



***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***

**Transfert de chaleur dans les bobines
supraconductrices**

Bertrand Baudouy

10 avril 2008



Sommaire

- **Le Refroidissement des aimants supraconducteurs**
 - » La stabilité thermique des aimants
 - » Les différents types d'aimant
 - » Les modes de refroidissement
- **Transfert de chaleur dans les aimants d'accélérateur du LHC**
 - » Mode de refroidissement des aimants d'accélérateur
 - » Les transferts de chaleur dans les aimants du LHC
 - » Les nouveaux systèmes d'isolation électrique
- **Transfert de chaleur dans l'aimant du détecteur CMS**
 - » Mode de refroidissement des aimants de détecteur
 - » Refroidissement par écoulement « thermosiphon » en hélium
 - » Le refroidissement de l'aimant de CMS



Transfert de chaleur dans les bobines supraconductrices

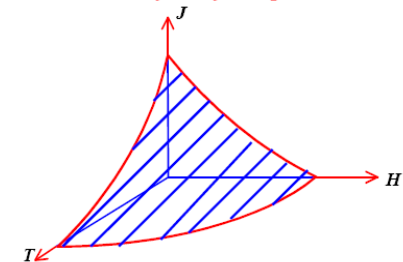
- **Le Refroidissement des aimants supraconducteurs**
 - » La stabilité thermique des aimants
 - » Les différents types d'aimant du point de vue de la cryogénie
 - » Les modes de refroidissement
- **Transfert de chaleur dans les aimants d'accélérateur du LHC**
 - » Mode de refroidissement des aimants d'accélérateur
 - » Les transferts de chaleur dans les aimants du LHC
 - » Les nouveaux systèmes d'isolation électrique
- **Transfert de chaleur dans l'aimant du détecteur CMS**
 - » Mode de refroidissement des aimants de détecteur
 - » Refroidissement par écoulement « thermosiphon » en hélium
 - » Le refroidissement de l'aimant de CMS

La stabilité thermique des aimants

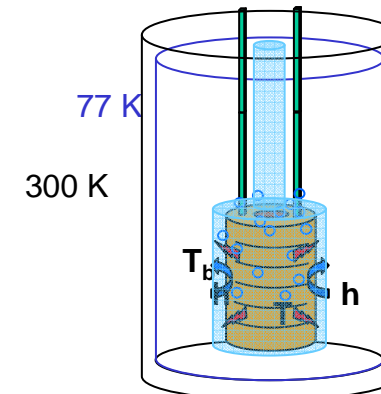
Maintenir la température du bobinage inférieure à T_c (H, I)

- **Vis-à-vis des apports permanents (Q_p)**
 - » Conduction par les amenées de courant, éléments de structure et support
 - » Dissipation volumique comme « Pertes faisceau » (DC) ou « AC losses » (AC)
 - » Rayonnement
- **Vis-à-vis des perturbations transitoires (Q_t)**
 - » Transition Supra/Norm localisée
 - » « Quench » de l'aimant
 - » Déplacement de conducteur, crac de résine, ...
- **Avec une puissance de réfrigération (Q_R)**
 - » $Q_R = h \cdot (T - T_b) \cdot p / A$ avec fluides cryogéniques
 - » Q_R = puissance du cryogénérateur
- **En fonctionnement, à H (T) et J (A/m^2) fixés,**
 - » Le supraconducteur employé impose T_c , C et k
 - » Apports thermiques estimés : Q_p et Q_t (W)
 - » Une géométrie par construction: A (m^2), périmètre mouillé, p (m)
 - » **T_b et le mode de refroidissement (h)** pour $T < T_c$
- **Le transfert de chaleur entre la bobine et la source de froid détermine la marge en température**

Critical Surface of a Superconductor

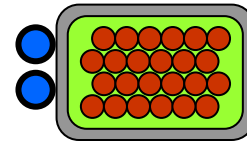
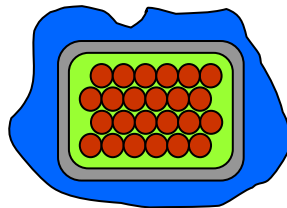


