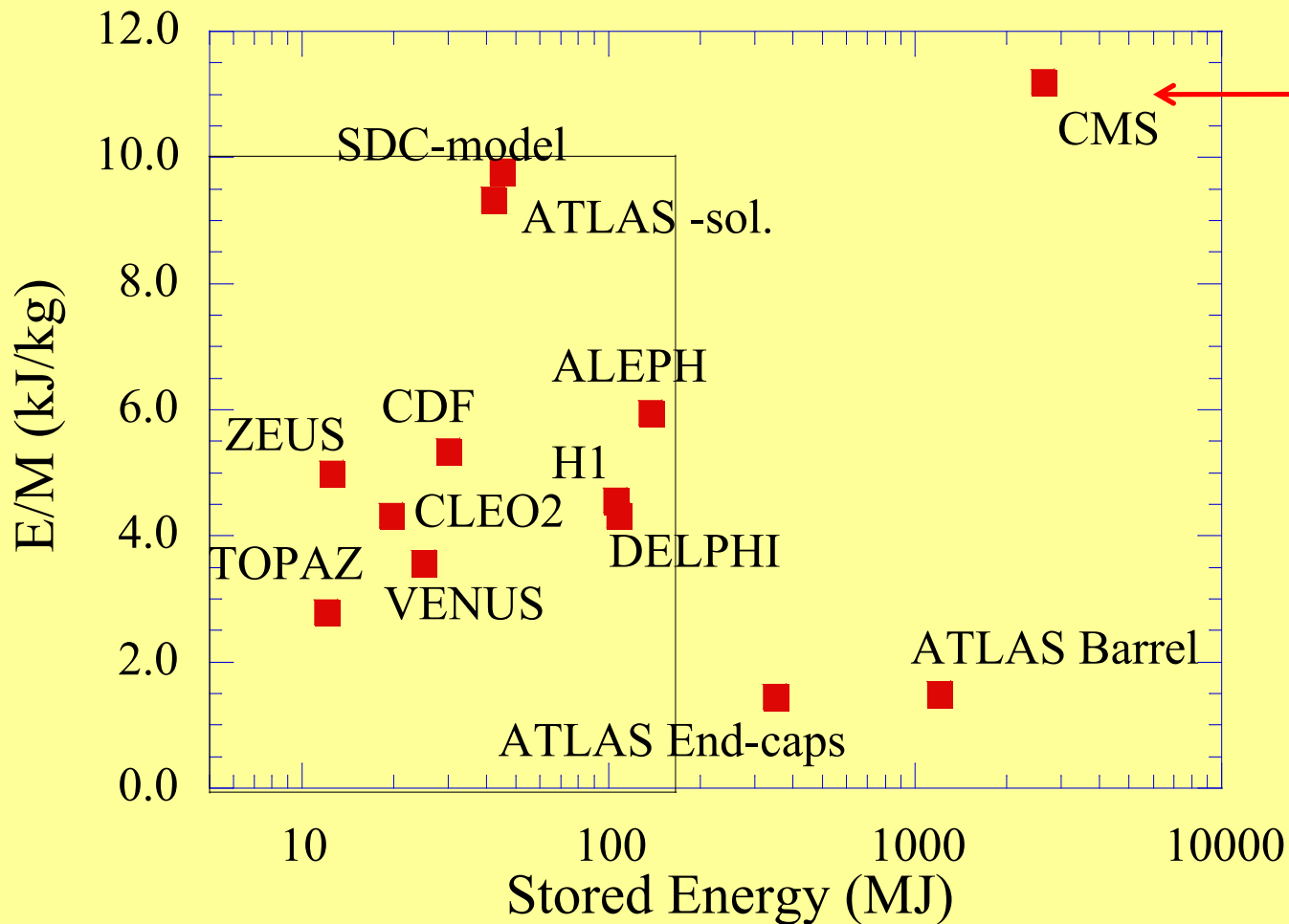


Le conducteur CMS





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



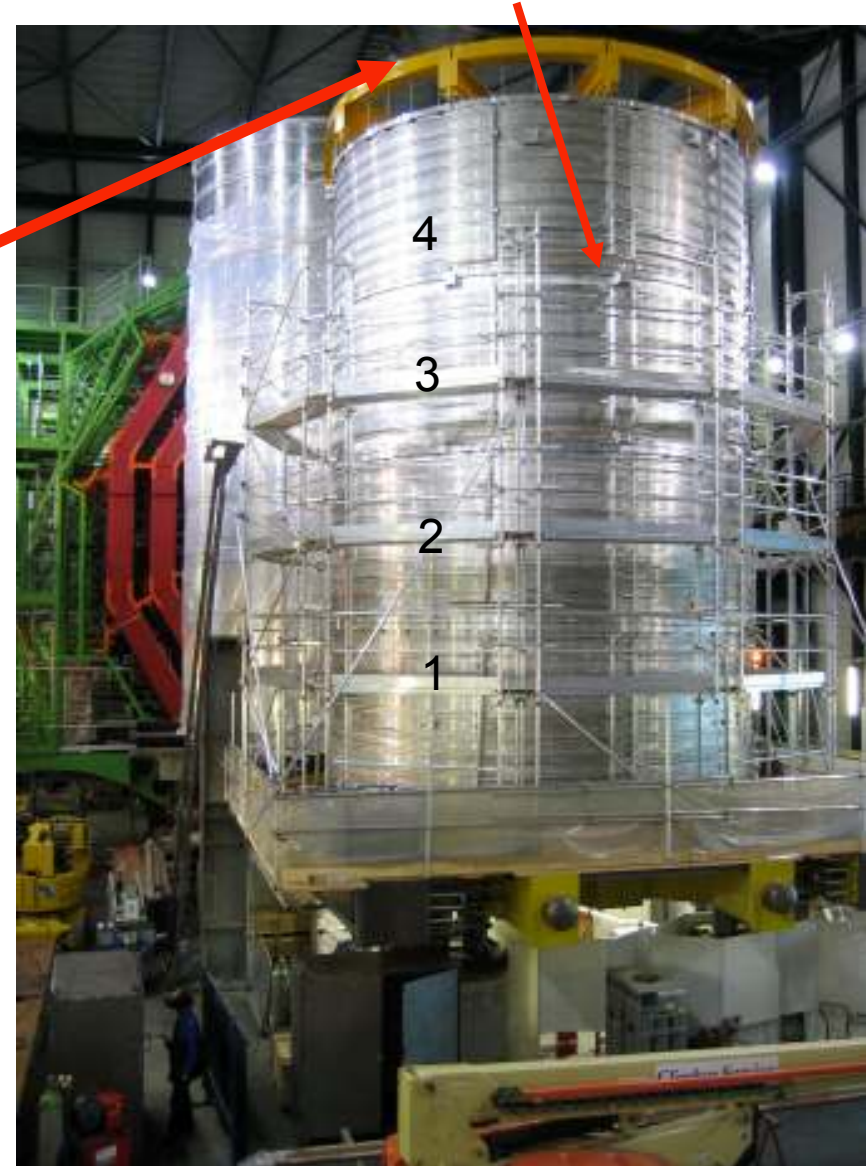
Bobinage CB+1



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



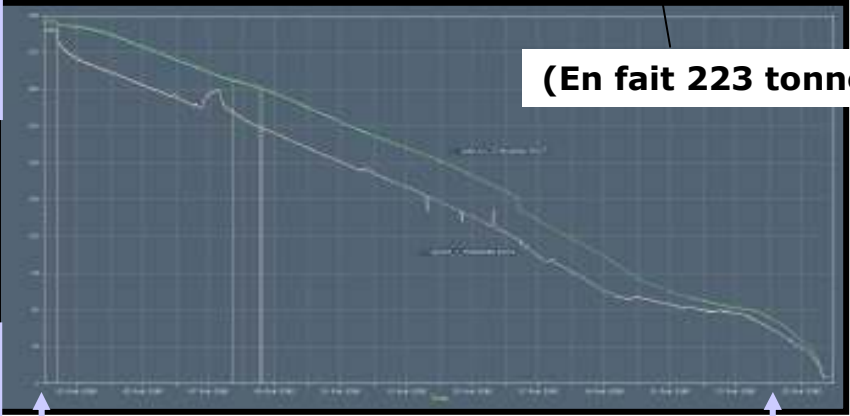
$\Delta T \leq 40^\circ$
 - Le circuit de gaz est refroidi par une boîte
 fente de refroidissement de pré-refroidissement par Li_2
 - On se donne 25 jours pour arriver à $4^\circ K$
 et espère de plus pour arriver à $4.5^\circ K$ (total = 3 jours)
 - Masse à refroidir : Alu $R_c = 230$, $R_s = 2075$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

300 K

4 K

3 février

(En fait 223 tonnes)

