



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

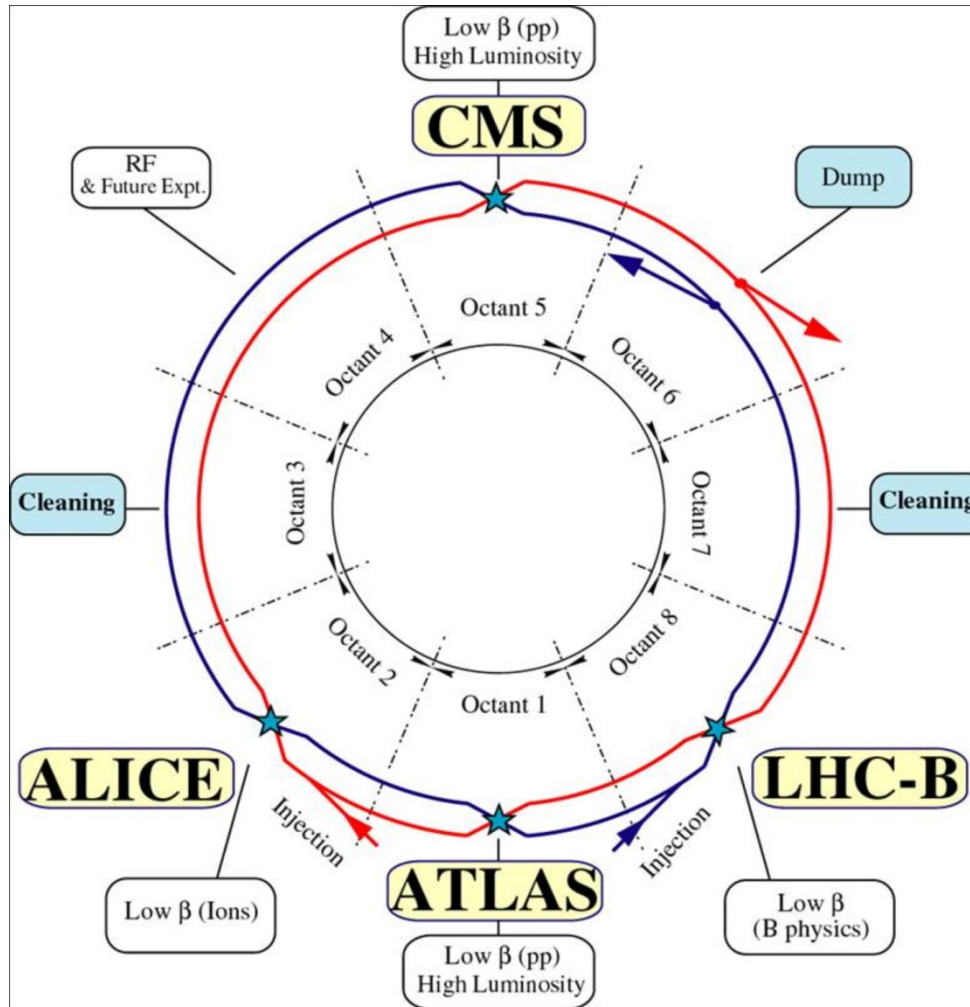
*Organisées par l'Association Française du Froid  
Commission de Cryogénie et de Supraconductivité*

# LA CRYOGENIE DES DETECTEURS DU LHC

**Giorgio Passardi**

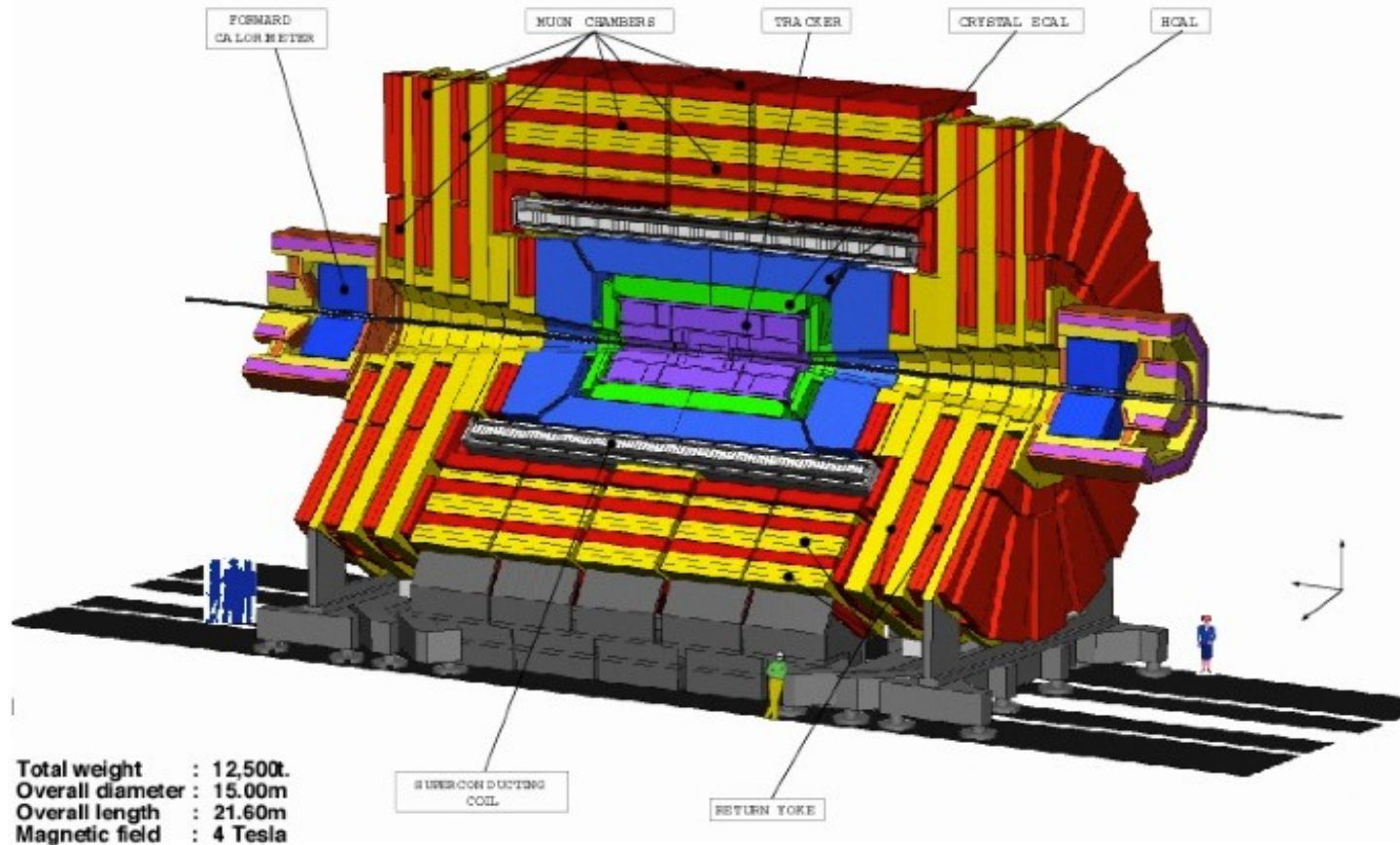
**10 avril 2008**

# Large Hadron Collider

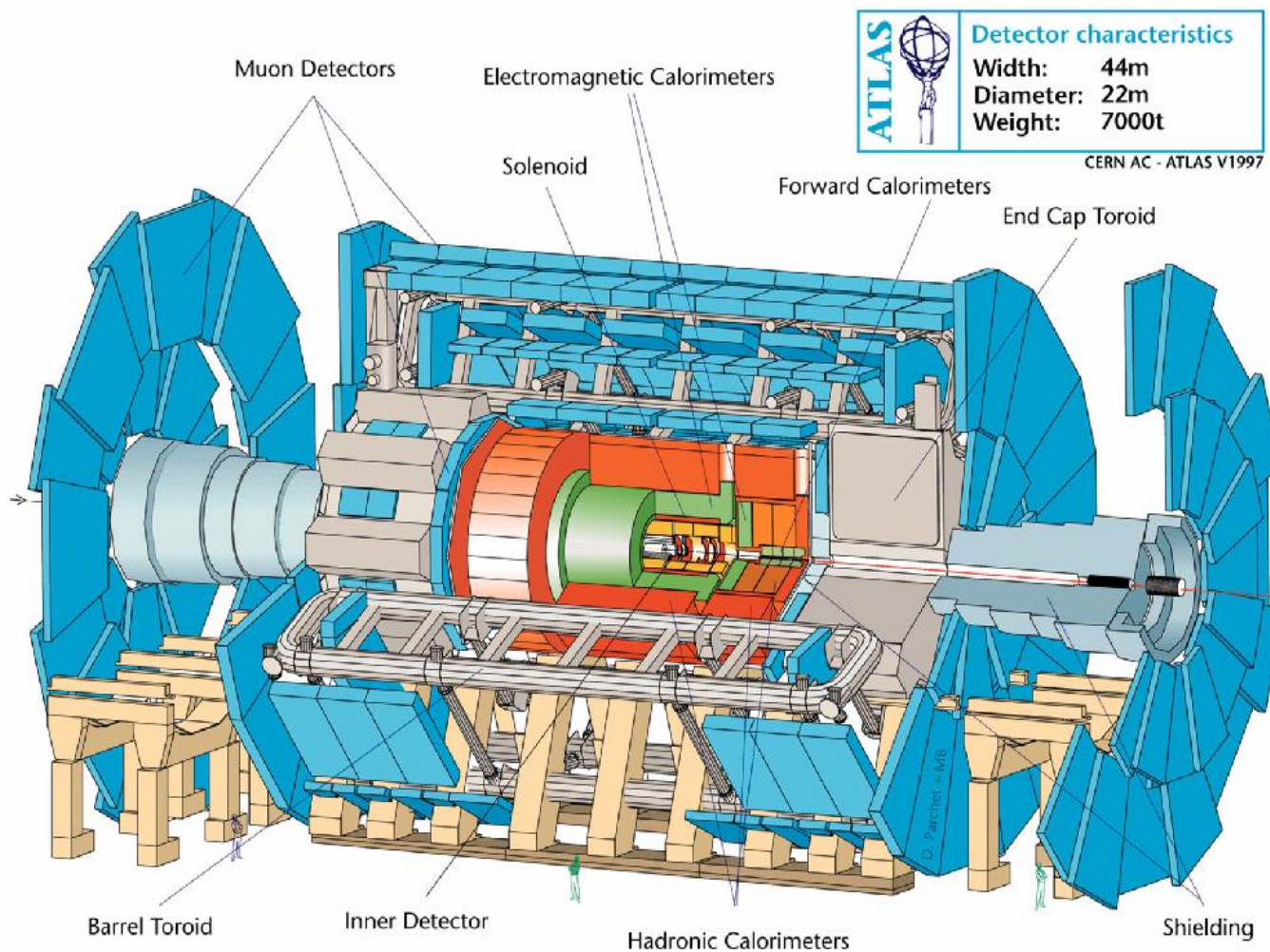


# CMS

## CMS A Compact Solenoidal Detector for LHC



# ATLAS







# COLLABORATION INTERNATIONALE

*Cryogénie hélium*

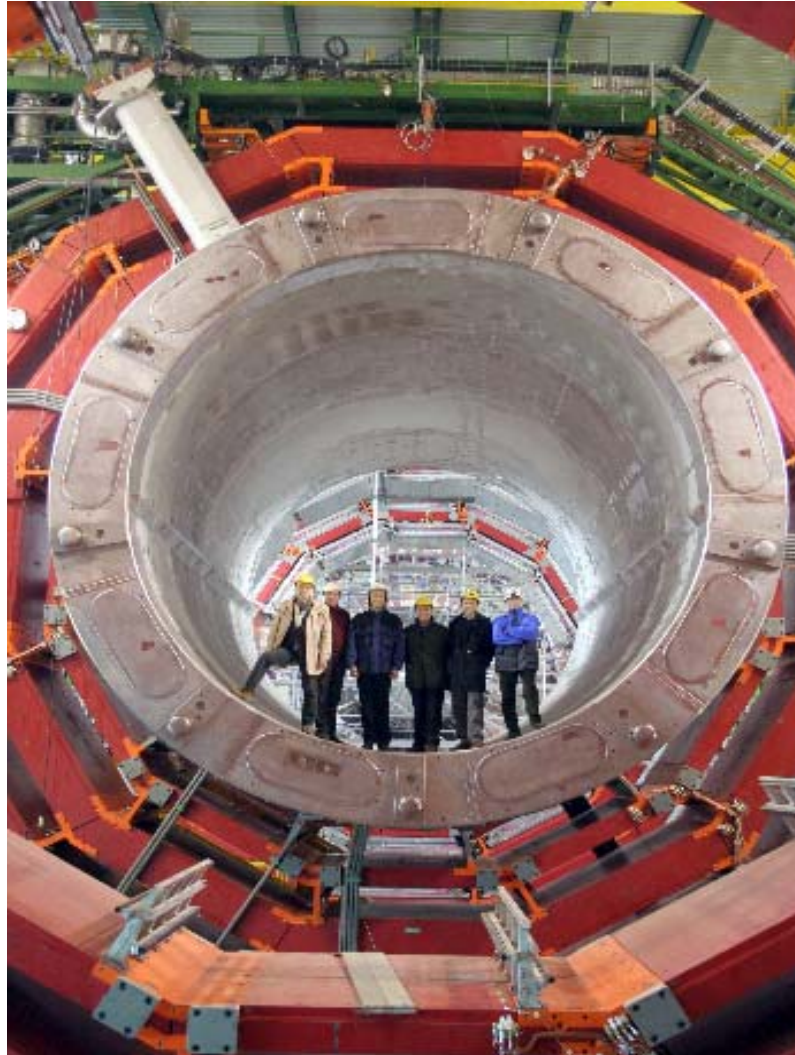
**CEA-SACLAY, INFN, KEK et RAL**

*Cryogénie argon*

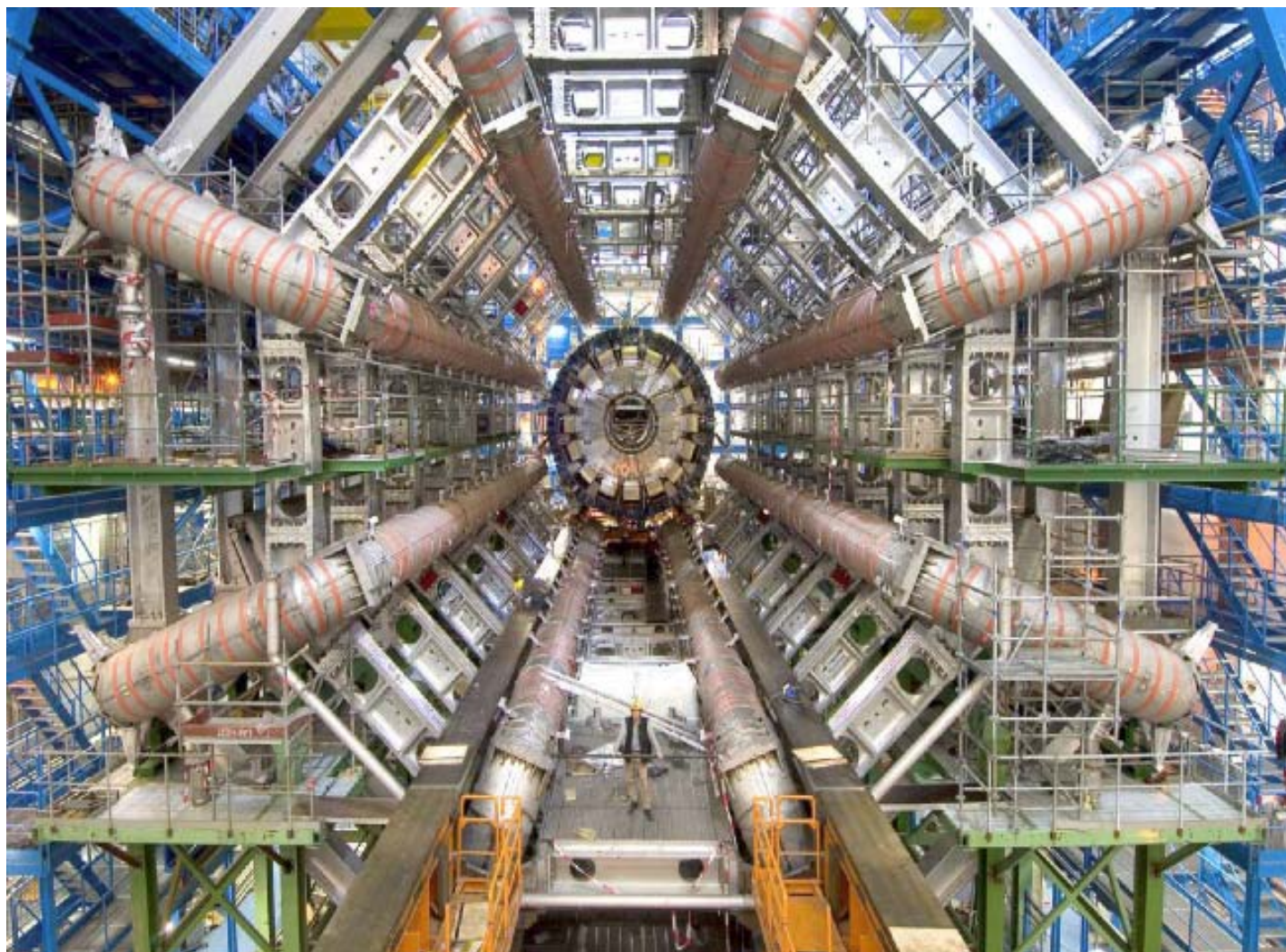
**LAL, BNL, CEA, LPSC et NTNU**

**CERN COLLEGUES**

# CMS Solénoïde

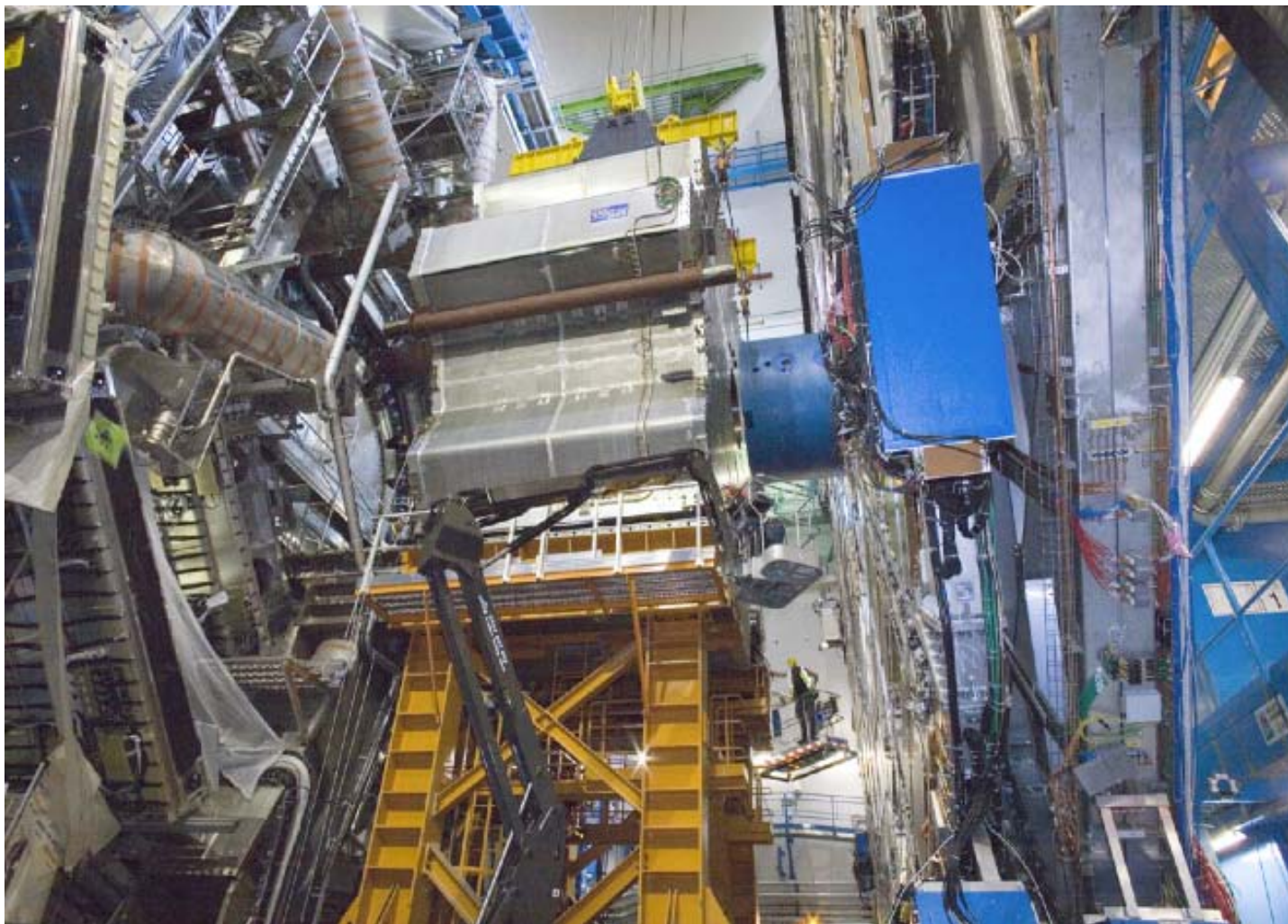


# ATLAS Barrel Toroid





# ATLAS End-Cap Toroid





# ATLAS Central Solenoid



# Données aimants

## ATLAS

- Trois grands toroïdes (Barrel, 2 End-Caps)