$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k(T) \vec{\nabla} T) = Q_p + Q_t - Q_R$$

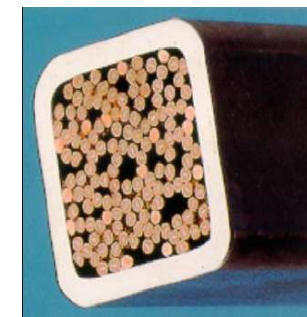
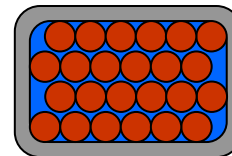
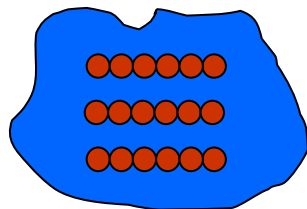


Les différents types d'aimant

- **Aimant « sec »** *Pas de contact en le fluide cryogénique et le conducteur*
 - » Conduction dans l'aimant
 - » Bain ou écoulement d'un fluide externe au bobinage (**CMS**, ATLAS, ...) ou Cryogénérateur



- **Aimant « mouillé »** *Contact entre le fluide cryogénique et le conducteur*
 - » En bain : Fluide monophasique stagnant **He II** (Tore Supra, Iseult, **LHC**, 45T NHMFL)
 - » En écoulement : Fluide monophasique **HeS** (W7X, ITER, SIS, ...)

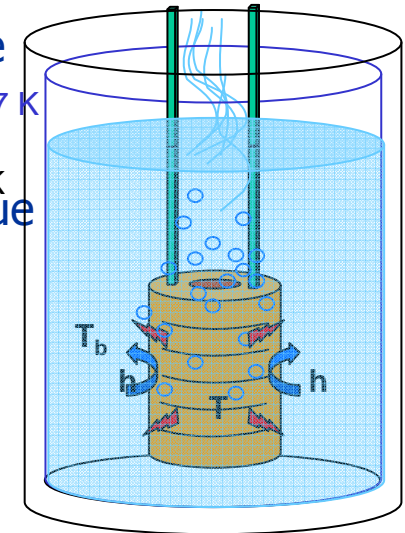


- **Aimant « cryostable »** ou « **adiabatique** »
 - » Cryostable quelque soit le scénario $Q_R > Q_p + Q_t$ (Iseult, Tore Supra, ...)
 - » Adiabatique : lors d'un quench, l'aimant ne dialogue pas avec la source froide (**CMS**, ...)

Les modes de refroidissement : les bains

- **Bain saturé (P=1 Atm et T_{sat})**

- » Simplicité pour la conception et fonctionnement de la cryogénie
- » Refroidissement par chaleur latente de vaporisation $T = \text{cste}$ 77 K
- » Refroidissement non uniforme dû à la formation de vapeur
- » ΔP important lors de quench dû au volume de fluide cryogénique 300 K
- » Transfer de chaleur en ébullition nucléée
 - He : $q_{\text{max}} \approx 10^4 \text{ W/m}^2$ for $\Delta T \approx 1 \text{ K}$
- » Grand aimant unique ou système compact (He $\sim 1 \text{ W/m}$)



- **He II pressurisé (T < 1,9 K et P = 1 Atm)**

- » Design et opération de la cryogénie coûteux et plus compliqués
- » Échangeur de chaleur He II sat / He II p
- » Optimisation des sections de transport de la chaleur entre le câble et la source froide
- » Transfert de chaleur ($k \approx 10^5 \text{ W/m.K}$ pour $\Delta T \approx 0,3 \text{ K}$ et He I $k \approx 0.02 \text{ W/m.K}$)
 - Résistance d'interface entre solide et He II (Cu $R_k = 3 \cdot 10^{-4} \text{ K.m}^2/\text{W}$ et Kapton $R_k = 10^{-3} \text{ K.m}^2/\text{W}$)
- » LHC $\sim 1 \text{ W/m}$, concept pouvant atteindre $\sim 10 \text{ W/m}$ avec optimisation des sections de transfert