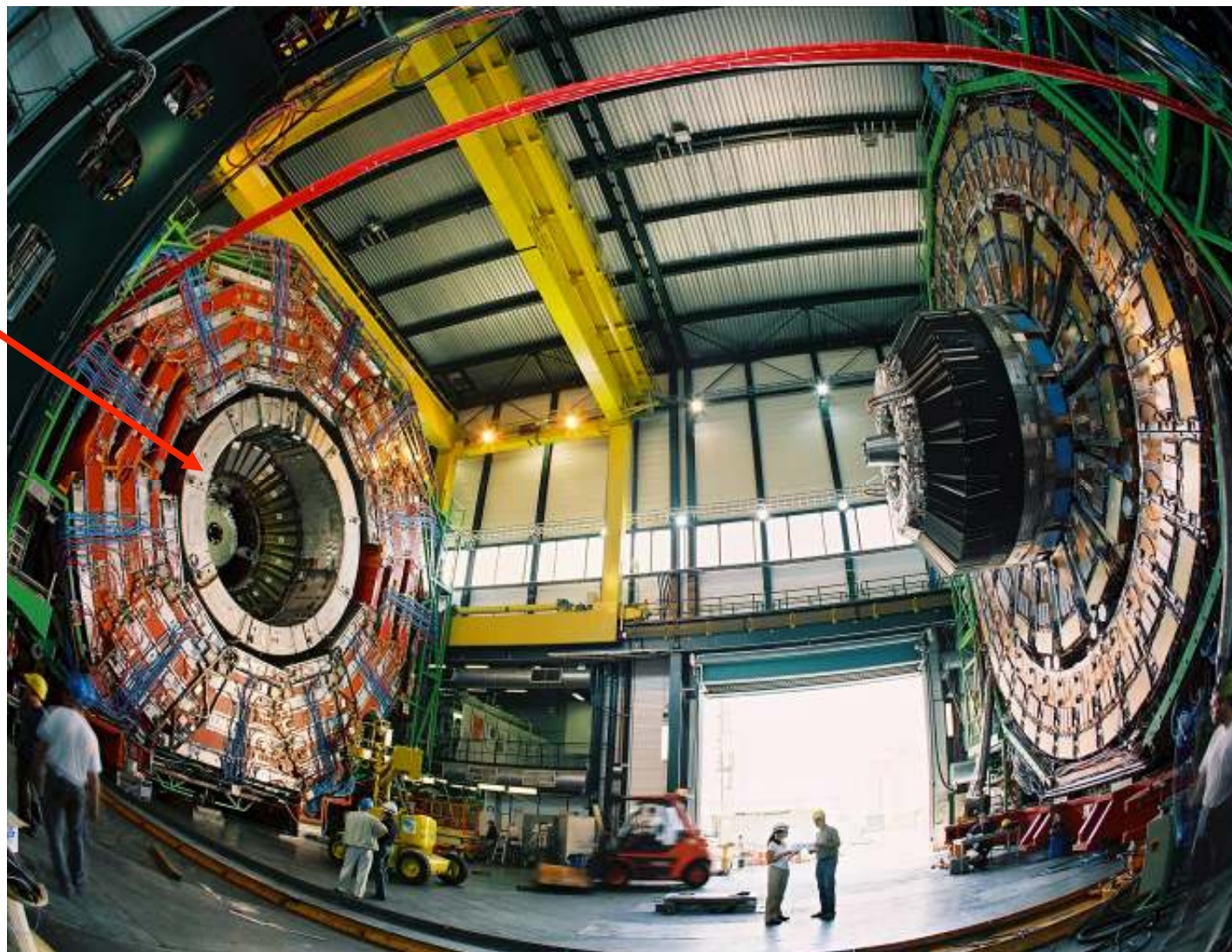


25 février



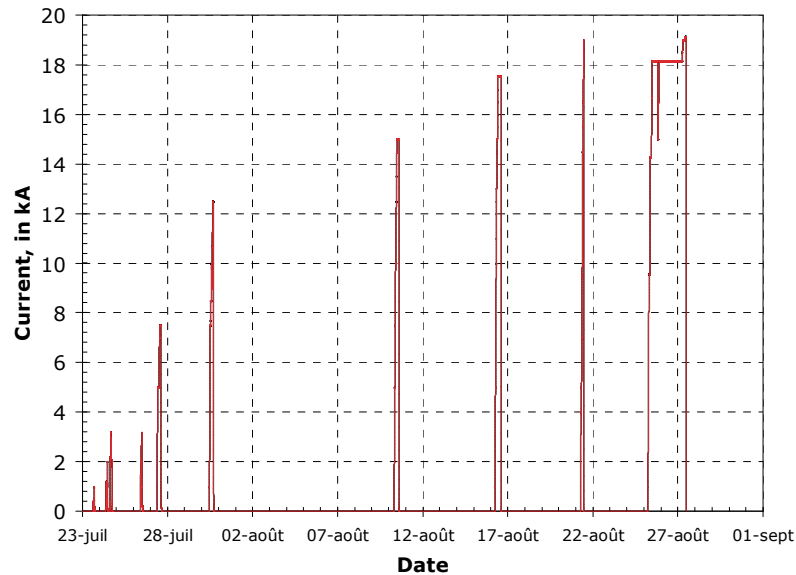
Fermeture du blindage (juillet 06)