Masse froide à 4.5 K: **680 tonnes**

Courant 20.5 kA, énergie stockée **1.6 GJ**

- Solénoïde Centrale

Courant 7.6 kA, 2 T, énergie stockée **39 MJ**

Masse froide à 4.5 K: **5.5 tonnes**

## CMS

- Grand solénoïde: masse froide à 4.5 K: **220 tonnes**

Courant 19.5 kA, 4 T, énergie stockée **2.6 GJ**

Températures après décharge rapide **< 80 K**



# Principes conceptuels et spécifications du système cryogénique pour les aimants(1)

## Cryogénie interne

- Refroidissement **indirecte** par tubes en contact thermique avec la masse froide
- Circuits en parallèle:  
2x4/bobine x 8 = **64** pour toroïdes ATLAS avec **orifices** entrée circuit, **86** pour CMS, **2** pour CS ATLAS,
- Écoulement hélium diphasique à **4.5 K**
- Débit forcé par **pompe** (toroïdes) ou **thermosiphon** (solénoïdes)
- Débit spécifique pour toroïdes **>4 g/s·cm<sup>2</sup>**
- Concentration massique gaz sortie circuits **<< 10%**
- Ecrans à **60 K** par circulation forcé (réfrigérateurs) de gaz He



## Principes conceptuels et spécifications du système cryogénique pour les aimants (2)

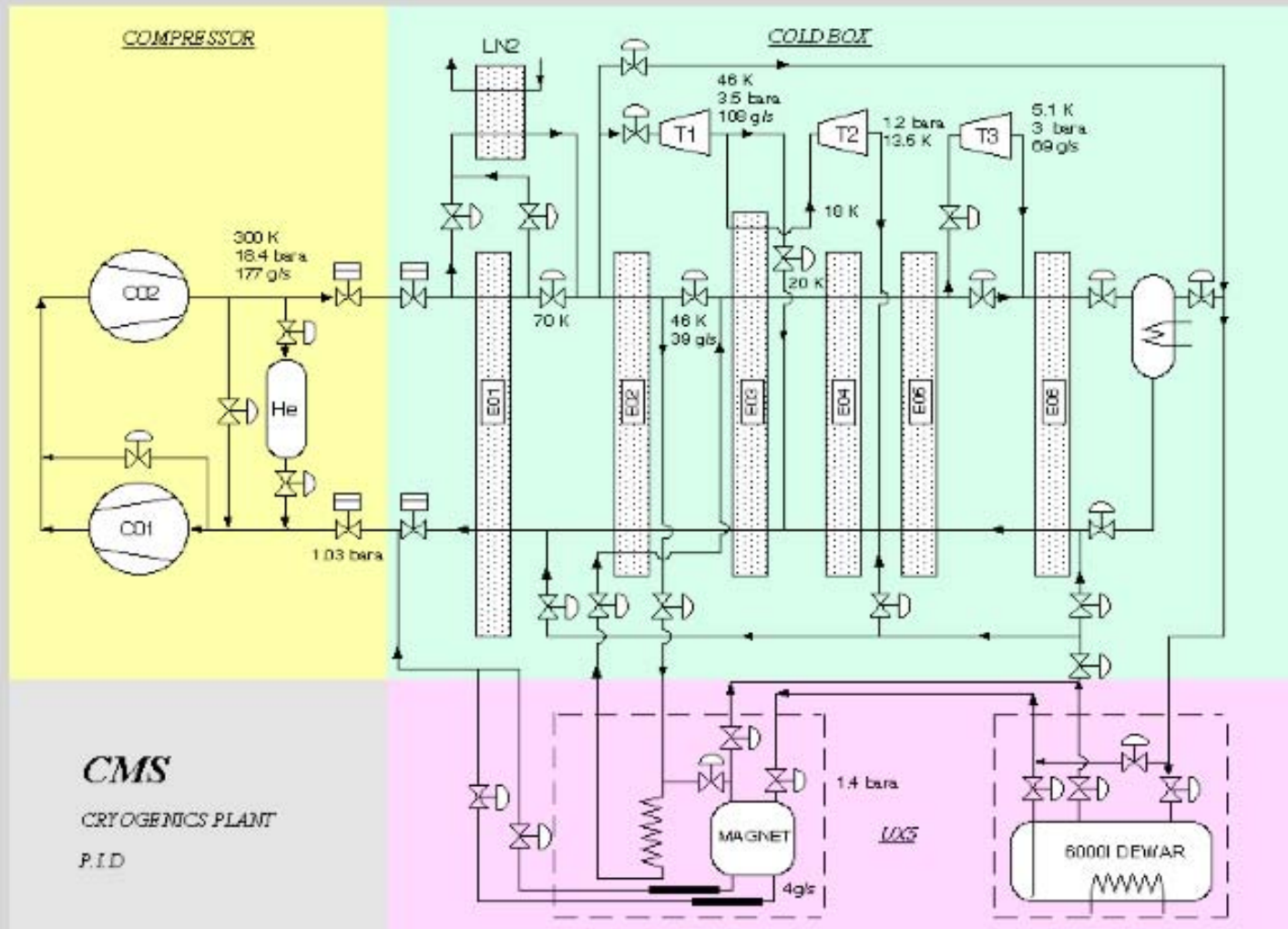
### Charges thermiques

	statiques	dynamiques	à 4.5 K
• Barrel toroïde:	8x82 W	350 W	(2 hr)
• End-Cap toroïde:	2x200 W	2x100 W	(2 hr)
• ATLAS solénoïde:	50 W	20 W	(20 min)
• CMS solénoïde:	160 W	360 W	(4 hr)

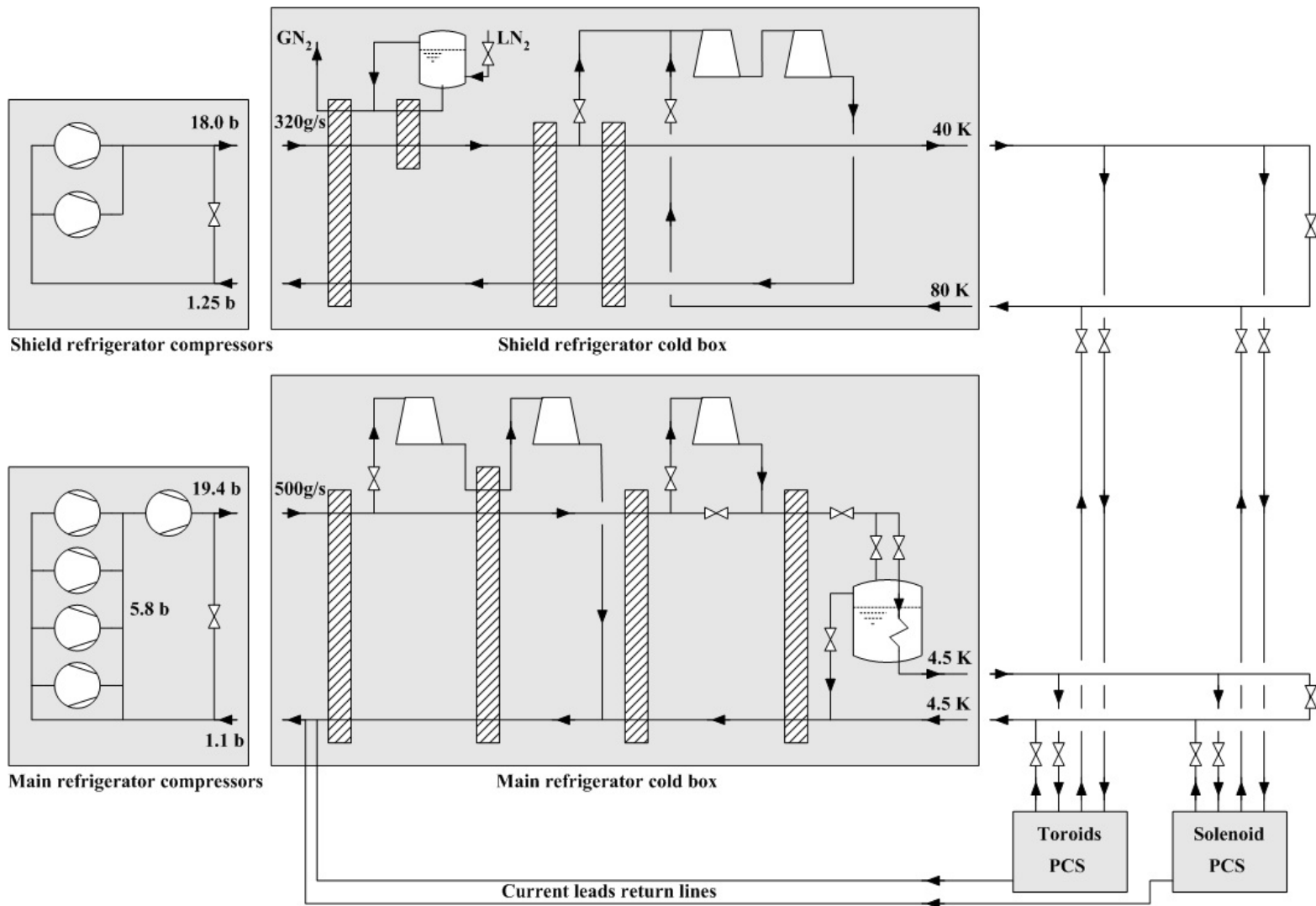
### Cryogénie externe

- Mise en froid aimants entre 300 K à 100 K en utilisant **LN2**, de 100 K à 4.5 K en utilisant les **turbines**
- Temps de mise en froid < **1 mois**, écart max. températures < **30 K**
- Temps de récupération décharge rapide < **3 jours**
- Pression maximum pendant décharge rapide < **20 bar**
- Un réfrigérateur pour CMS de 1.5 kW @ 4.5 K
- Deux réfrigérateur pour ATLAS de: 6 kW @ 4.5 K et 20 kW @ 60K

# Flow scheme of CMS He refrigerator

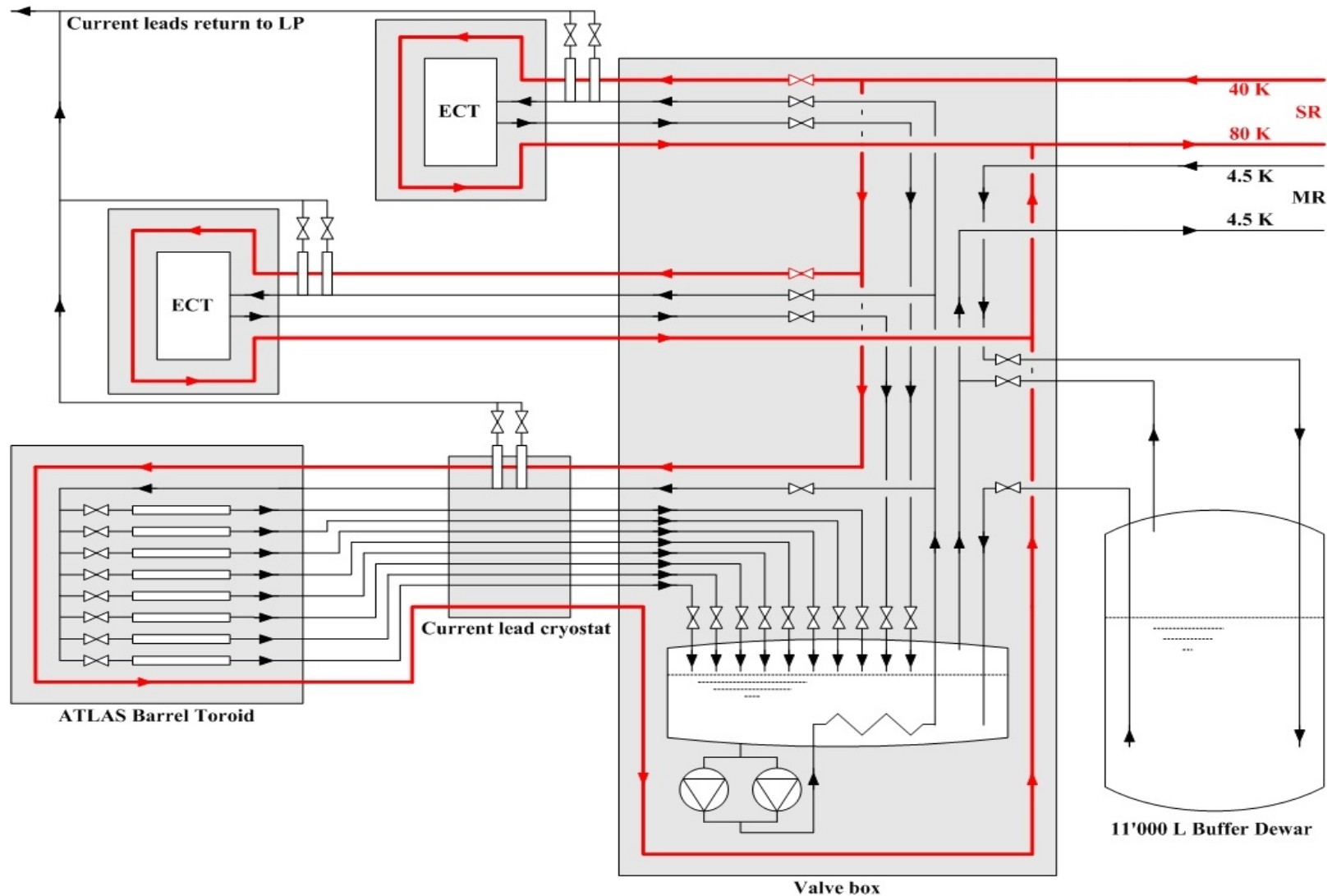


# Flow scheme of ATLAS He refrigerators

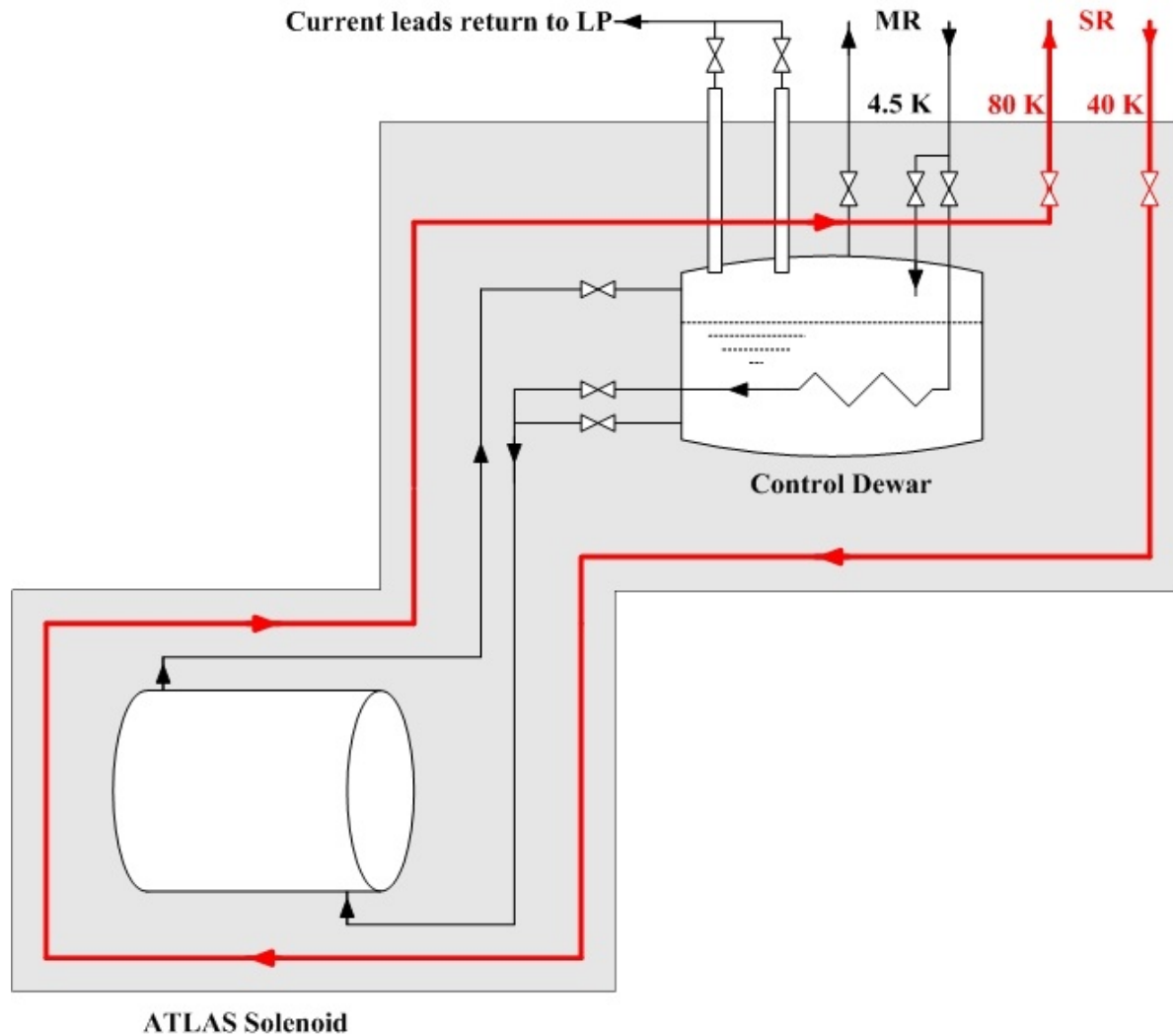




# PCS of ATLAS Toroids



# PCS of ATLAS Central Solenoid

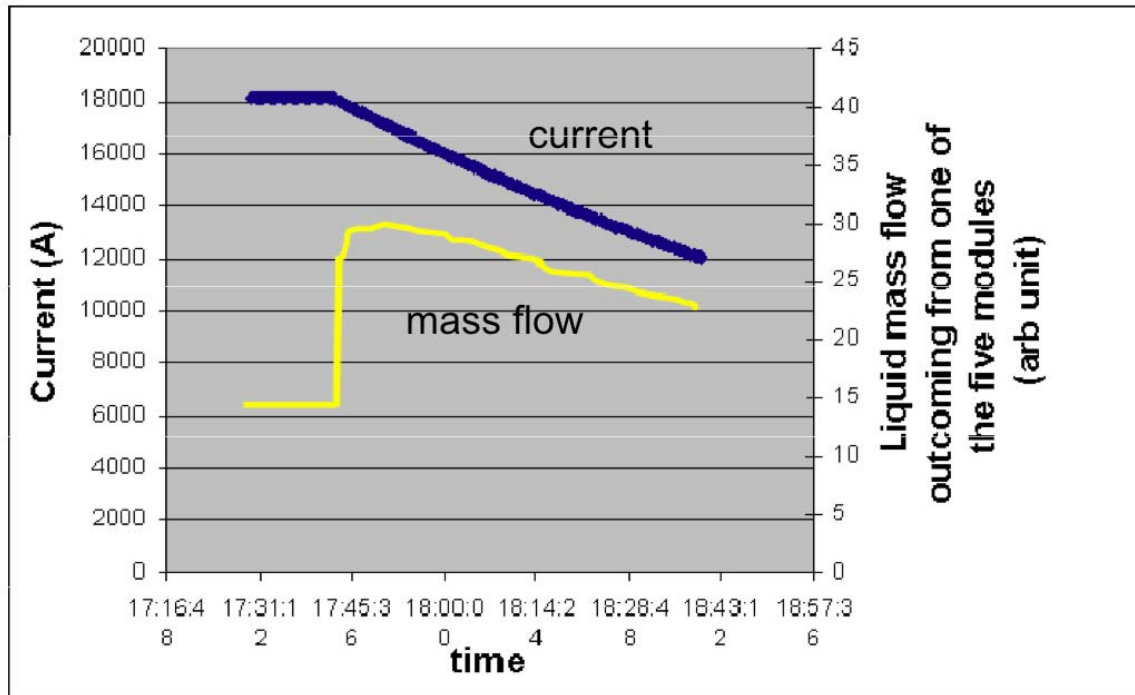


# CMS thermosyphon flow

## CMS on site

- Self-sustained circulation with the heat deposited

(on site, at the beginning of a slow dump with dynamic heat load)