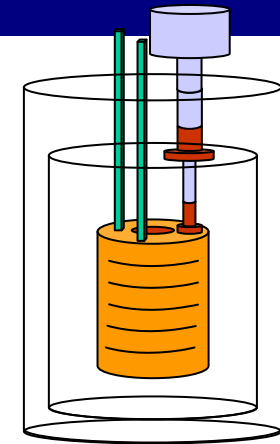
Les modes de refroidissement : les écoulements

- **Écoulement en convection forcée monophasique**
 - » Opération nécessite des systèmes de pressurisation et un refroidissement périodique
 - » Conception simple car calcul des transferts convectifs et Δp par corrélations conventionnelles
 - » Transfert : Utilisation de la chaleur sensible au prix d'une augmentation de T
 - Hélium supercritique ($\sim 0,1$ kg/s et $\sim 1-10$ W/m)
 $P \approx 3-8$ bar $T \approx 4,4$ K, $\Delta T \approx 50$ à 100 mK et $\Delta P \approx 1-2$ mbar par aimant
 - Hélium superfluide ~ 1 W/m (**Jamais utilisé !**)
Coefficient JT négatif (tube lisse, $\varnothing 10$ mm $\Delta p = 1$ kPa 5 mK)
 - » 2 W par aimant pour RHIC et 6 W par aimant pour le SSC
- **Écoulement en convection diphasique forcée ou naturelle**
 - » Mêmes avantages et inconvénients que le refroidissement en bain
 - » Opération nécessite des systèmes de pressurisation en écoulement forcé et aucun en convection naturelle
 - » Transfert de chaleur assuré par ébullition nucléée mais dégradation à fort débit
 - Convection forcée ($4,2$ K) $q_{\max} \approx 10^4$ Wm $^{-2}$ pour tube Inox de $\varnothing 10$ mm $m = 6$ gs $^{-1}$ and $\Delta T \approx 1$ K
 - Convection naturelle ($4,2$ K) $q_{\max} \approx 10^3$ Wm $^{-2}$ pour tube Inox de $\varnothing 10$ mm $m = 10-20$ gs $^{-1}$ and $\Delta T \approx 0.3$ K
 - » Convection forcée pour ATLAS et Convection naturelle pour CMS

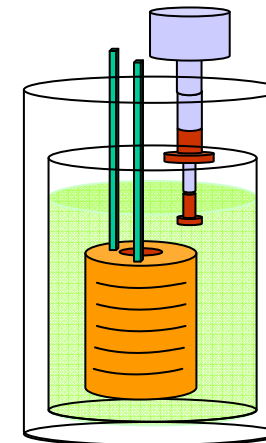
Les modes de refroidissement : la conduction

- **Cryo-générateur**

- » Conception et opération de la cryogénie plus simples
- » Limites
 - 1,5 W à 4 K mais en augmentation constante
 - 1 W à 1,8 K
- » Adapté pour petit aimant cryostable ou HTS



- » Transfert de chaleur conductif dans l'aimant ou dans un liquide/solide
- » Exemples
 - Aimant de classe 10T commercialisés depuis 1990
 - A 400-MHz NMR magnet (JASTEC, Kobe Steel, 2004)
 - Hybrid magnet SCM at Tohoku U. (2000).
 - Aimant de 18 T (MIMS, Toshiba et TIT)
 - Refroidi par CR de 1 W à 1,8 K
 - NbTi et Nb₃Sn
 - Aimants refroidis avec Cryogénérateur et solide