Bobine





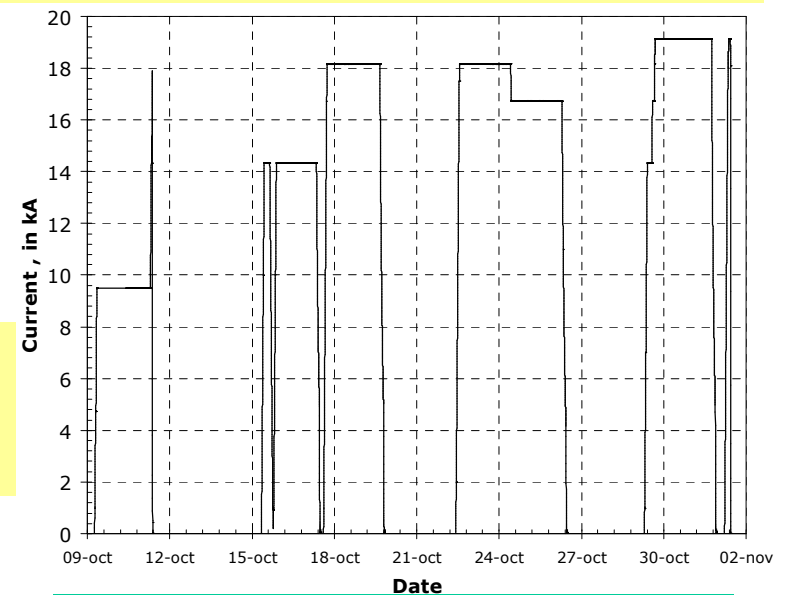
Cycles électriques



1ère campagne

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

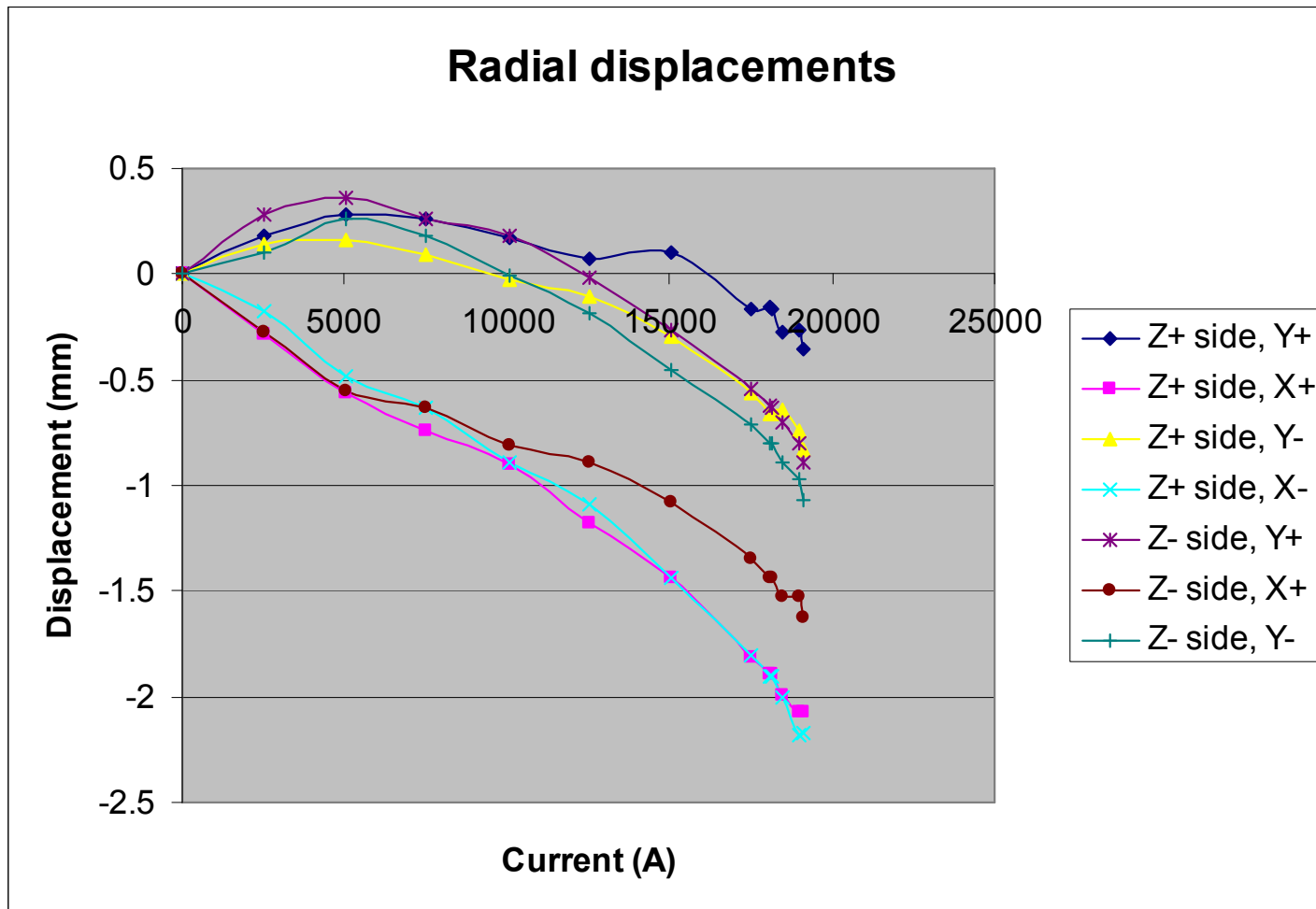
- Accroissement progressif jusqu'à I_{nom}
- Courts paliers (~1 h)
- Test des modes de décharge
- Pas de transition naturelle, mais effet de quench-back pour $I > 7,5$ kA
- Deux problèmes mineurs avec des auxiliaires