# LHe centrifugal pump performance

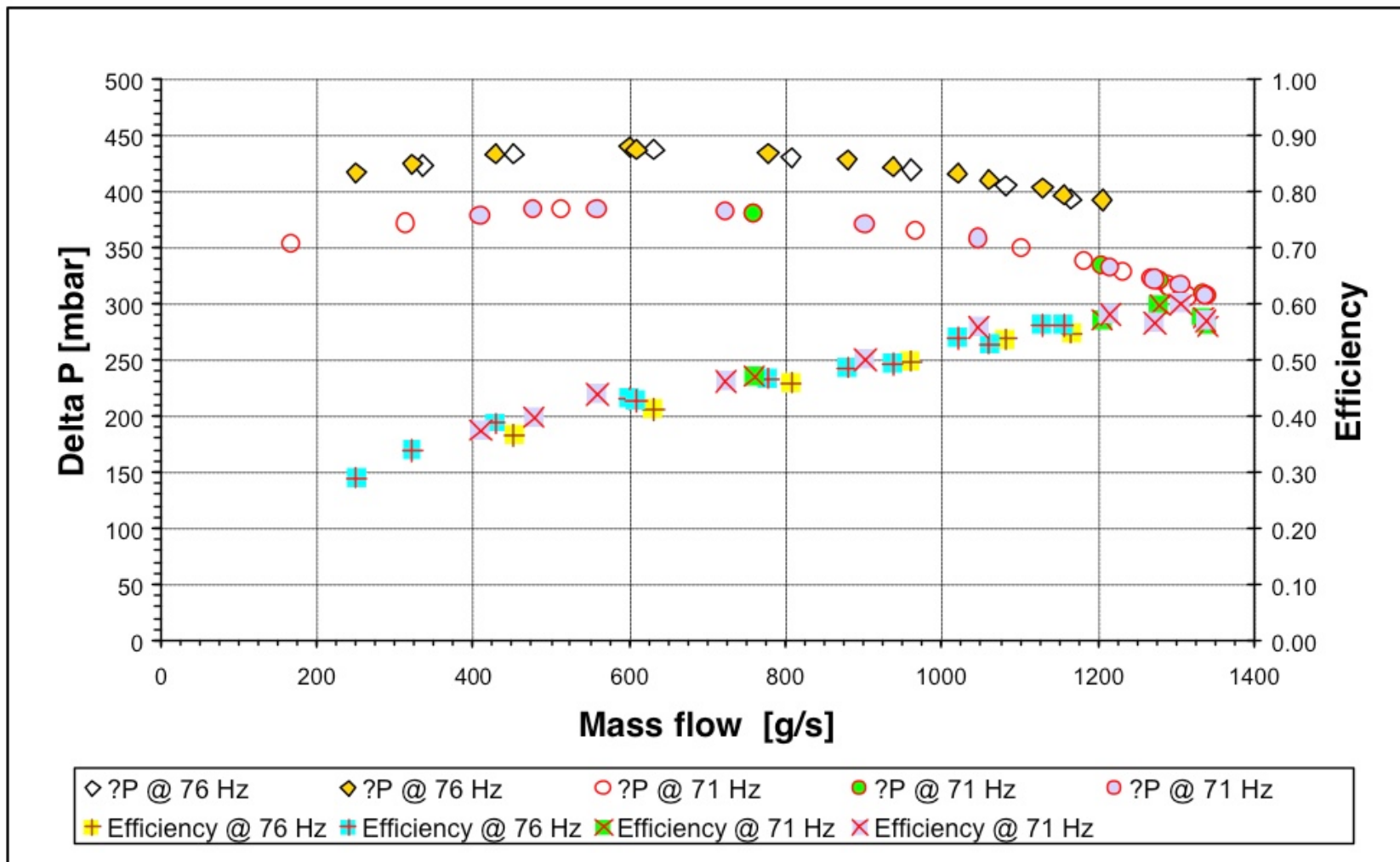
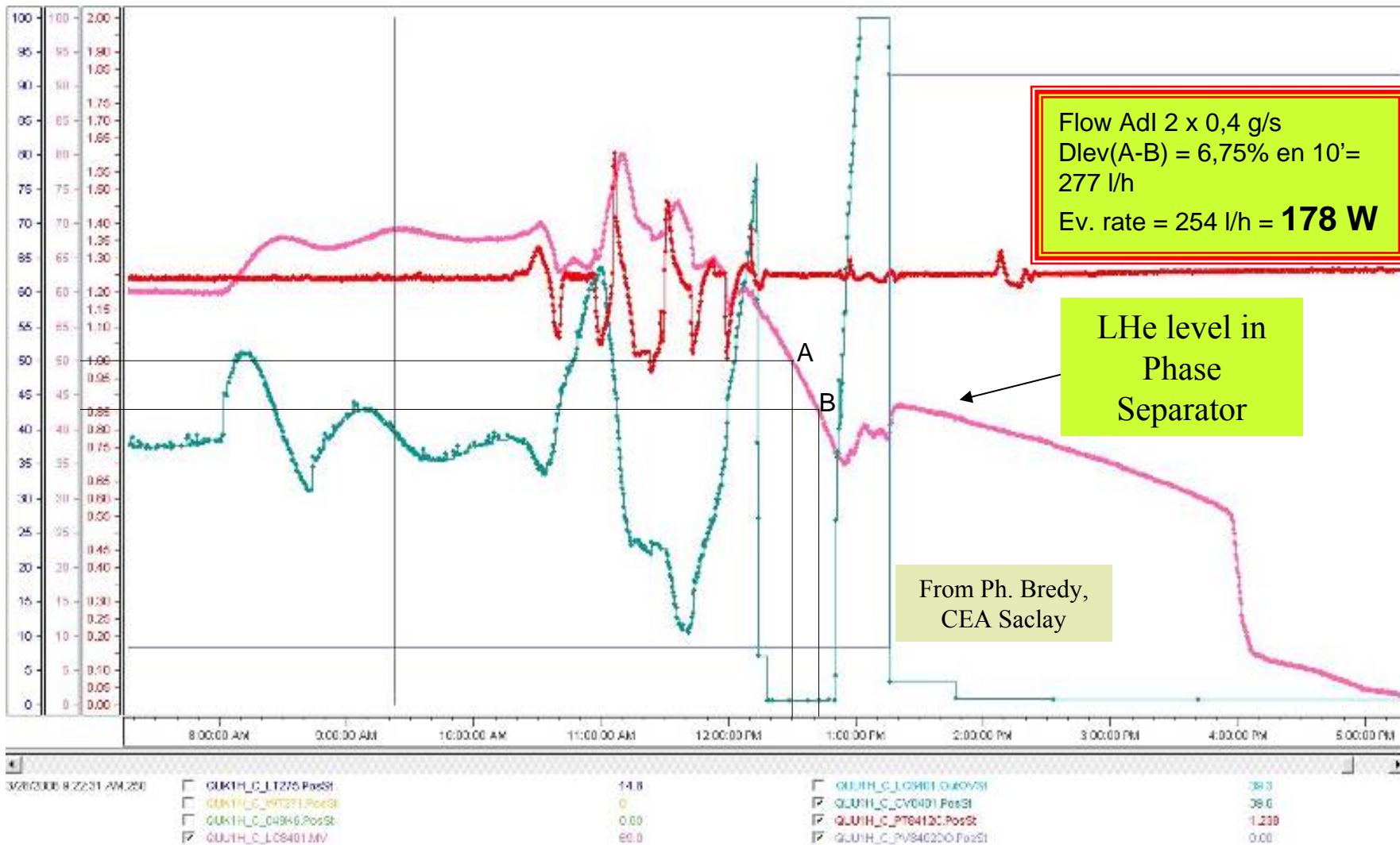
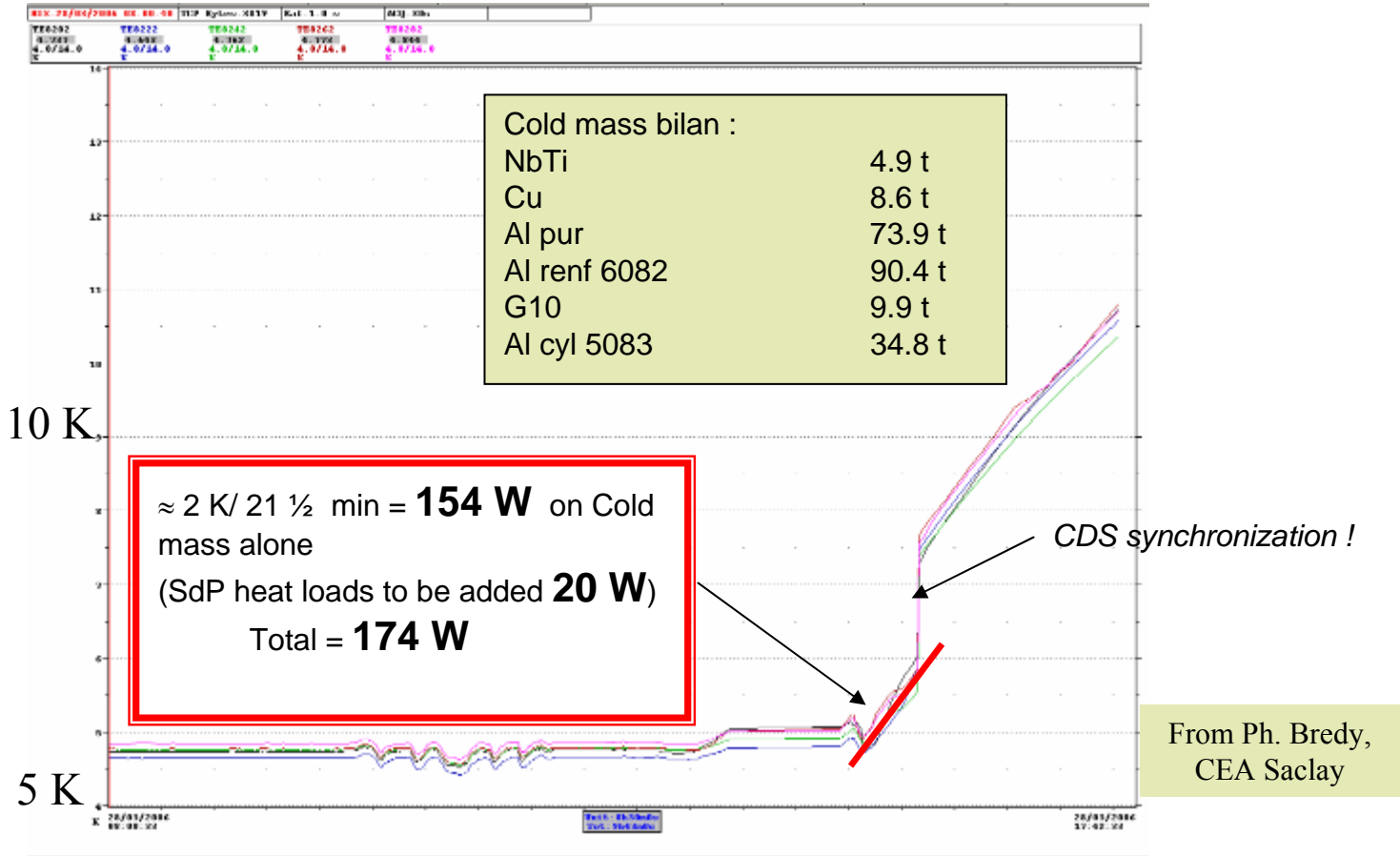


Figure 3. Characteristic curves and efficiencies of the pump with the impeller diameter 112.5 mm.

# Static heat load of CMS Solenoid



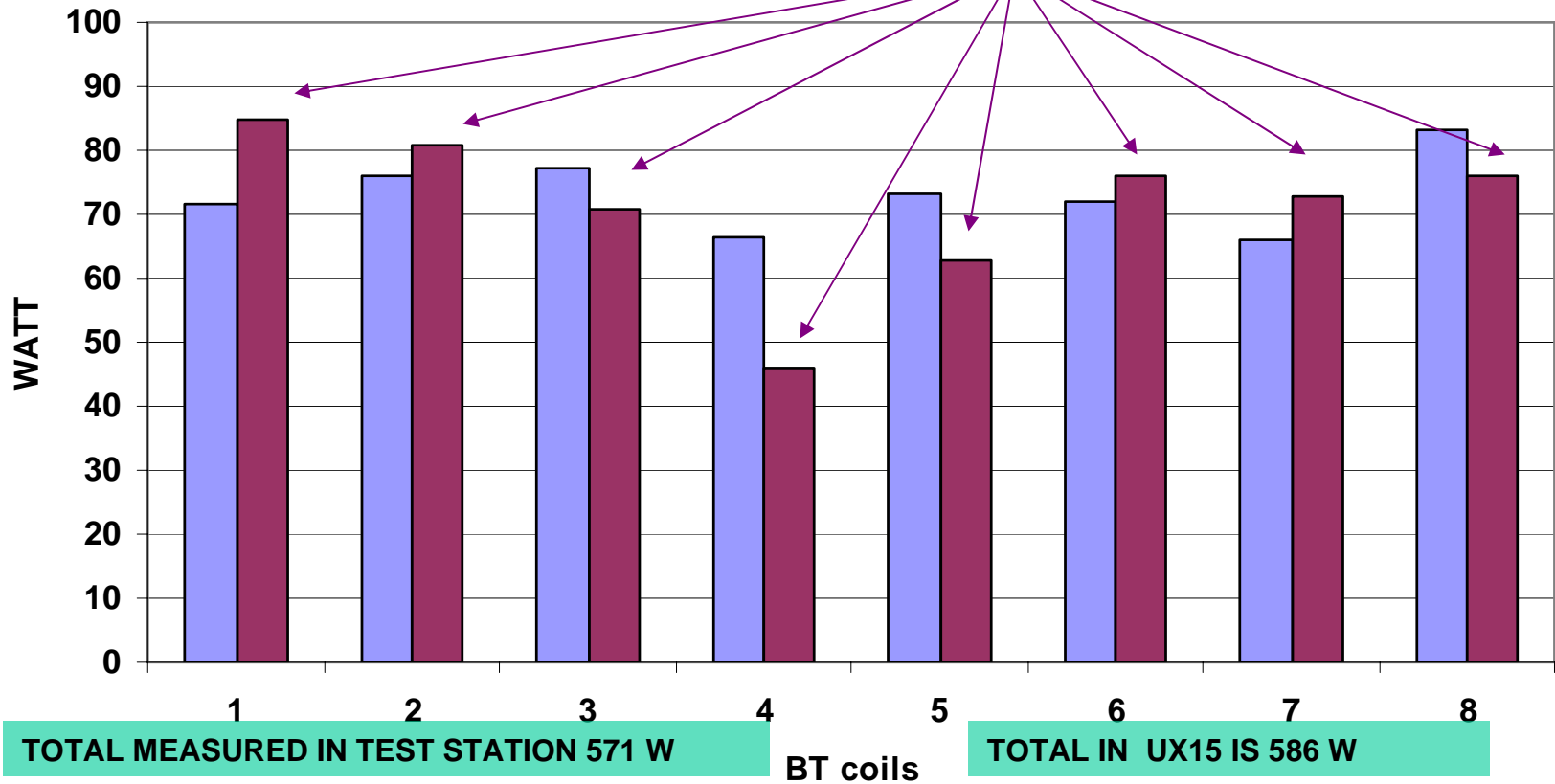
# Natural warm-up of CMS Solenoid



# Static heat load Barrel Toroid

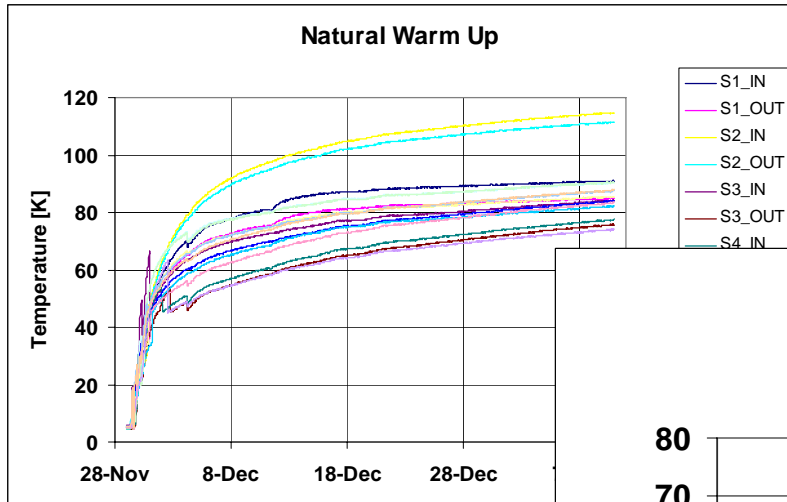
Average BT heat load in Cryoring (14 Dec 2006)