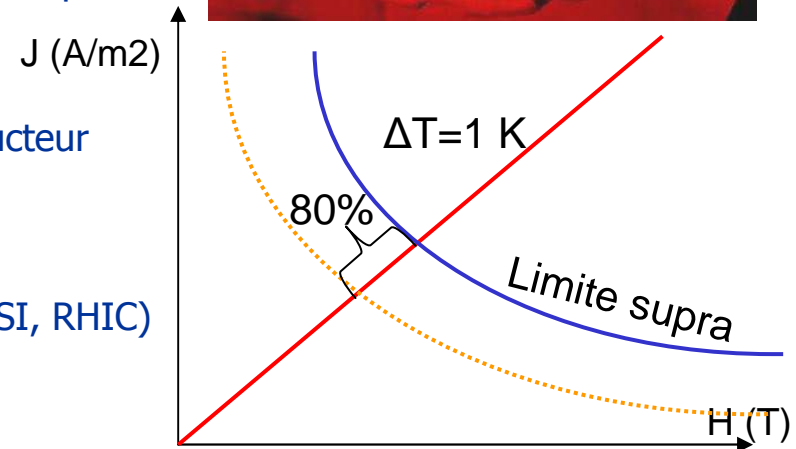
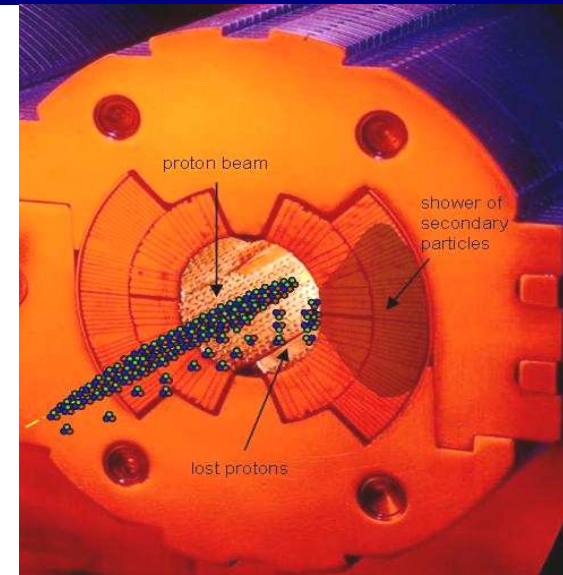


Transfert de chaleur dans les bobines supraconductrices

- **Le Refroidissement des aimants supraconducteurs**
 - » La stabilité thermique des aimants
 - » Les différents types d'aimant
 - » Les modes de refroidissement
- **Transfert de chaleur dans les aimants d'accélérateur du LHC**
 - » Modes de refroidissement des aimants d'accélérateur
 - » Les transferts de chaleur dans les aimants du LHC
 - » Les nouveaux systèmes d'isolation électrique
- **Transfert de chaleur dans l'aimant du détecteur CMS**
 - » Mode de refroidissement des aimants de détecteur
 - » Refroidissement par écoulement « thermosiphon » en hélium
 - » Le refroidissement de l'aimant de CMS