2ème campagne



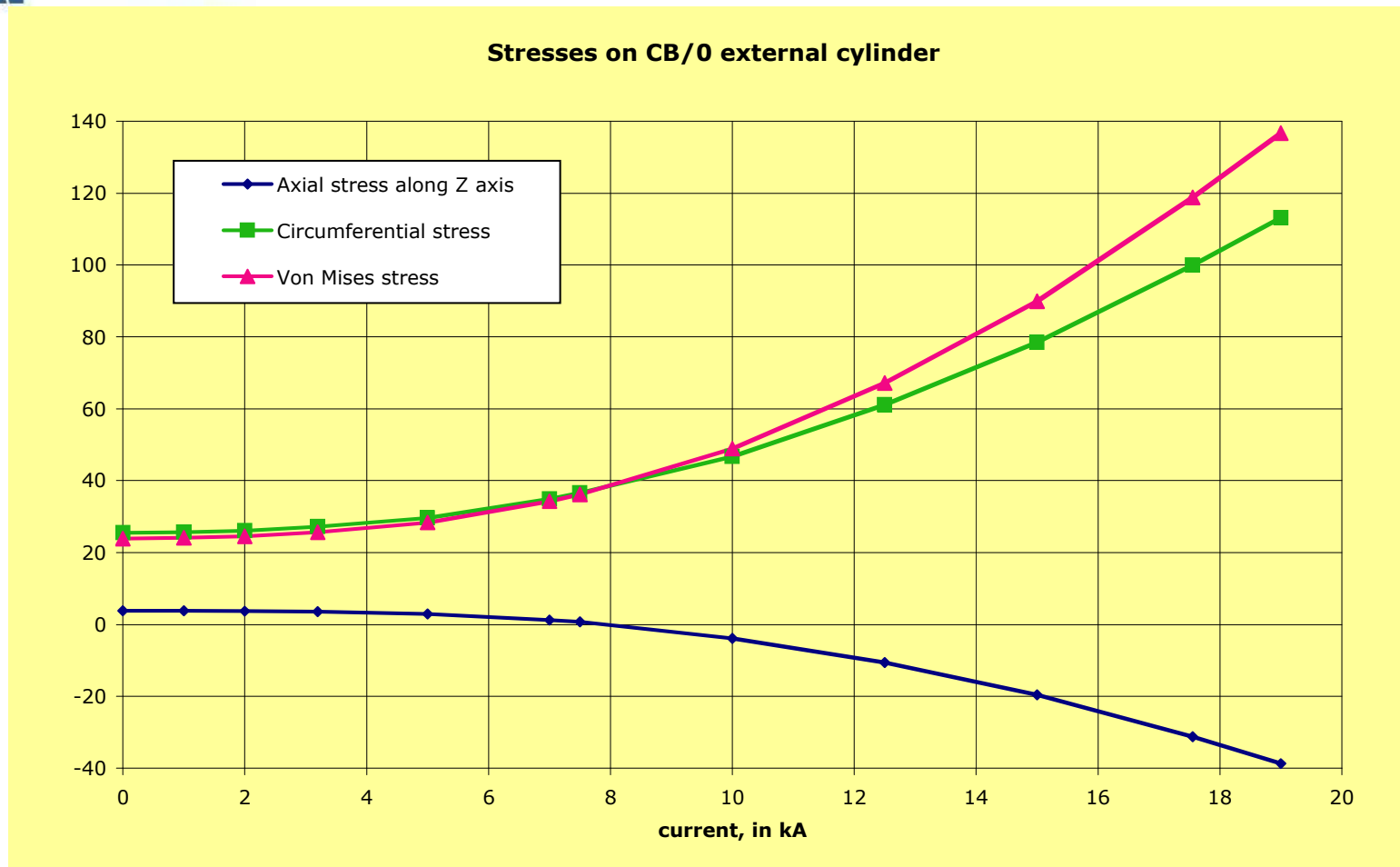
Décentrage de la masse froide dans le blindage



❖ 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)