Values measured in test station



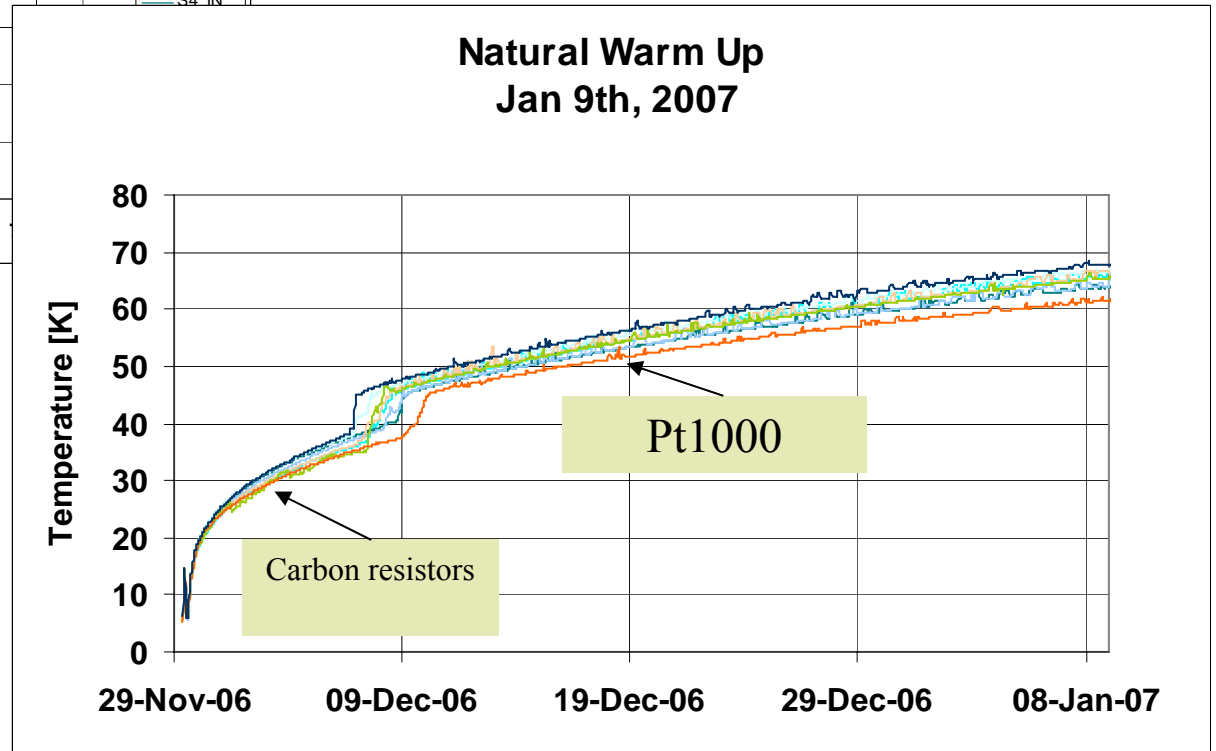


# Natural warm-up of Barrel Toroid



Tin-Tout on the pipes

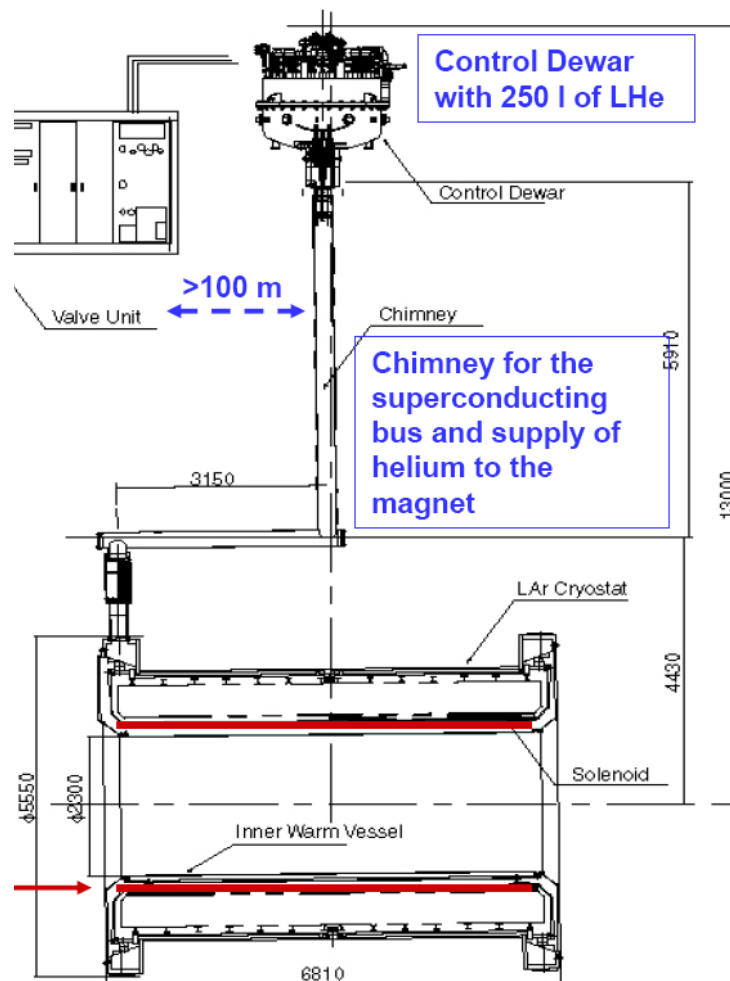
Tmax, Tmin on coils



## Static heat load of Central Solenoid

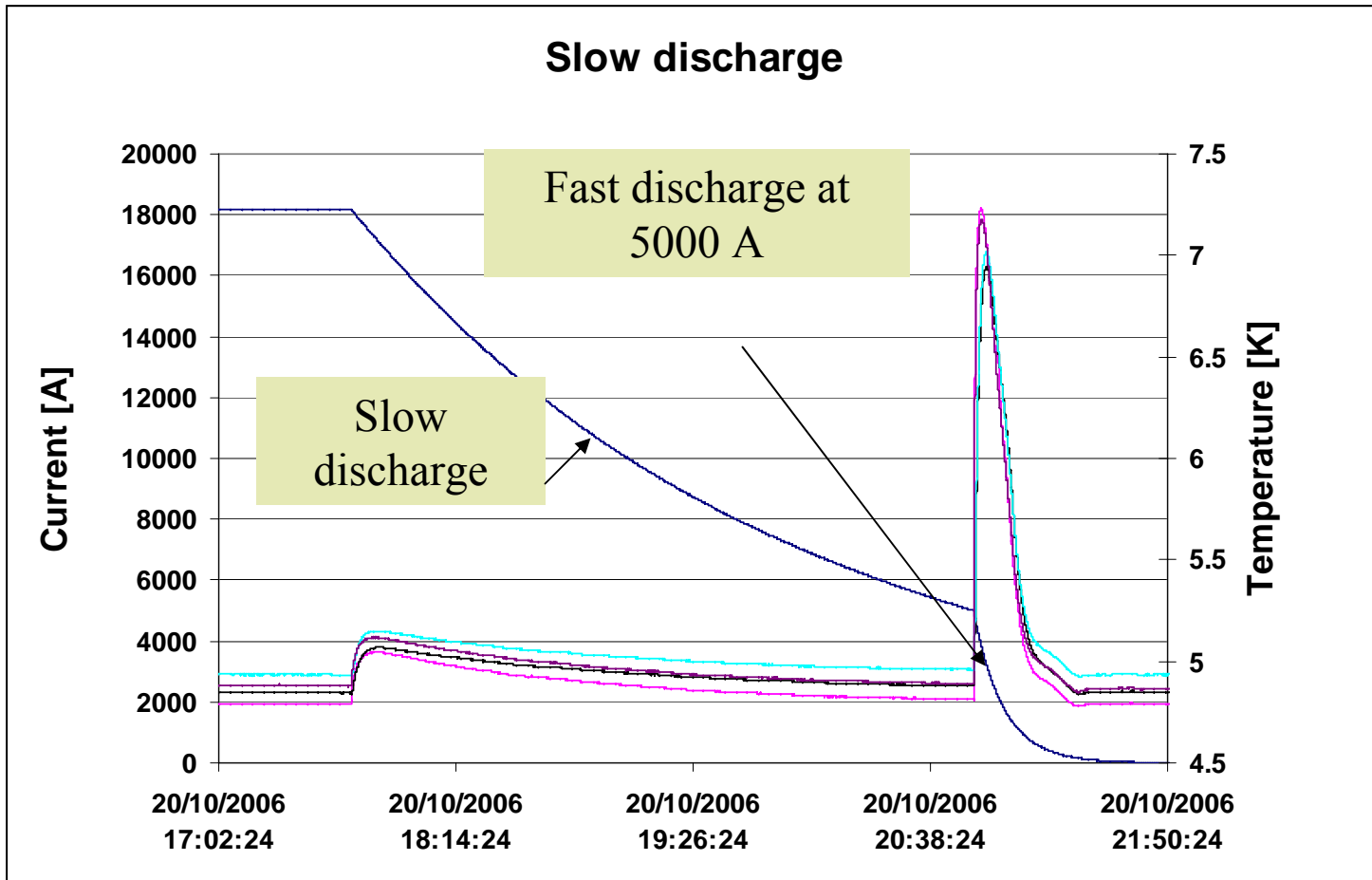
### ATLAS: CS

- Measurement of total loss was done *during thermosyphon operation* mode with *disconnected refrigerator* and looking at the *level/time change in the control dewar*
- Results:
  - **17 Watts** for the solenoid and the chimney;
  - below **10 Watts** for the dewar.

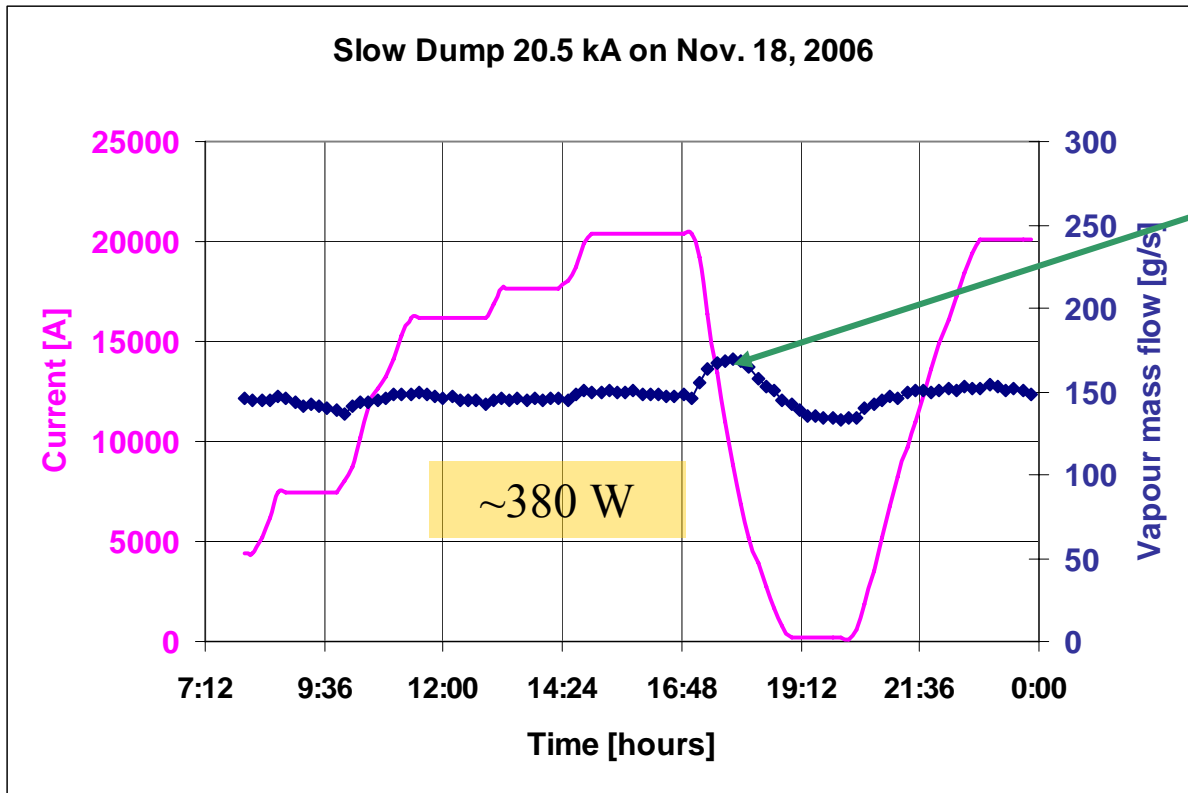


# Dynamic heat load of CMS Solenoid

Temperature increase  $\sim 0.28$  K



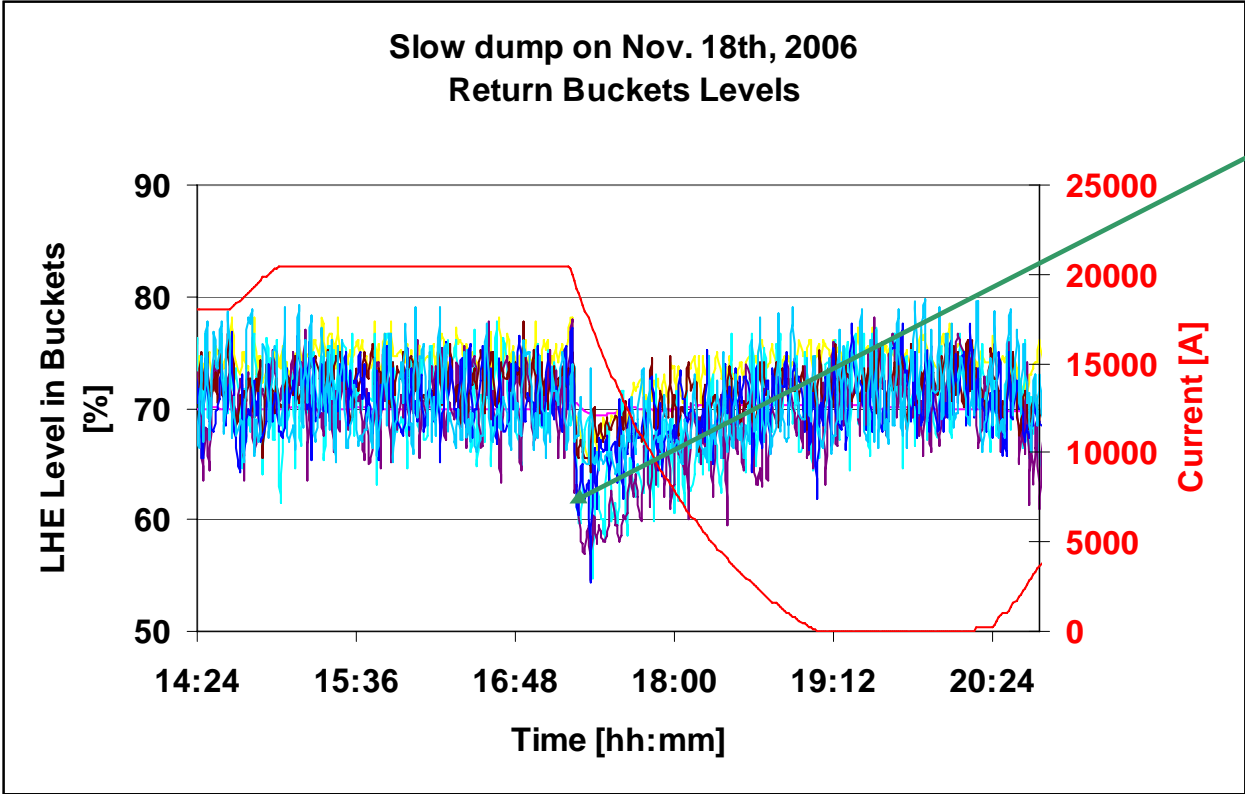
## Dynamic heat load of Barrel Toroid



LHe vapor mass flow on the phase separator is increased due to the higher heat load



# Dynamic heat load of Barrel Toroid



Level of LHe is reduced due to the higher vaporization during slow discharge



## Charge dynamique du Solénoïde Centrale

Charge thermique par courants induites:  
environ **25 W**

Méthodes de mesure:

- Pendant charge à **6 A/s** baisse du chauffage dans le séparateur de phase a niveau constant (**refroidissement en circuit forcé par réfrigérateur**)
- Mesure de débit à température ambiante



## Bilan de la réfrigération du solénoïde de CMS

- **Charges thermiques à 4.5 K:**  
**180 W** (statique) + 50 W (interfaces) + 360 W (dynamique)  
= **590 W** (réfrigérateur **920 W** mesuré, 800 W spécifié)
- **Charge en liquéfaction:**  
**2.6 g/s** (réfrigérateur **4 g/s** mesuré, 4 g/s spécifié)
- **Charge thermique des écrans à 60 K:**  
**1100 W\*** (réfrigérateur **4400 W** mesuré, 4500 spécifié)

\* mesure préliminaire



## Bilan des charges thermiques statiques ATLAS

- Charges thermiques à l'interface de la PCS ( BT seul):  
**1400 W = 590 W (BT) + 650 W (pompe) + 160 W**  
(anneau cryogénique+cryostats emmenées de courant + systèmes de sécurité+ lignes de transfert + boite à vannes)
- Puissance du réfrigérateur à l'interface avec la PCS:  
**3000 W + 13 g/s** de liquéfaction
- Puissance nécessaire:  
**1400 W + 30 W + 300 W\*\*x2 (End-Caps)**  
**= 2030 W + 11 g/s**

\*\* mesure préliminaire





## Charges thermiques des écrans ATLAS et CMS

### ATLAS

#### Barrel toroïde

- Pour chacun des cryostats dans la zone de test en surface, moyenne **800 W** x 8 = **6400 W** (6600 estimés)
- Le total de la charge thermique des écrans BT a aussi été mesuré dans la caverne = **5900 W**

#### End-Cap toroïde

- Mesuré dans la caverne = **2x1300 W\*** (2x2200 W estimés)

#### Solénoïde centrale

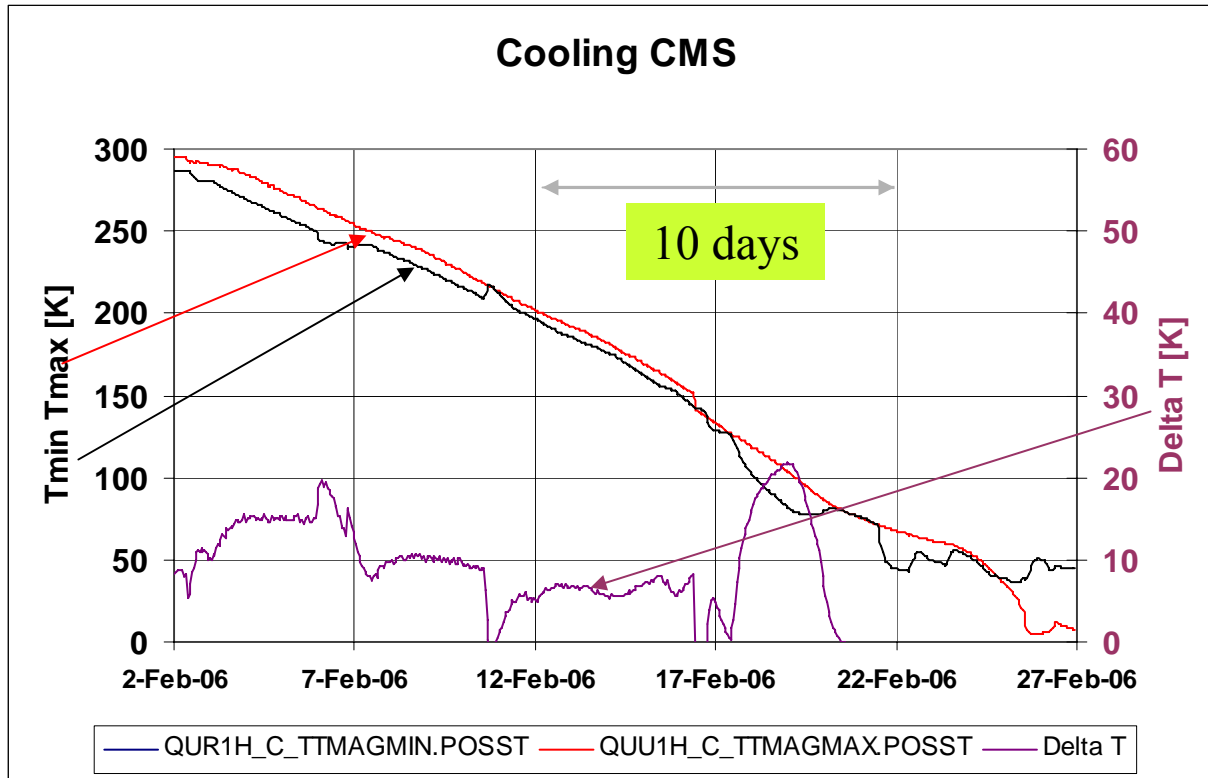
- **Pas de mesure** (500 W estimés)
- **Total: 6400 W + 2600 W + 500 W + 1900 W** (estimation interfaces)  
= **11400 W** (20 kW de réfrigération)