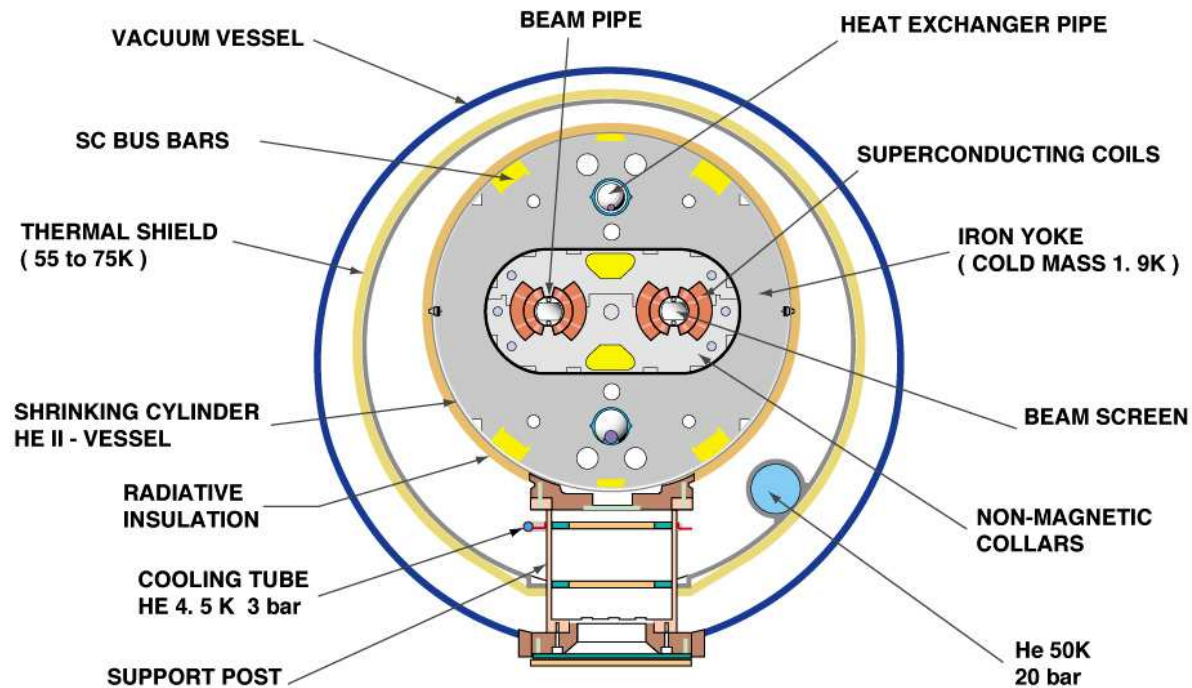
Les aimants supraconducteurs d'accélérateurs

- **Apports thermiques permanents importants**
 - » Rayonnement synchrotron pour les dipôles
 - » Pertes « faisceau »
- **Grande densité de courant pour une induction magnétique intense (10 T)**
 - » Bobine supraconductrice = Milieu confiné
- **Optimisation du bobinage car coût important dû au grand nombre d'aimants**
 - » $\Delta T \sim 1$ K (80% sur la droite de charge)
 - » Lors de Quench T^e augmente jusqu'à 300 K et pas de pb de contraintes mécaniques
- **Aimants « mouillés »**
 - » Réfrigérant monophasique en contact avec le conducteur
- **Réfrigération**
 - » He II statique à 1 bar (LHC)
 - » He supercritique en écoulement à quelques bars (GSI, RHIC)



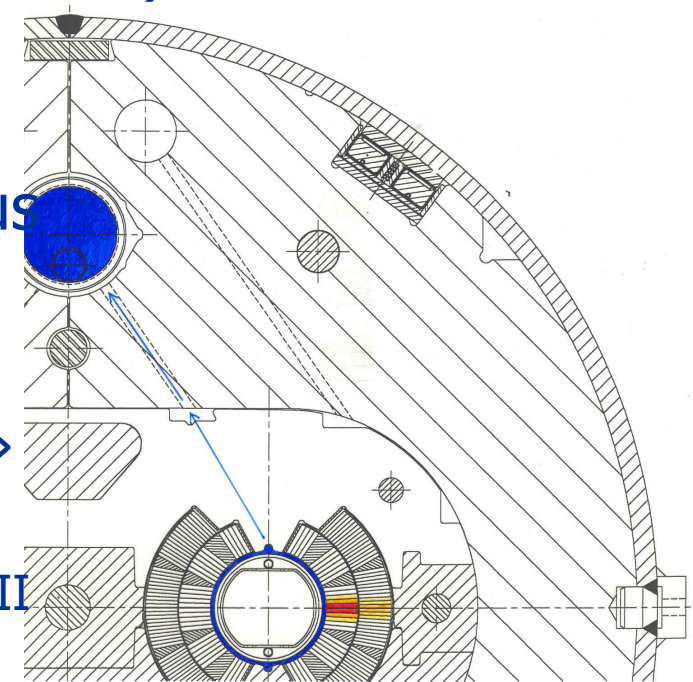
Transferts de chaleur dans les aimants du LHC