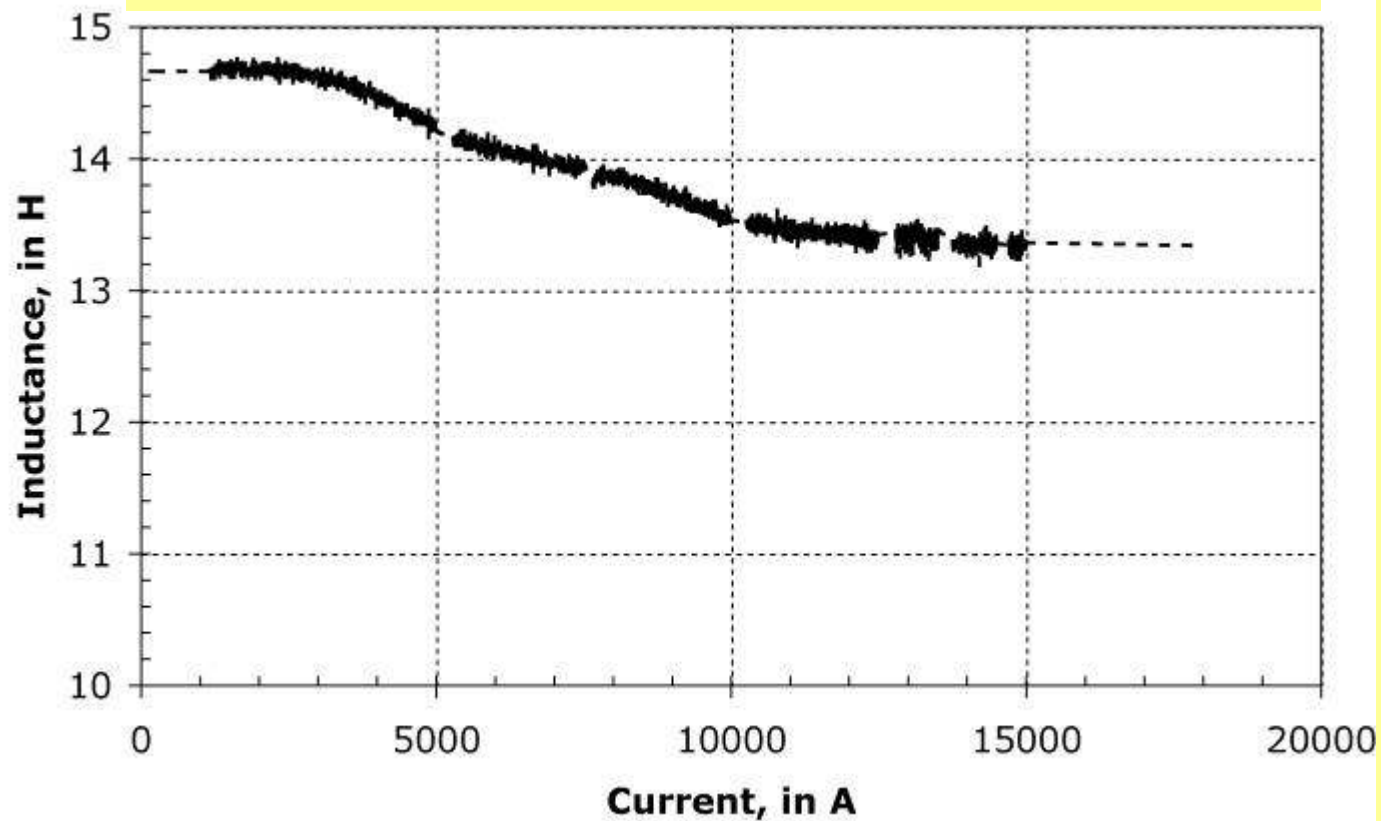


- **Contrainte de Von Mises mesurée à 4T : 138 MPa.**
- **En accord complet avec les calculs de 1998.**



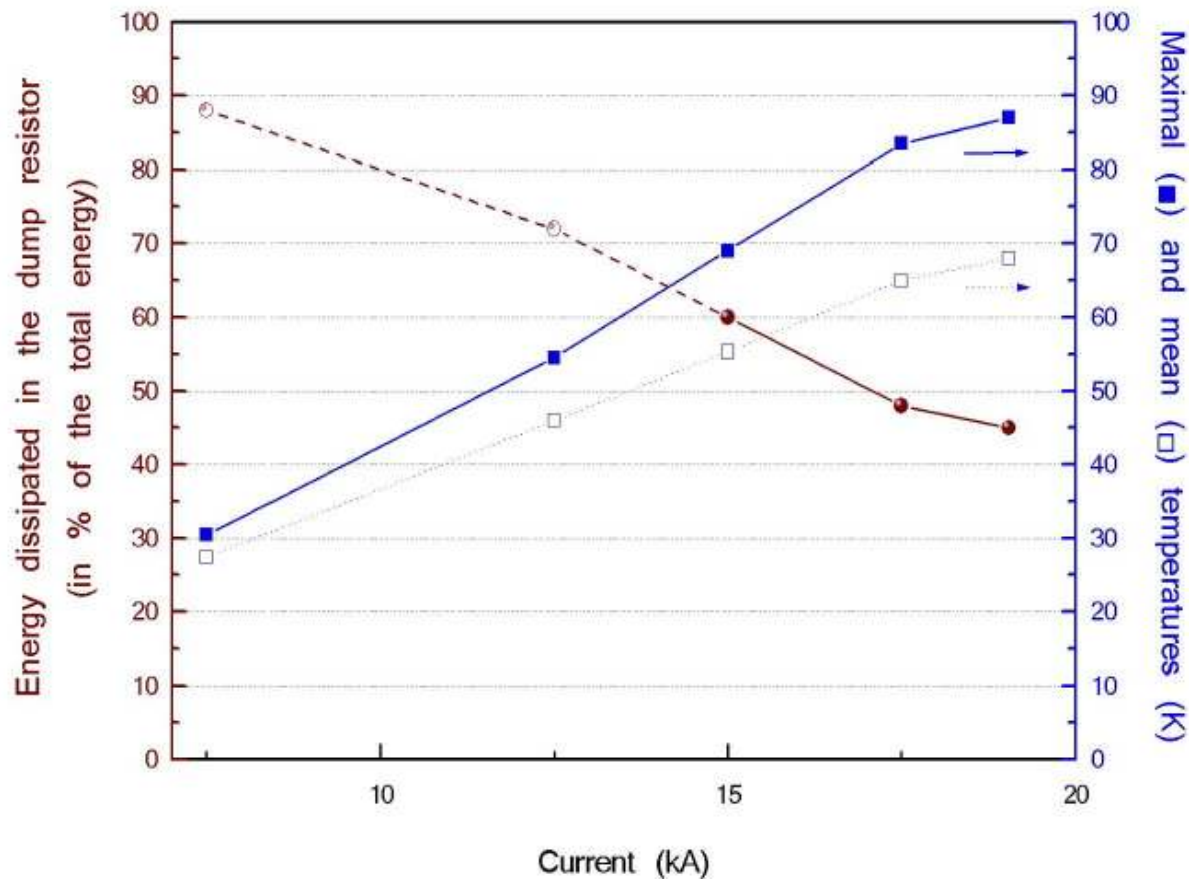
Paramètres électriques

Inductance de l'aimant en fonction du courant



- Isolation bobine/masse > 50 M Ω @ 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 Ω