### CMS solénoïde

- **1100 W\*** (3000 W estimés)      \* **mesures préliminaires**

# Cooldown of CMS Solenoid

1.5 kW @ 4.5 K refrigerator used

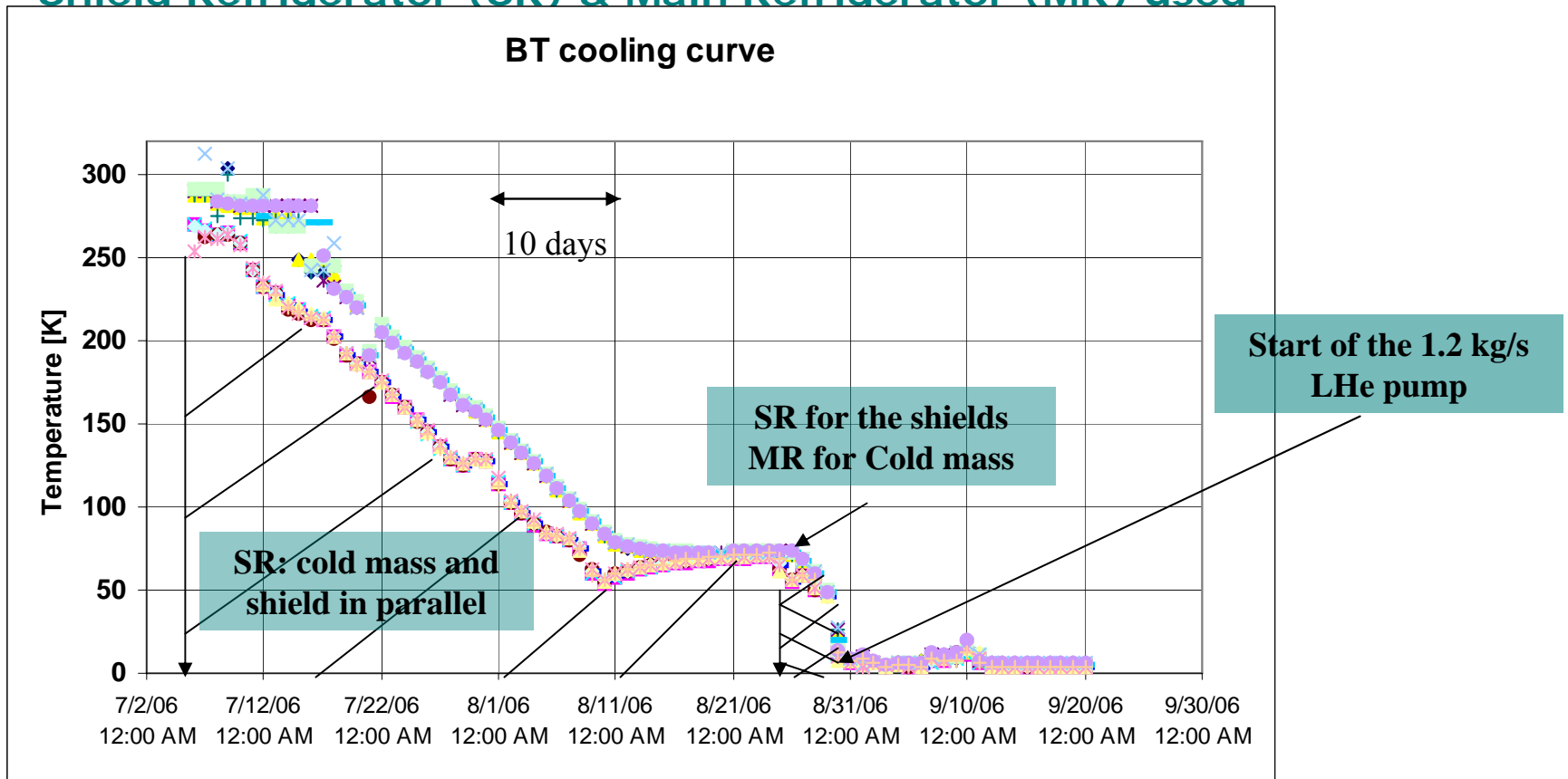


DT < 22K

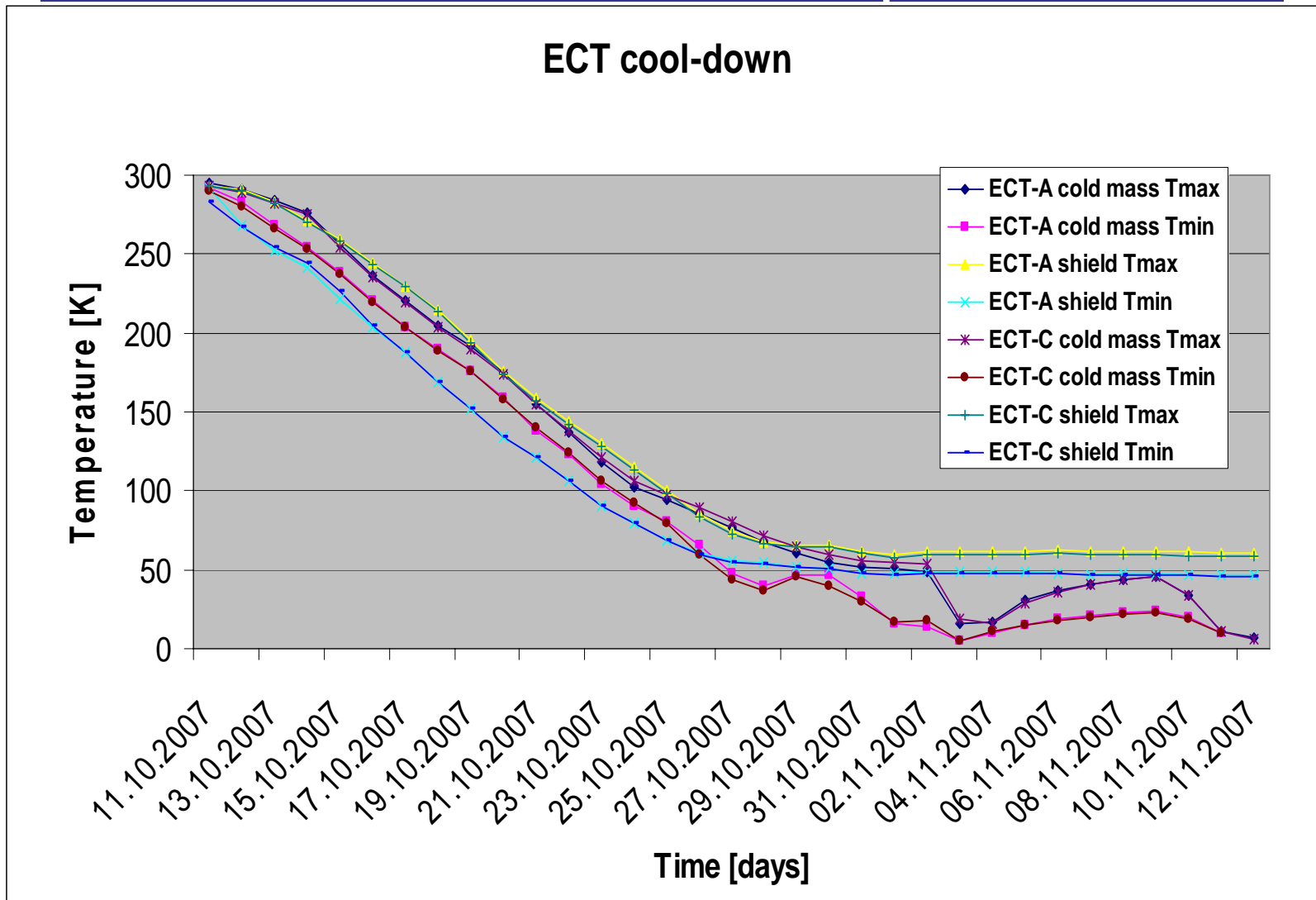
Cooling Time ca.  
22 days

# Cooldown of ATLAS Barrel Toroid

## Shield Refrigerator (SR) & Main Refrigerator (MR) used



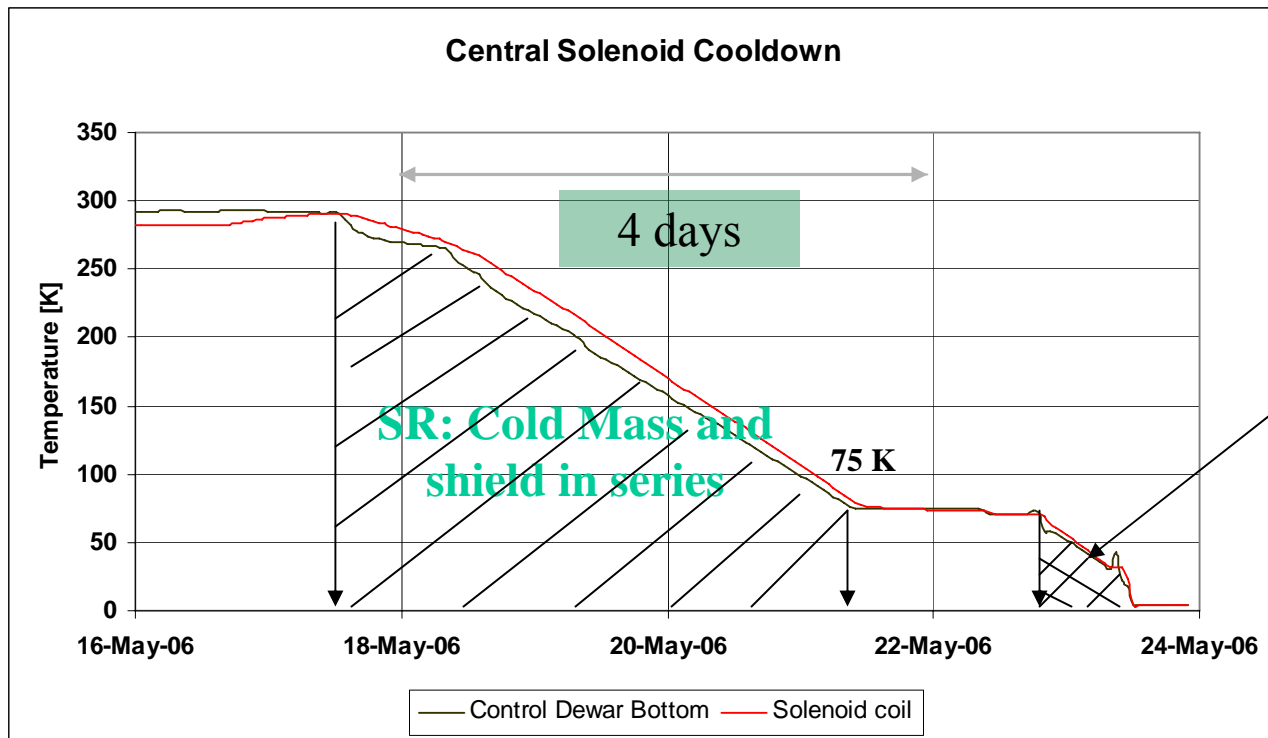
# Cooldown of ATLAS End-Cap Toroid



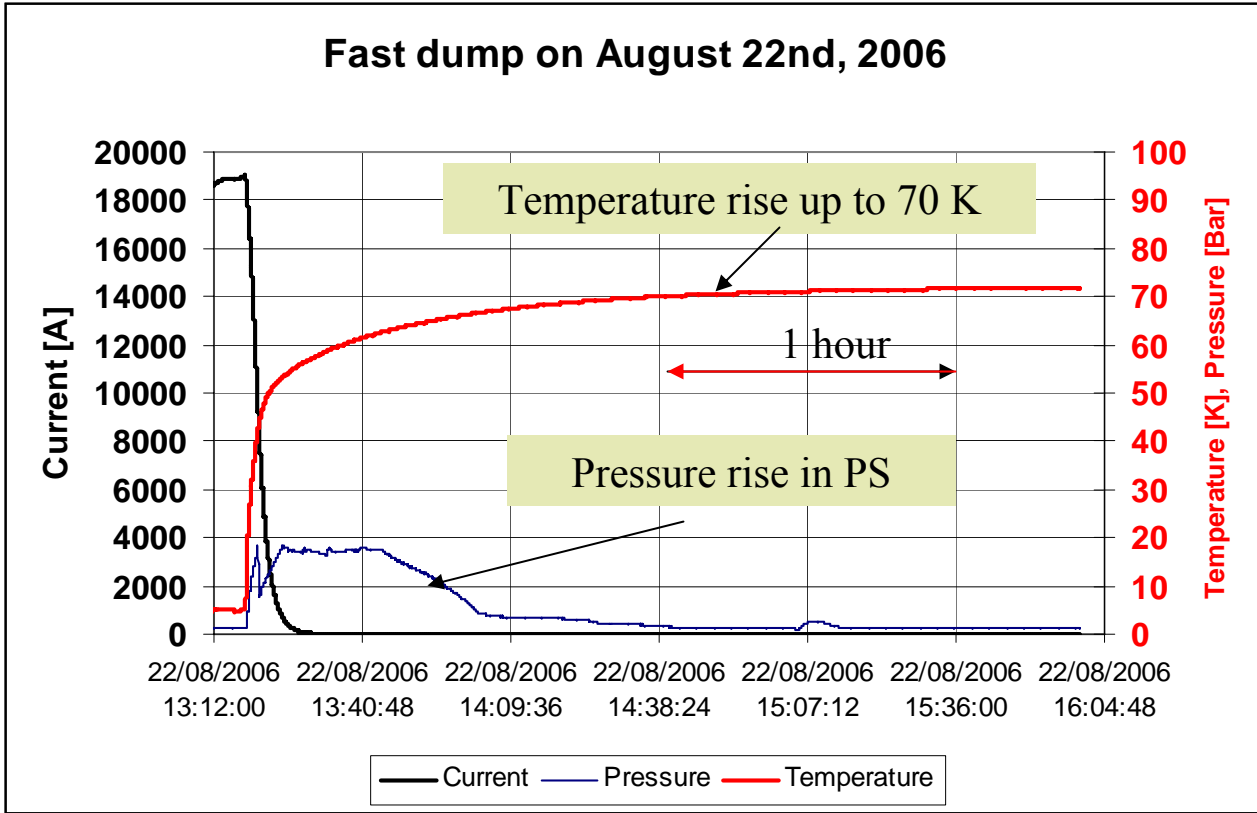


## Cooldown of ATLAS Central Solenoid

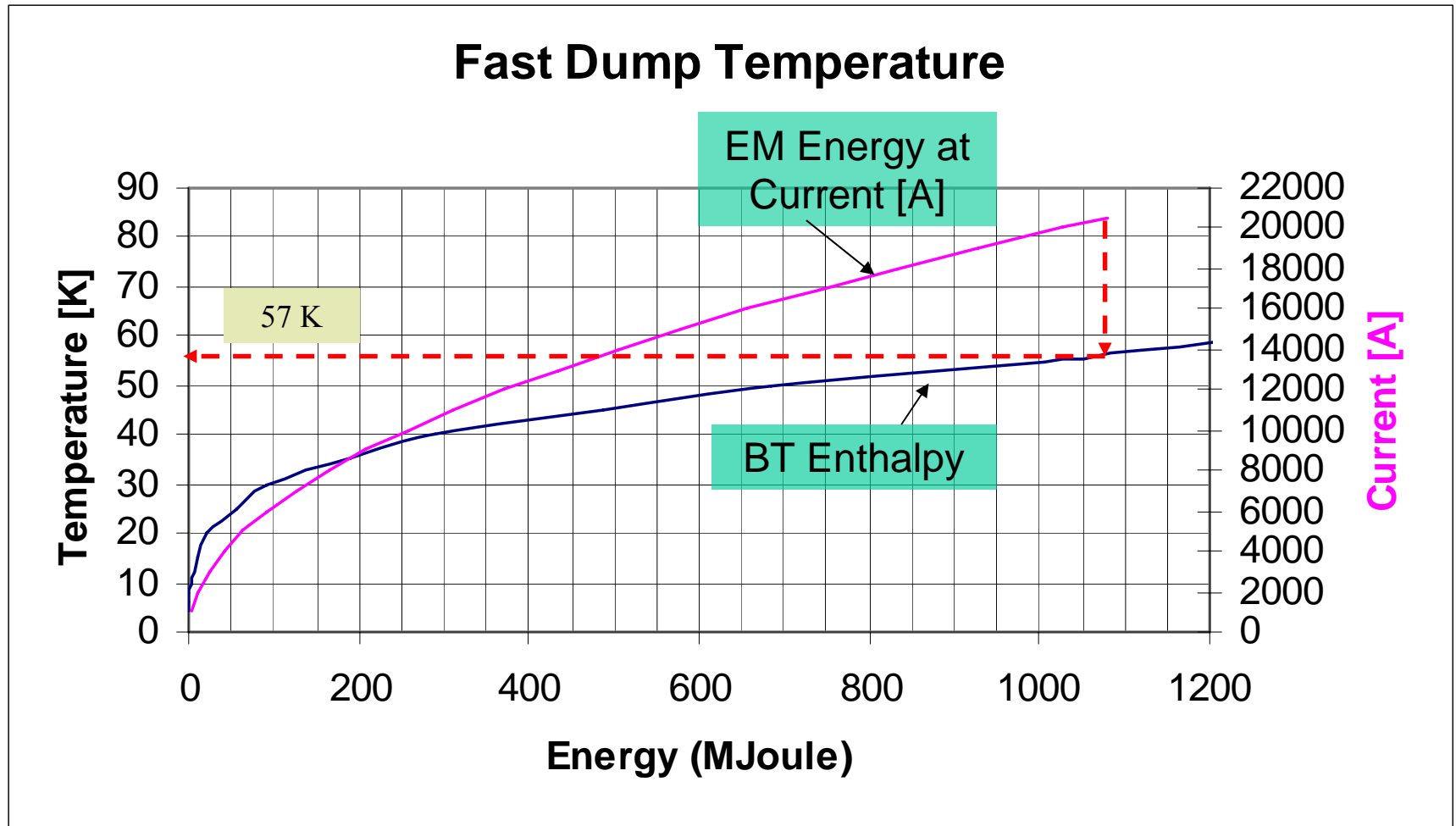
Shield Refrigerator (SR) & Main Refrigerator (MR) used



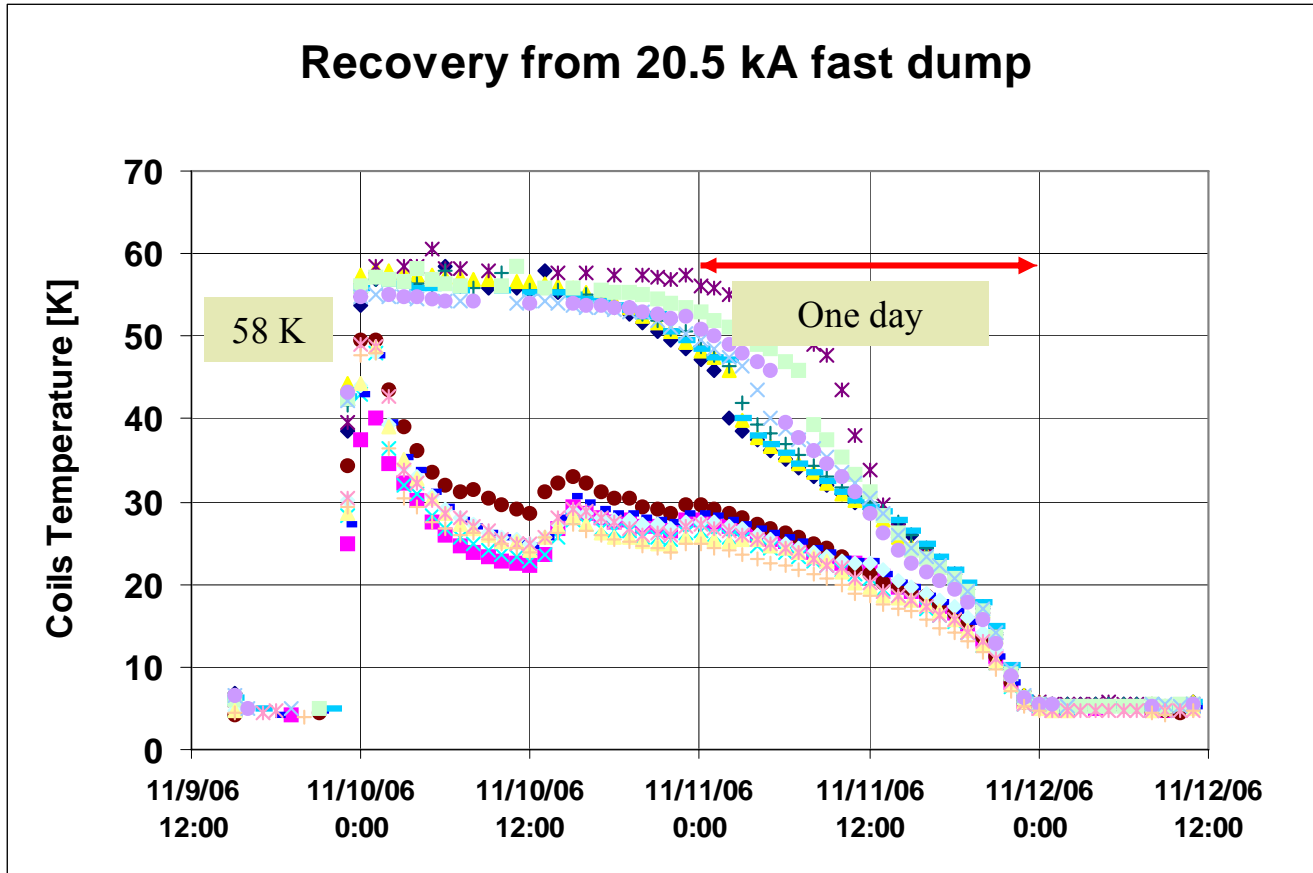
# Fast energy discharge of CMS Solenoid



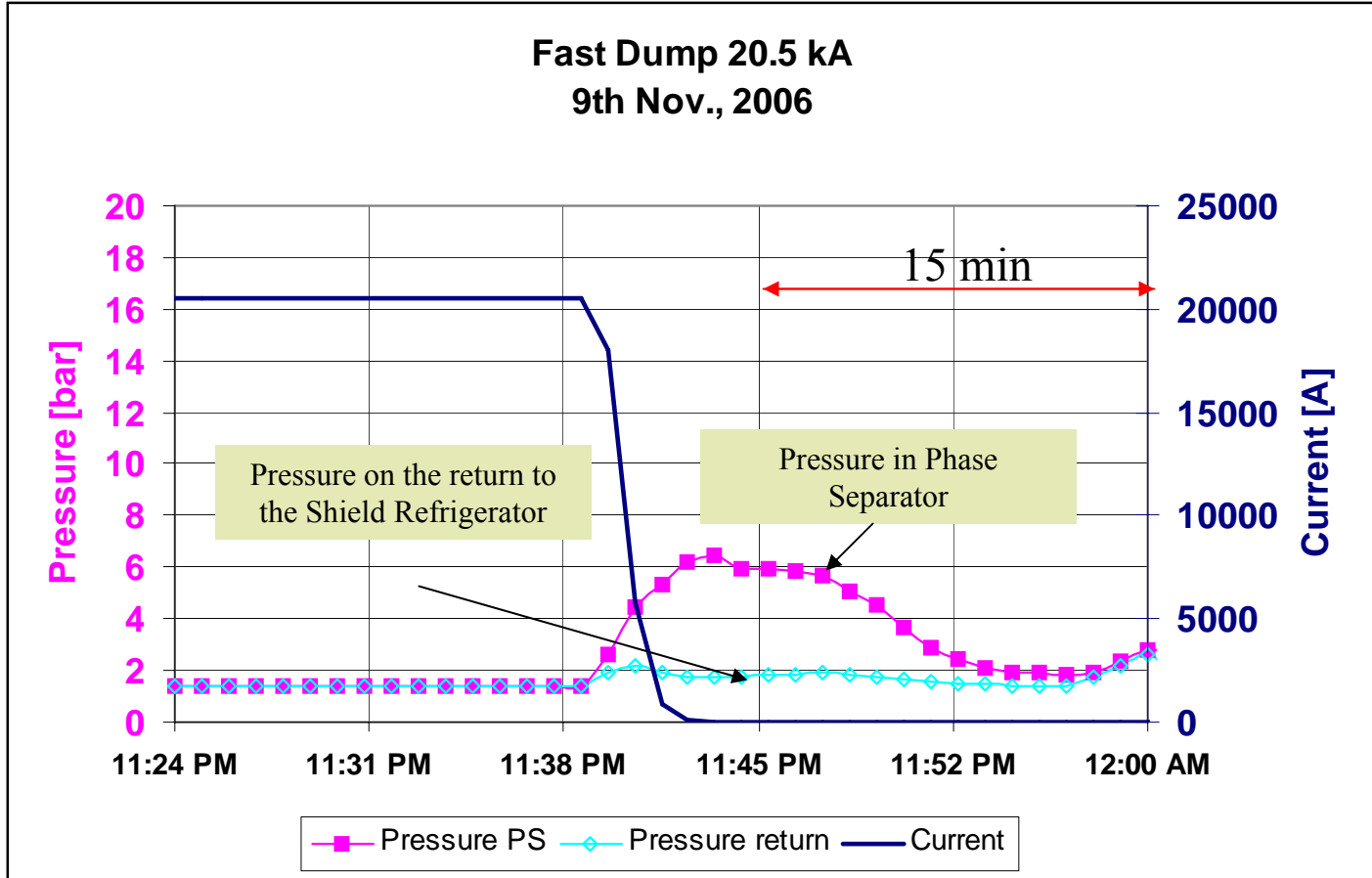
## Temperature rise during fast discharge of BT