Décharge rapide



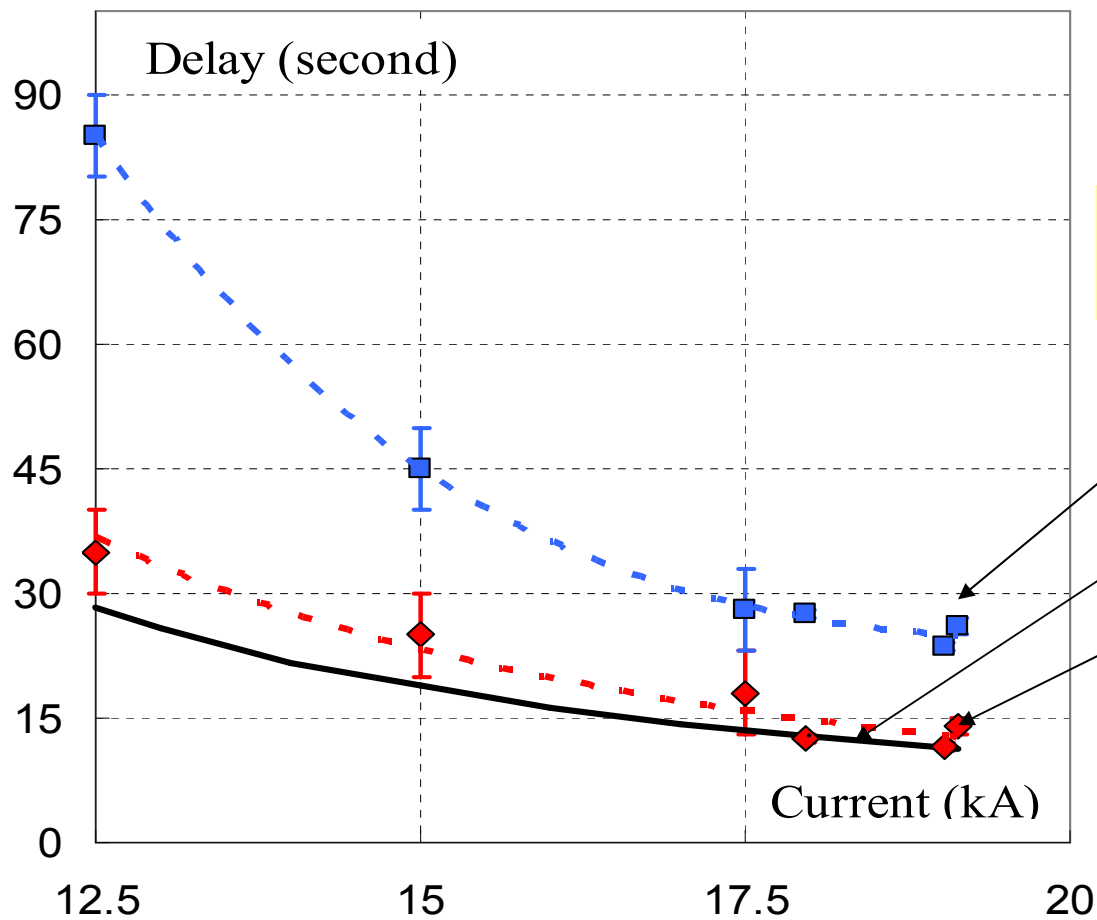
Pas de transition naturelle, mais effet de quench-back au dessus de 7,5 kA

Au courant nominal:

- T_{max} 85 K
- 45 % de l'énergie stockée est extraite



Délai pour le quench-back



Délai déduit des mesures de température

CB+/-2

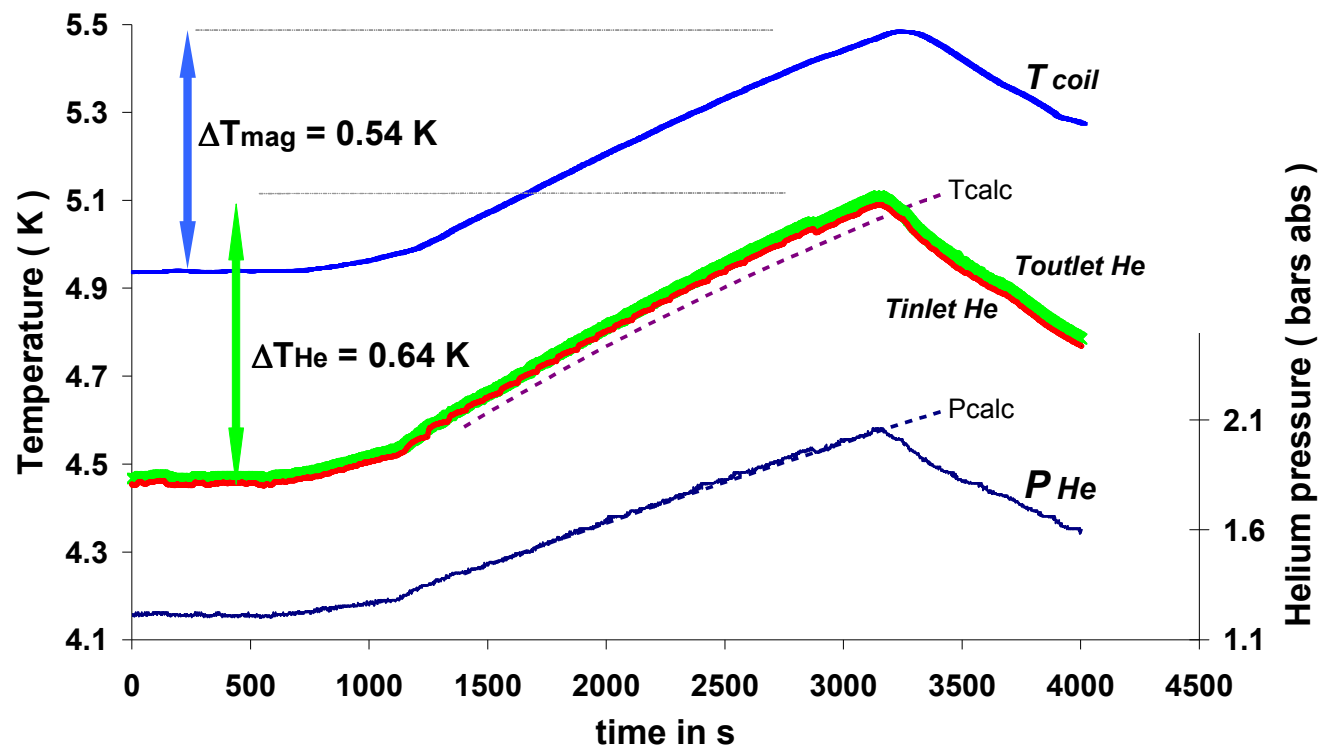
Calculs par E.F.