## Temperature recovery after fast discharge of BT

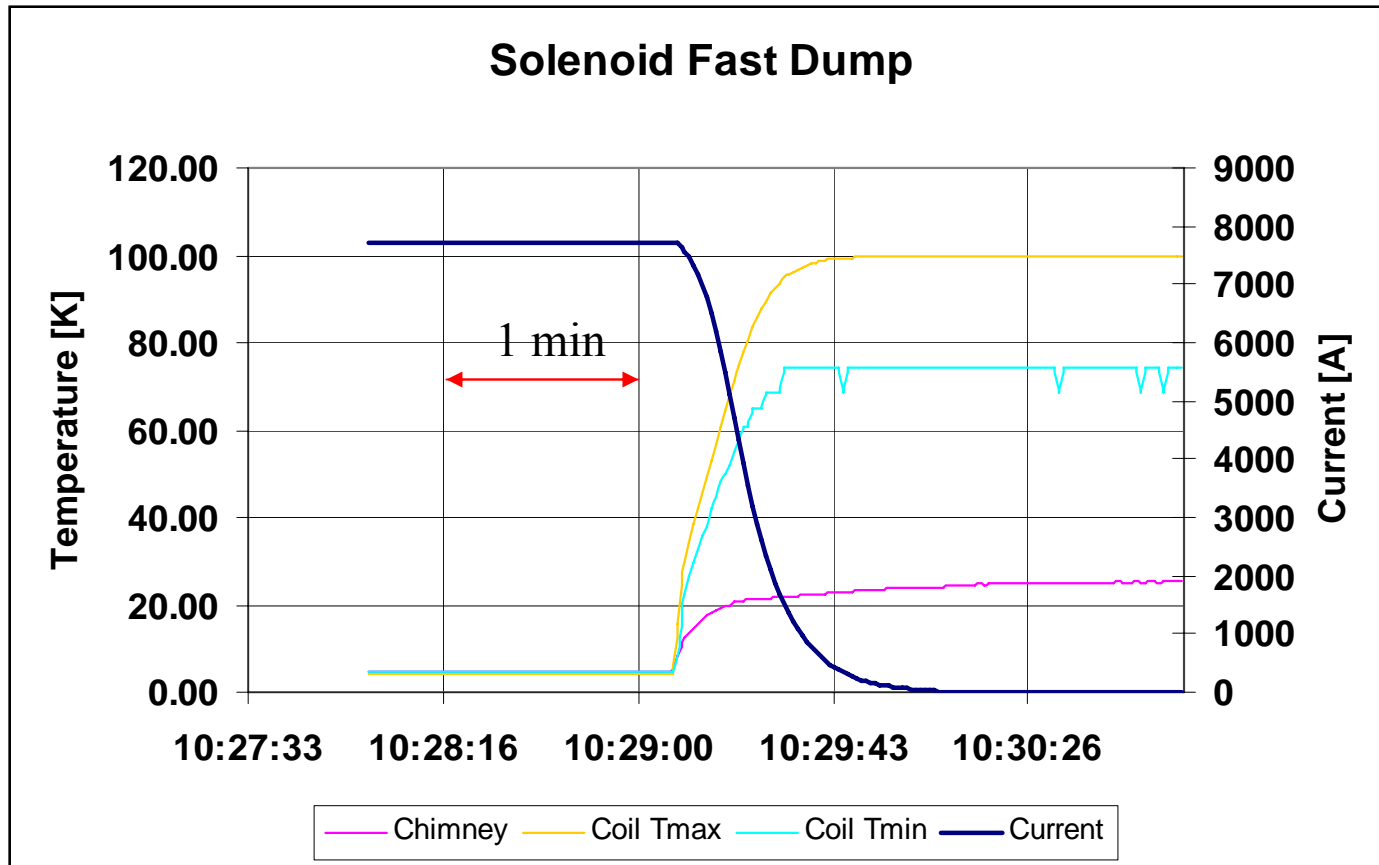


# Pressure rise during fast discharge of BT

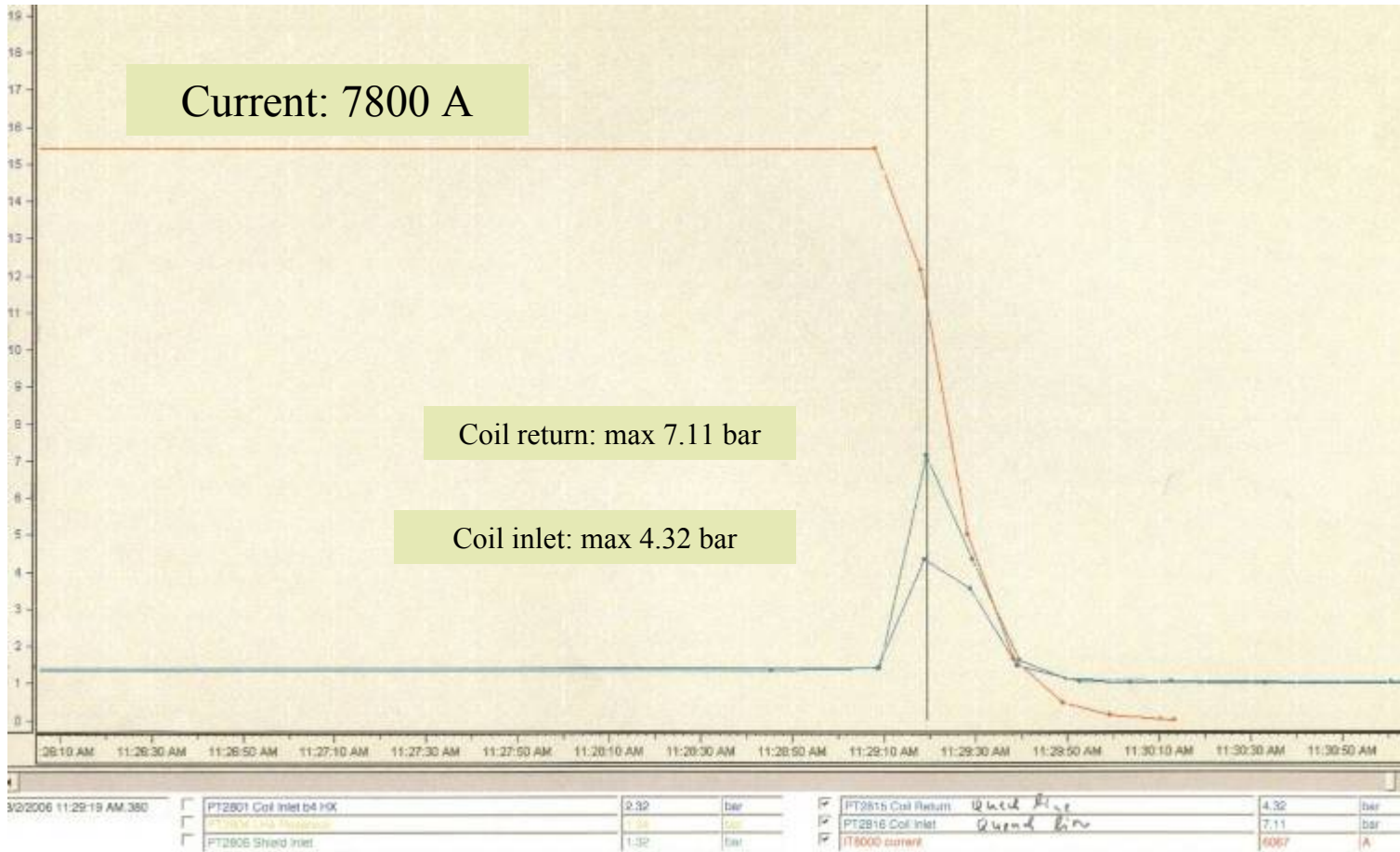




## Temperature rise during fast discharge of CS

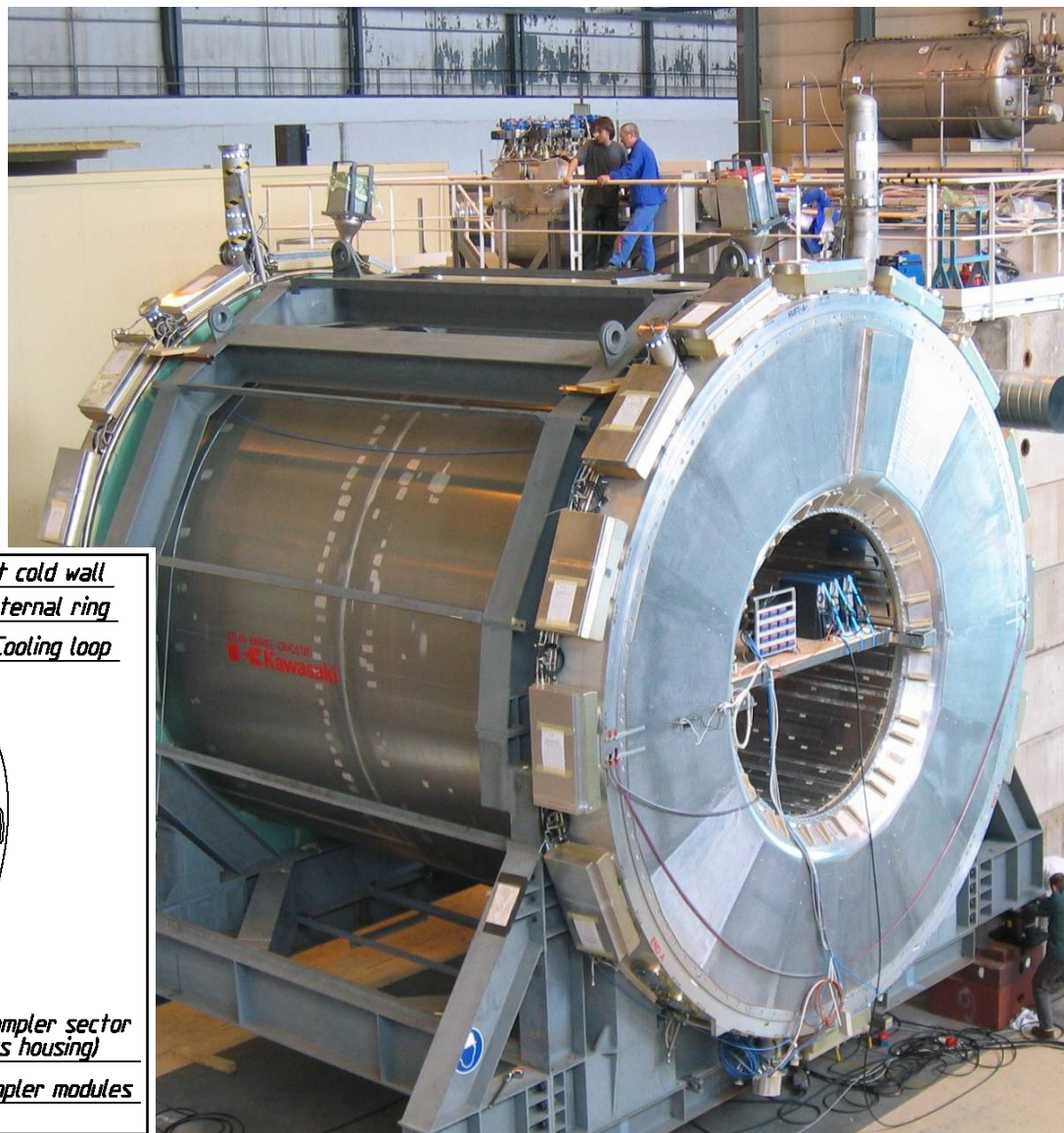


# Pressure rise during fast discharge of CS

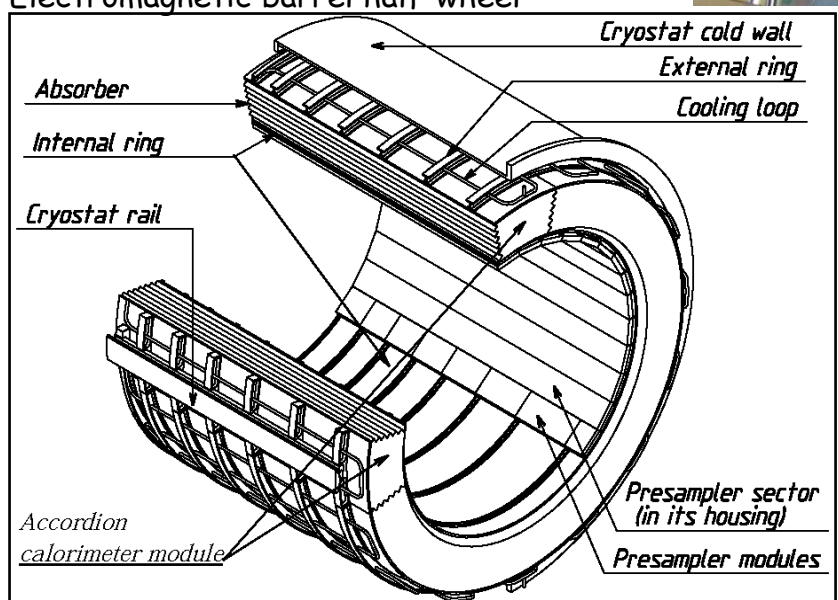


## Liquid argon Barrel Calorimeter

- D: 4.3 m; L:6.5 m
- Weight: 120 t
- Argon volume: 40 m<sup>3</sup>

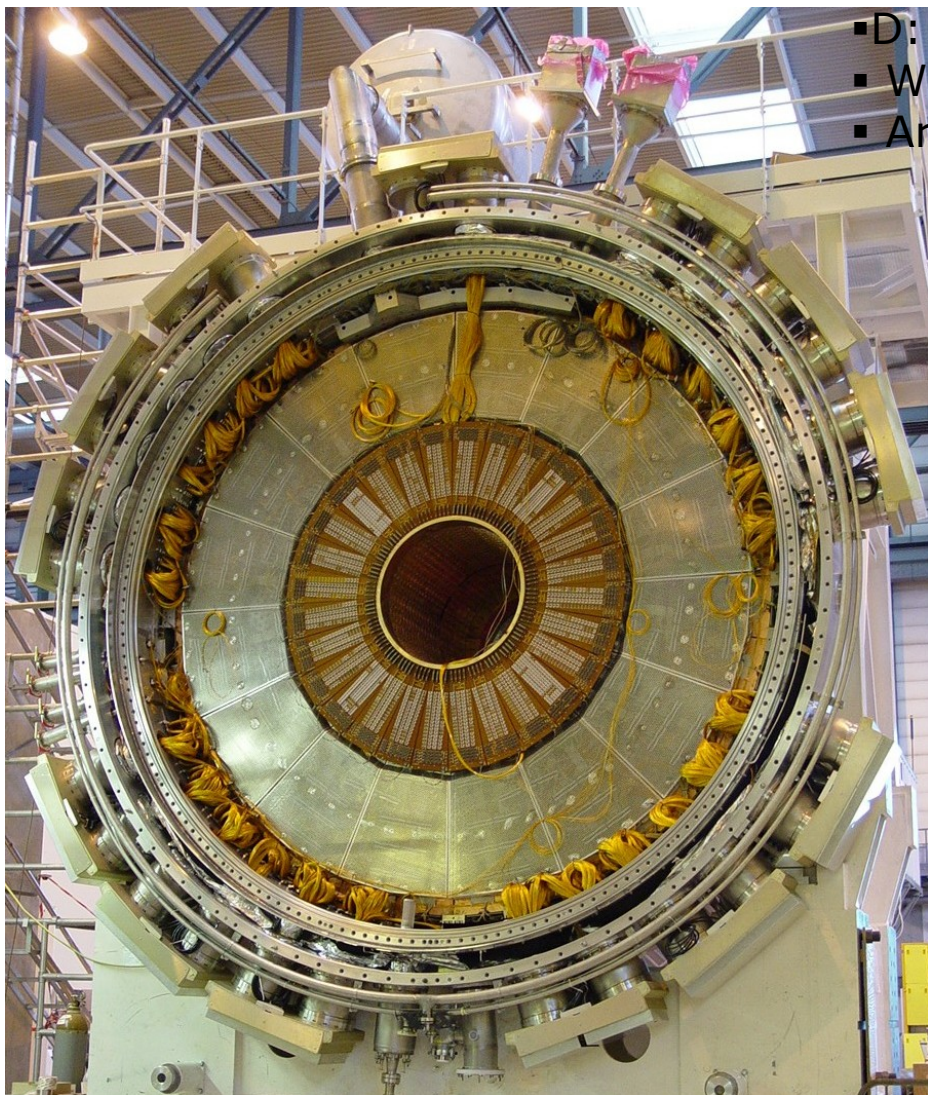


Electromagnetic barrel half-wheel

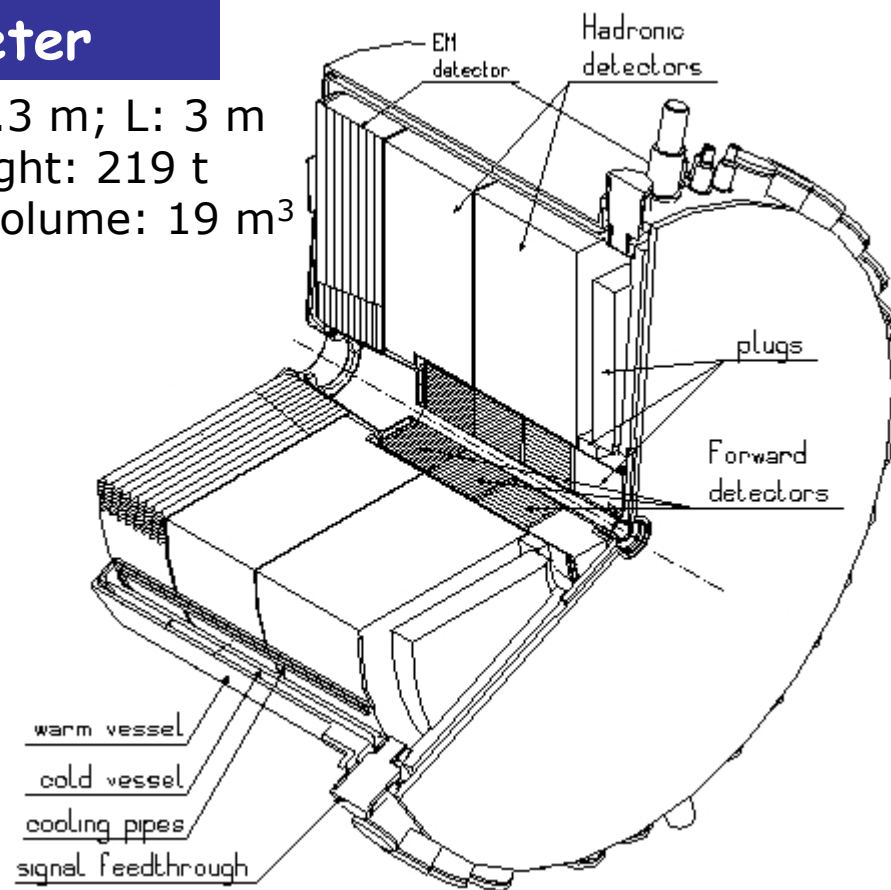




# Liquid argon End-Cap calorimeter



- D: 4.3 m; L: 3 m
- Weight: 219 t
- Ar volume: 19 m<sup>3</sup>

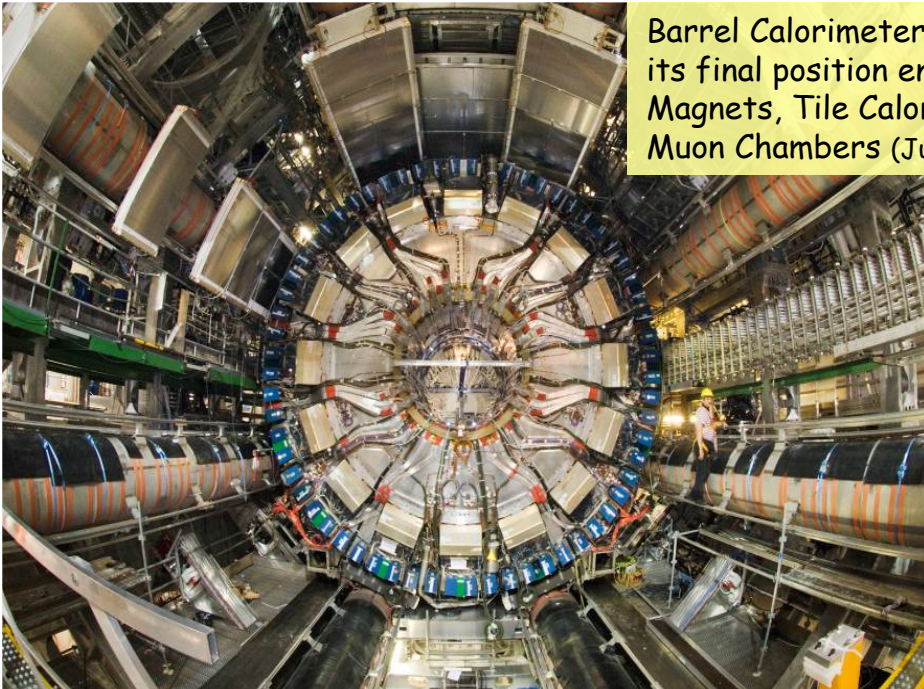


Calorimeters are highly complicated composite structures made of copper, lead, stainless-steel and glass-epoxy... placed in aluminium cryostats