CBO



Stabilité de la bobine

P and T increases 2nd 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

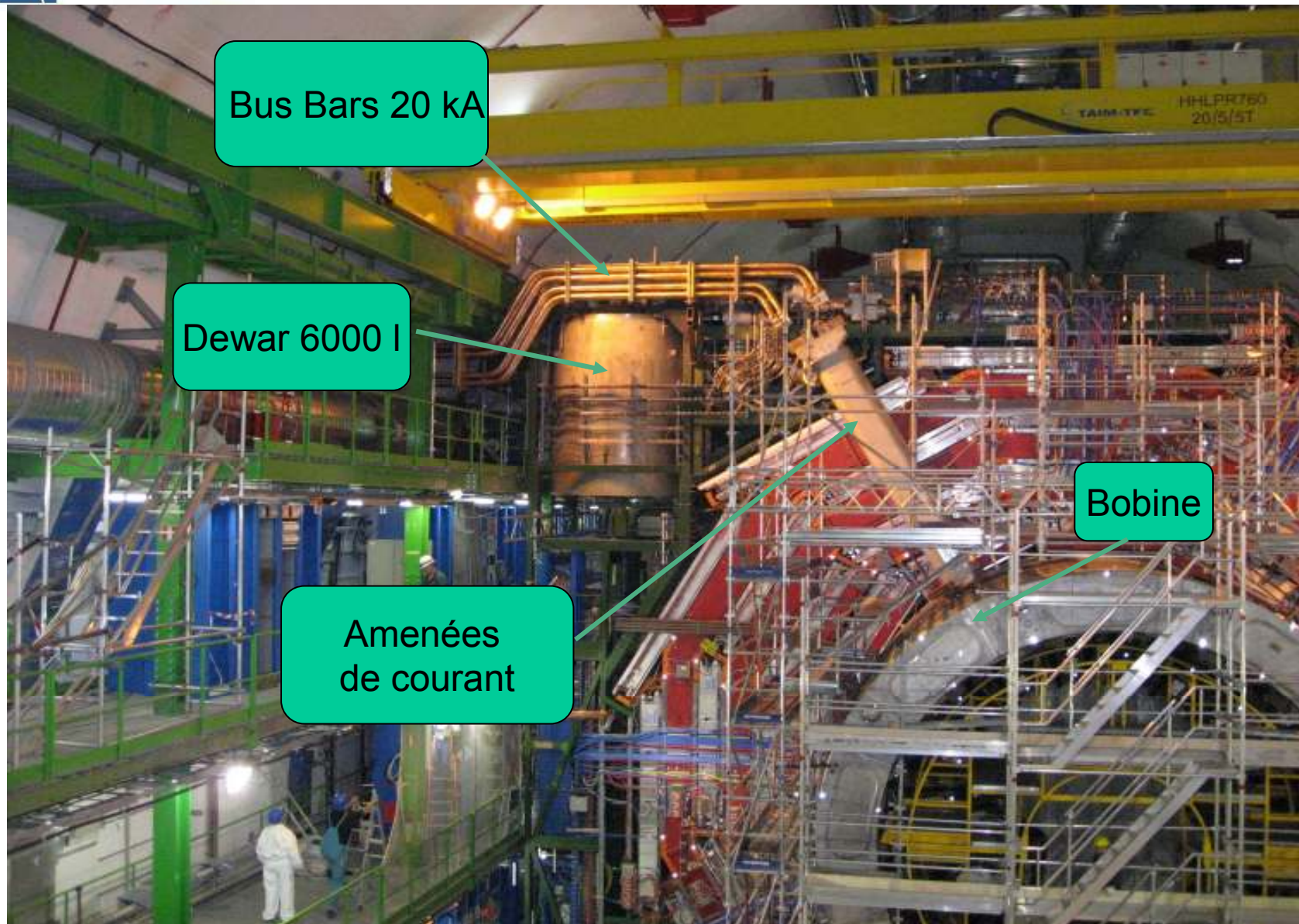


YB0 landing in the CMS experiment hall

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^e 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