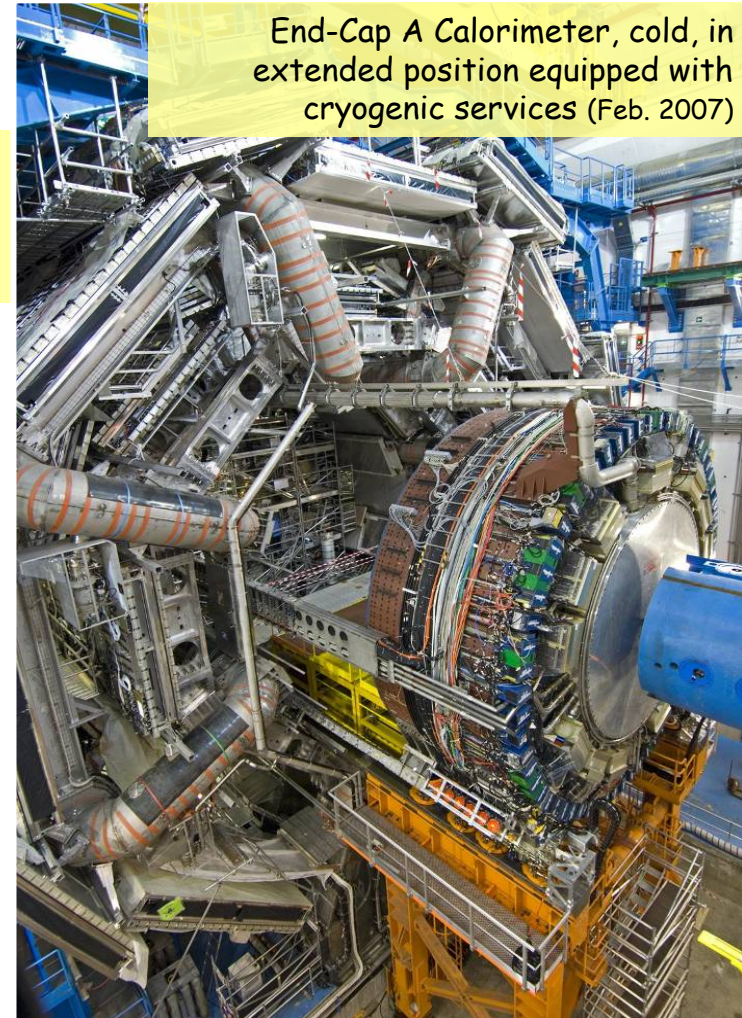


## Liquid argon ATLAS calorimeters

Barrel Calorimeter in operation in its final position encircled by BT Magnets, Tile Calorimeter and Muon Chambers (July 2006)



End-Cap A Calorimeter, cold, in extended position equipped with cryogenic services (Feb. 2007)







## Principes conceptuels et spécifications du système cryogénique pour les calorimètres (1)

### Cryogénie interne

- Pas de formation de gaz. Liquide **sous-refroidi** par pression hydrostatique et échangeurs. T à 88K
- Gradient de température à travers le bain < **0.7 K**
- Pureté argon liquide < **2ppm O2** équivalent
- Refroidissement par échangeurs parallèles immergés:  
6 (Barrel)+2x2 (End-Caps)+3 (vases d'expansion)=**13 échangeurs**
- Ecoulement azote **diphase**. Débit forcé par pompe 200 g/s
- Ecart maximum de température entre **limites strictes** pendant mise en froid (<10...40 K): **7** critères pour Barrel, **11** critères pour End-Caps

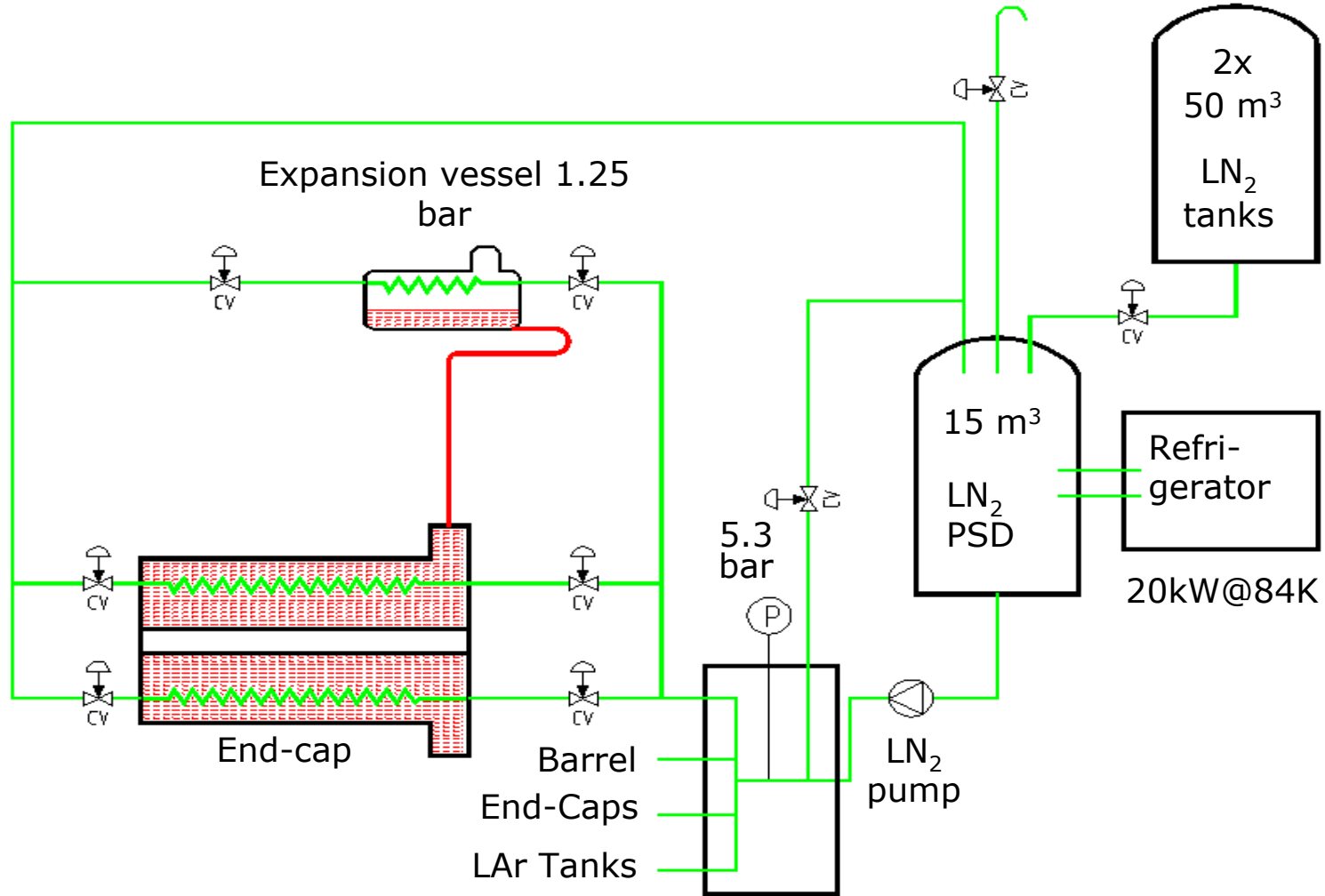


## Principes conceptuels et spécifications du système cryogénique pour les calorimètres (2)

### Cryogénie externe

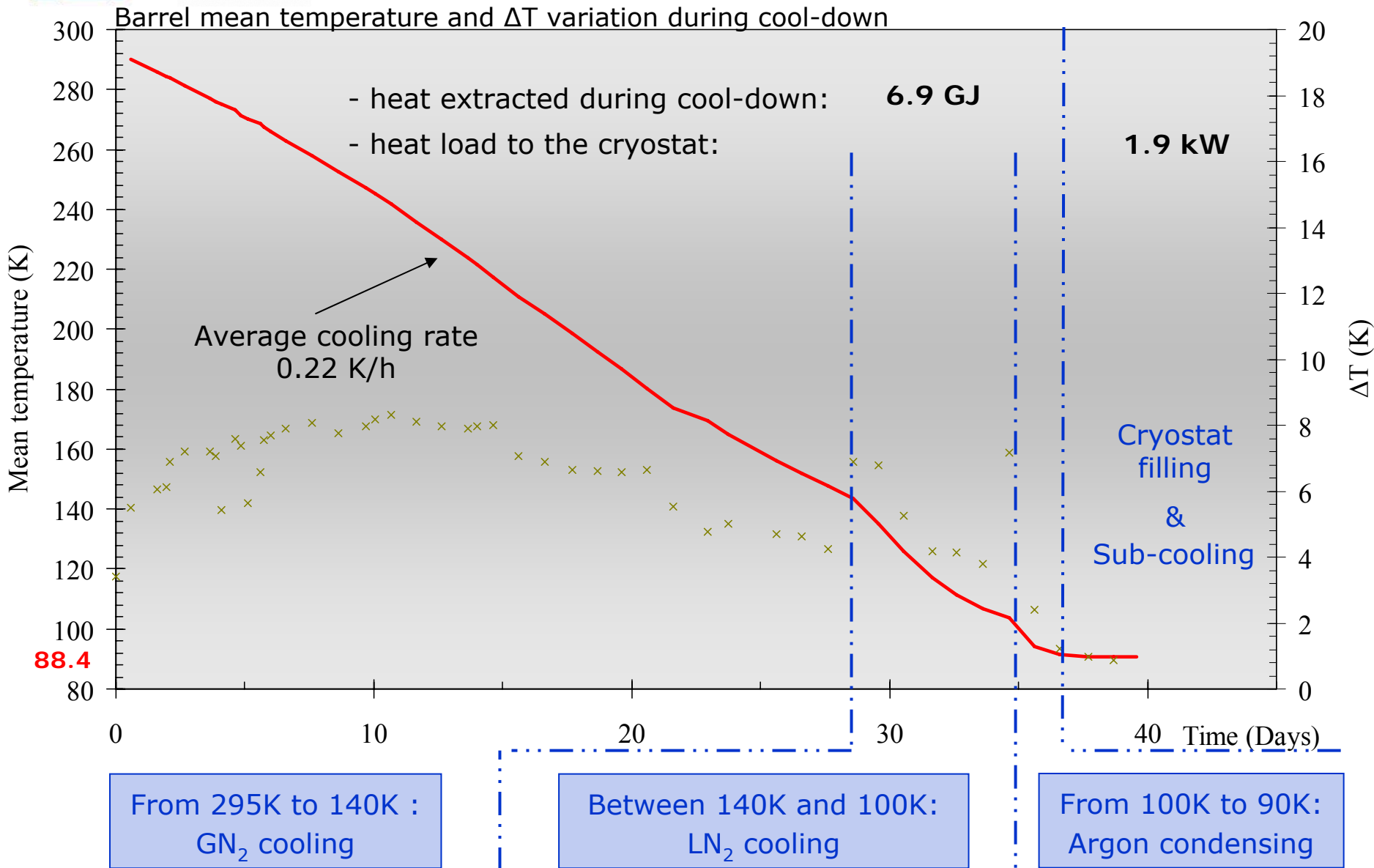
- Calorimètres à **< 100 K** pendant **10 ans** sans interruption
- Temps de mise en froid pas critique
- Système cryogénique et services redondants
- Possibilité de déplacer longitudinalement les cryostats End-Cap de **12 mètres** avec cryogénie opérationnelle

# LAr calorimeter principle cooling scheme

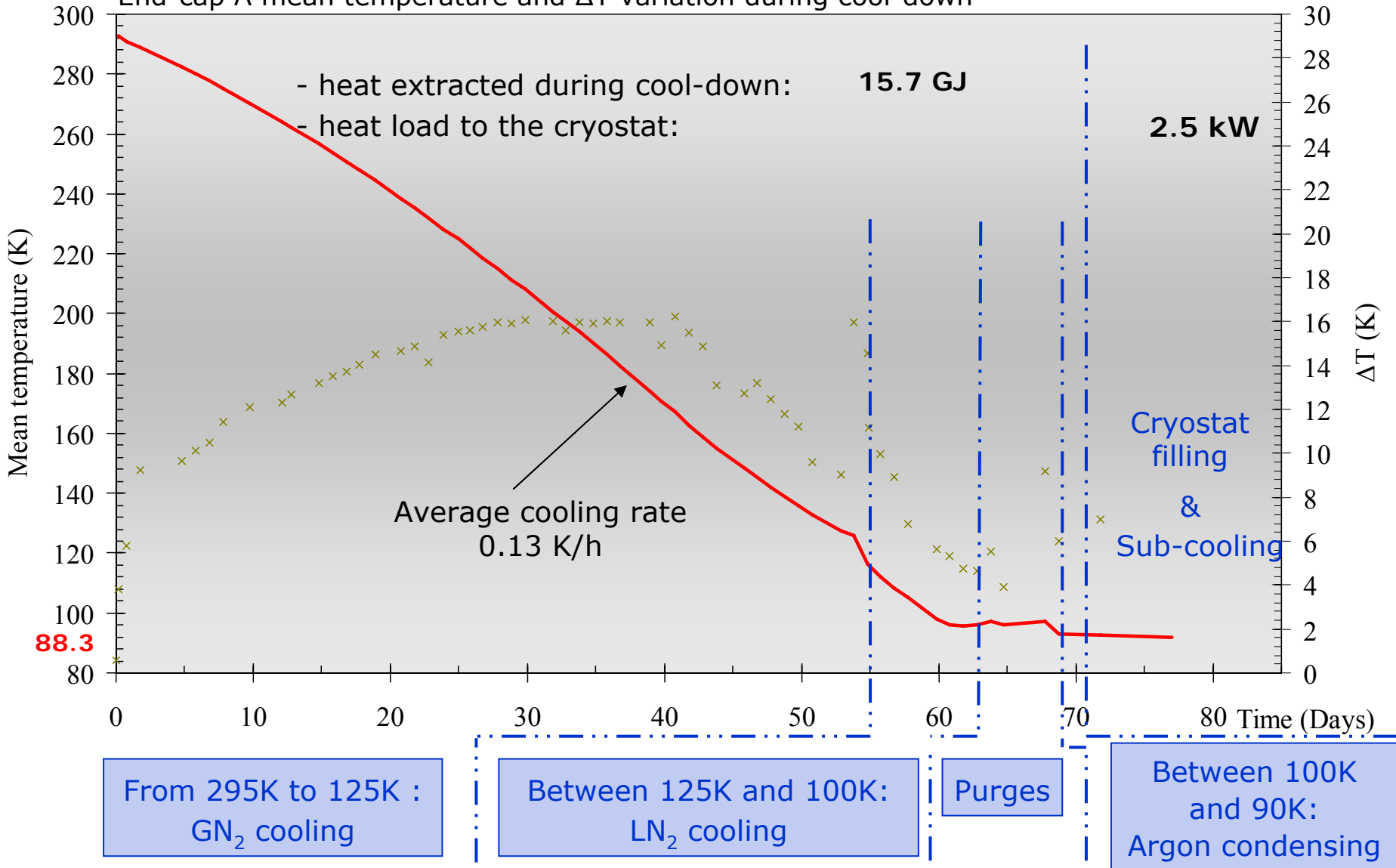




# Cool-down of Barrel calorimeter



End-cap A mean temperature and  $\Delta T$  variation during cool-down







## Bilan des charges thermiques

- Cryostats:

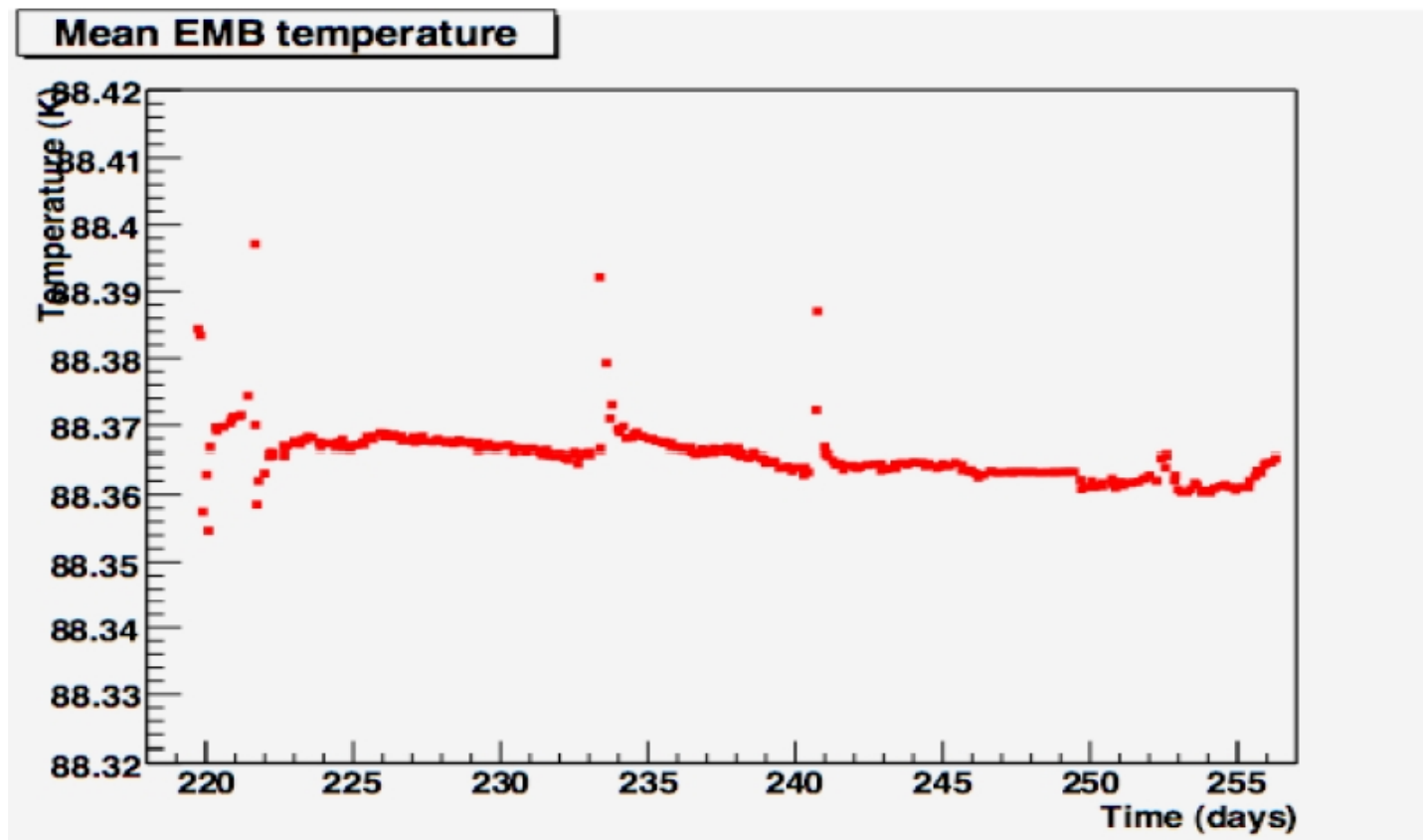
	Barrel	End-Cap
	2 kW	2.1 kW X 2 <i>estimé</i>
	<b>1.9 kW</b>	<b>2.5 kW x 2 mesuré en surface*</b>
50% feedthroughs		25% électronique
- Total:

	12.0 kW	<i>estimé</i>
installation finale	<b>11.5 kW</b>	<i>mesuré</i>

\* Avec corrections pour charges externes

## Steady state conditions Barrel calorimeter

- Liquid argon bath subcooled by **3.5 K to 7.0 K**
- Temperature uniformity over detector volume: **70 mK RMS**
- Temperature stability: **10 mK**
- Argon purity: between **0.1 and 0.3 ppm** of O<sub>2</sub>-equivalent

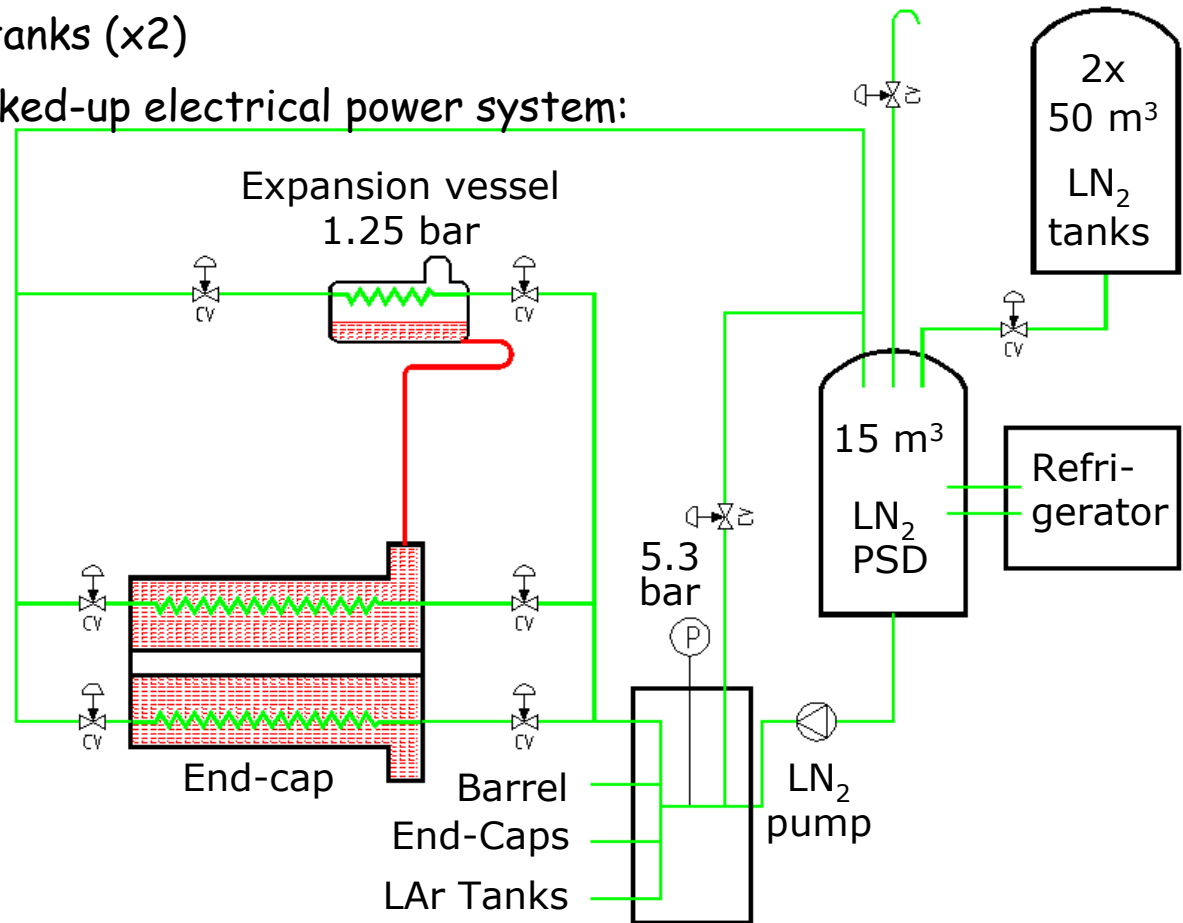


Stability in days since 1st January

# Uninterrupted functioning for 10 years (1)

## Redundancies :

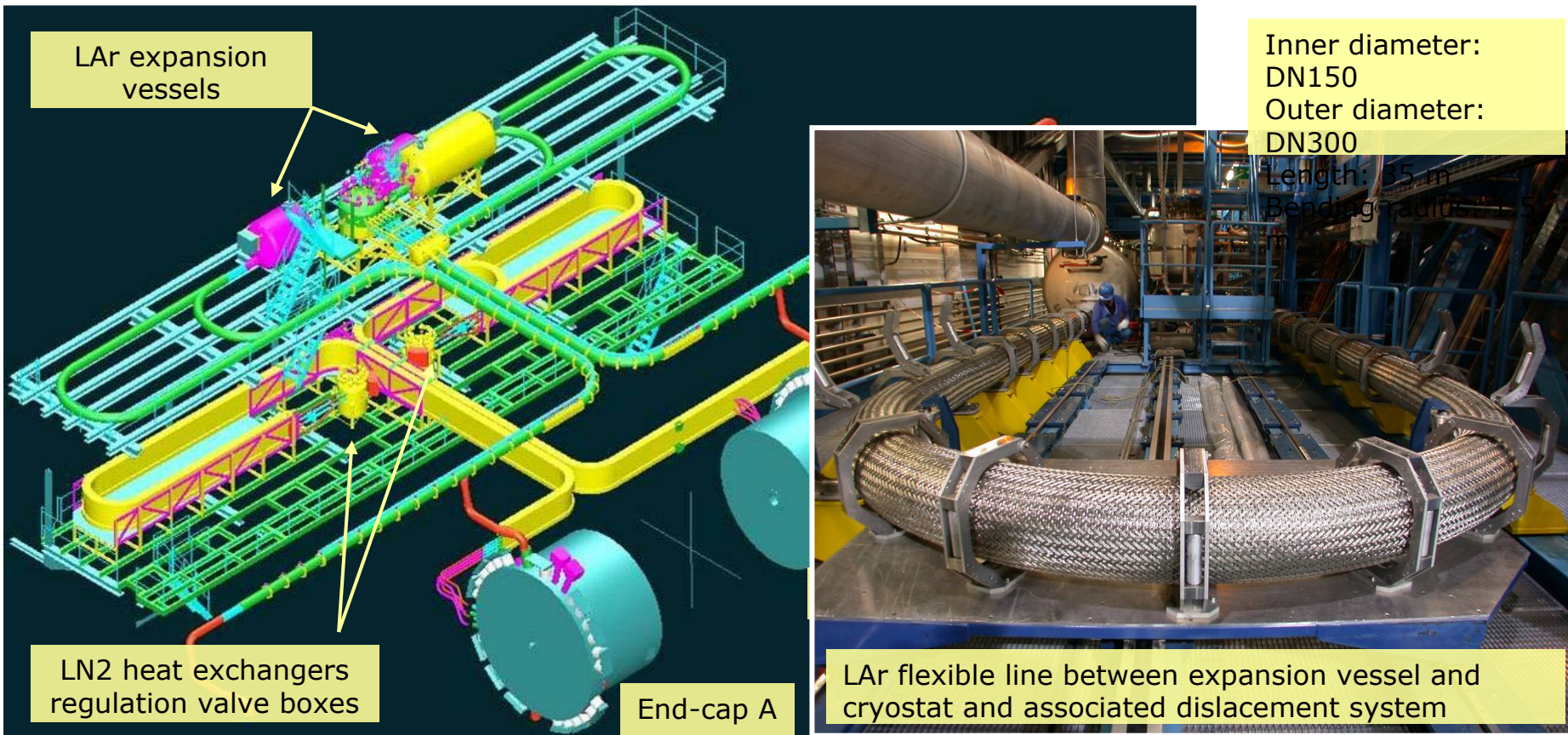
- LN<sub>2</sub> pumps (x3)
- refrigerator + LN<sub>2</sub> supply tanks (x2)
- all essential devices on backed-up electrical power system:
  - EDF/EOS network
  - diesel generators
  - UPS
- compressed air and cooling water backed up



## 12 meter longitudinal movement of the end-cap cryostats :

Cryogenic lines between expansion vessel and cryostat  
Transfer-line supplying LN<sub>2</sub> to the heat exchangers  
Signal cables and compressed air pipes

designed to follow  
this movement



LAr expansion vessels

LN<sub>2</sub> heat exchangers  
regulation valve boxes

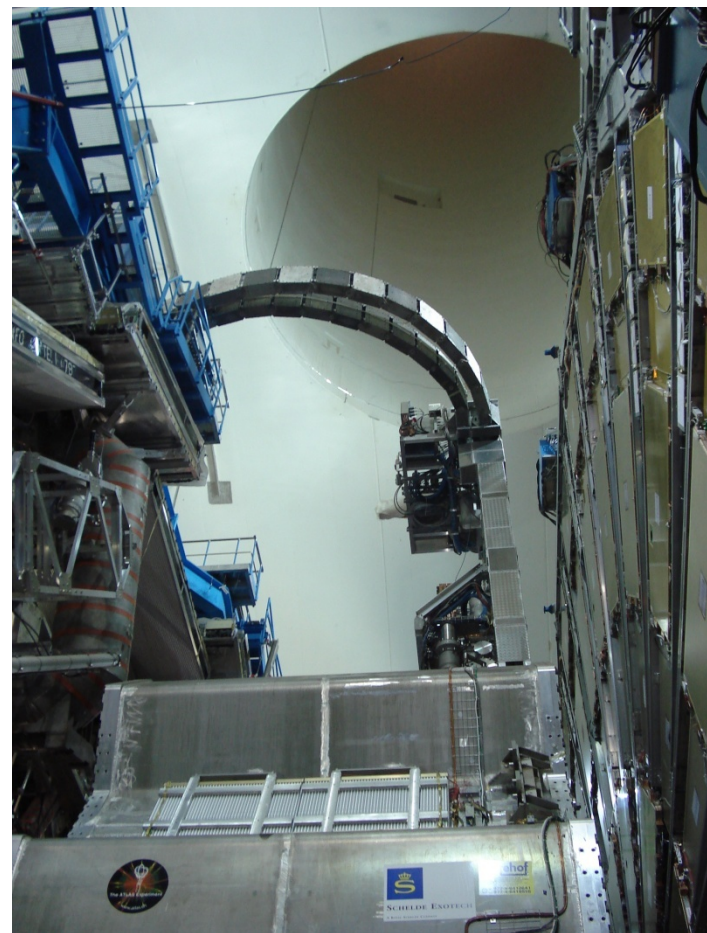
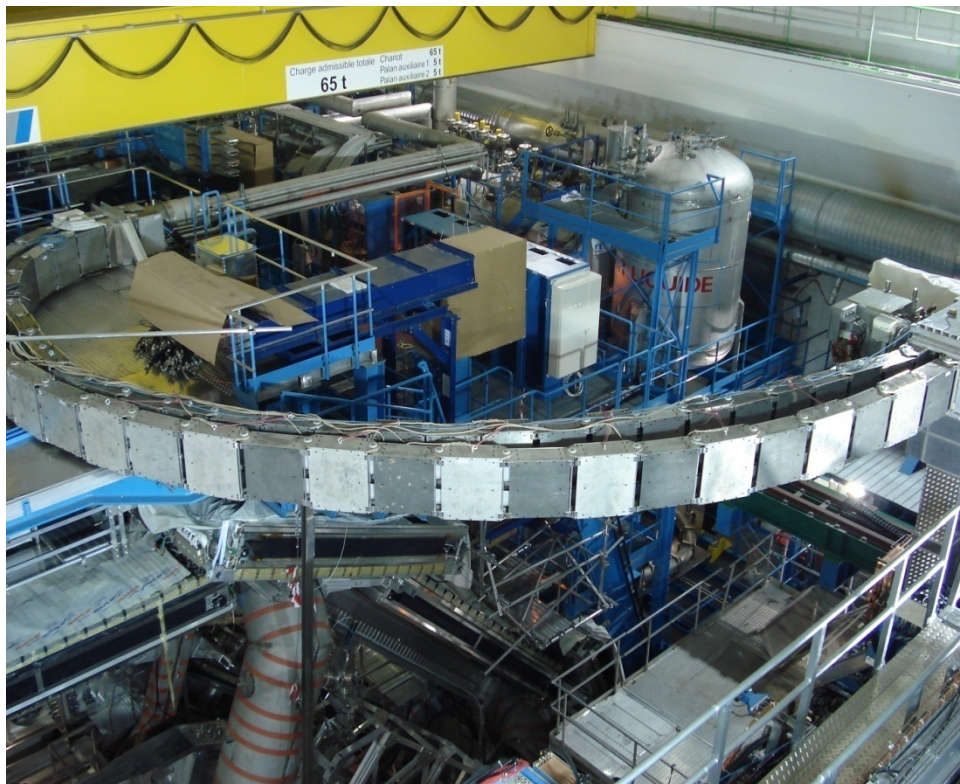
End-cap A

Inner diameter:  
DN150  
Outer diameter:  
DN300  
Length: 35 m  
Bending radius:

LAr flexible line between expansion vessel and  
cryostat and associated displacement system



# Systeme de guidage des TLs des aimants End-Cap

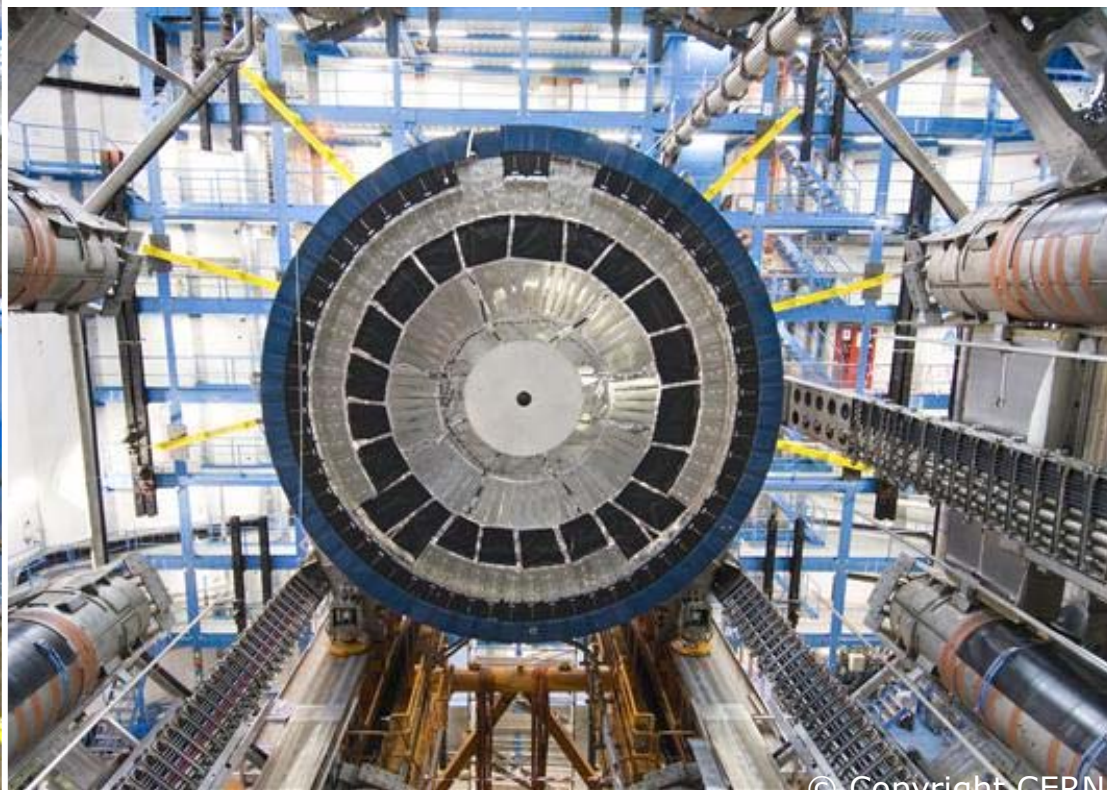
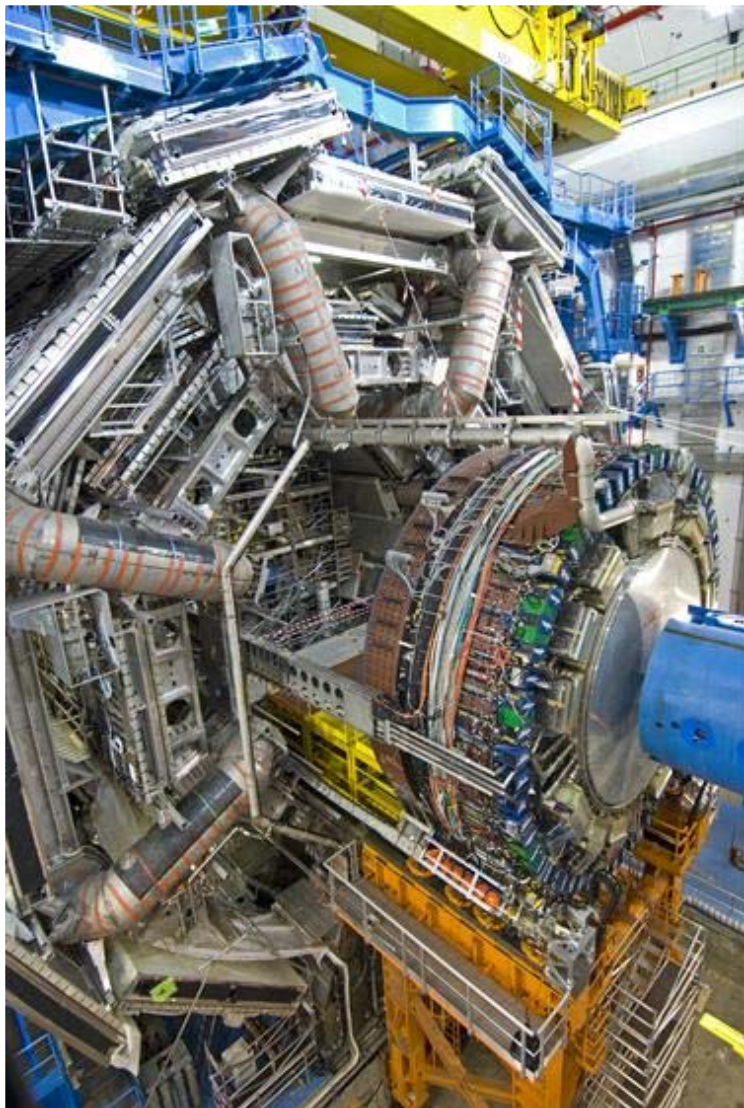




## Uninterrupted functioning over 10 years (3)

First displacements of end-cap A to its extreme opening position with all services connected:

- cold & empty on 17-02-2007
- filled with LAr on 21-05-2007





# CONCLUSION

- La cryogénie de CMS et ATLAS est dans sa **phase finale**
- Les résultats obtenus sont **conformes aux attentes**
- La cryogénie des trois calorimètres en parallèle a fonctionné pendant **plusieurs mois**
- L'aimant de CMS est refroidi de nouveau à **4.5 K** après son transfert avec le système cryogénique dans la caverne
- Les aimants d'ATLAS (trois toroïdes actuellement à **50 K** + solénoïde) ont été testé séparément dans la caverne et leur test dans la configuration finale est **imminent**