- Aimants « mouillés » avec un échangeur de chaleur
 - » He II stagnant pressurisé à 1.9 K en contact avec le conducteur
 - » Échangeur de chaleur d'He II saturé à 1.8 K



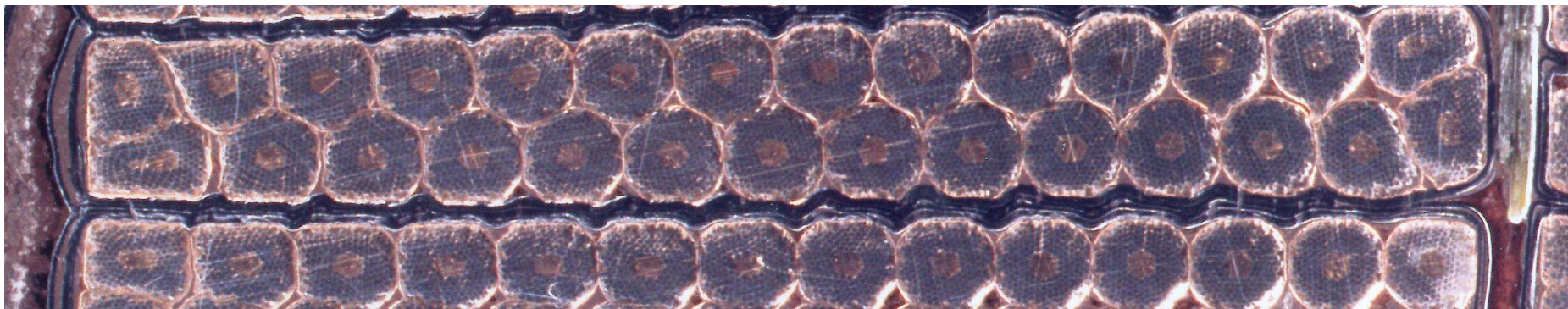
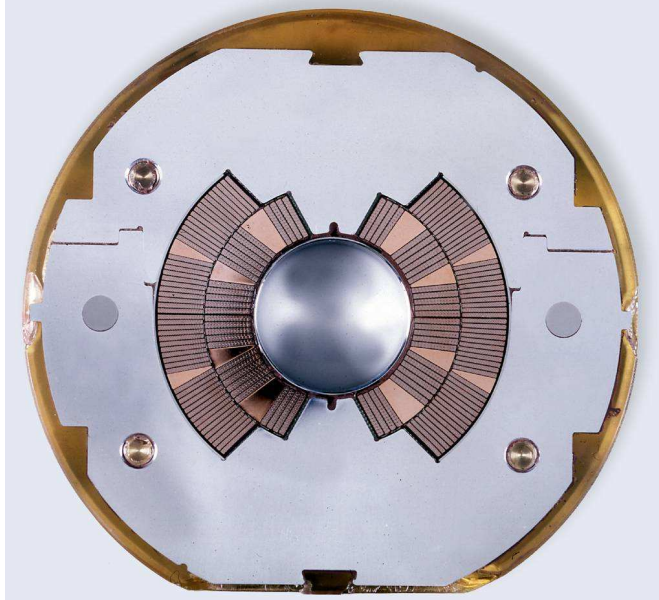
Transferts de chaleur dans les aimants du LHC (1/4)

- Marge en température non pas due aux propriétés du supraconducteur mais au réfrigérant (He II)
 - » $\Delta T < 0,3 \text{ K}$ ($T_c < T_\lambda$)
- Isolation électrique constitue la plus grande barrière thermique
- Isolation électrique « Tout Polyimide »
 - » 10 mW/cm^3 or 0.4 W/m (cable)
 - » $\Delta T < 0.3 \text{ K}$ avec une isolation perméable à l'He II et $\Delta T \sim 4 \text{ K}$ avec une isolation imperméable



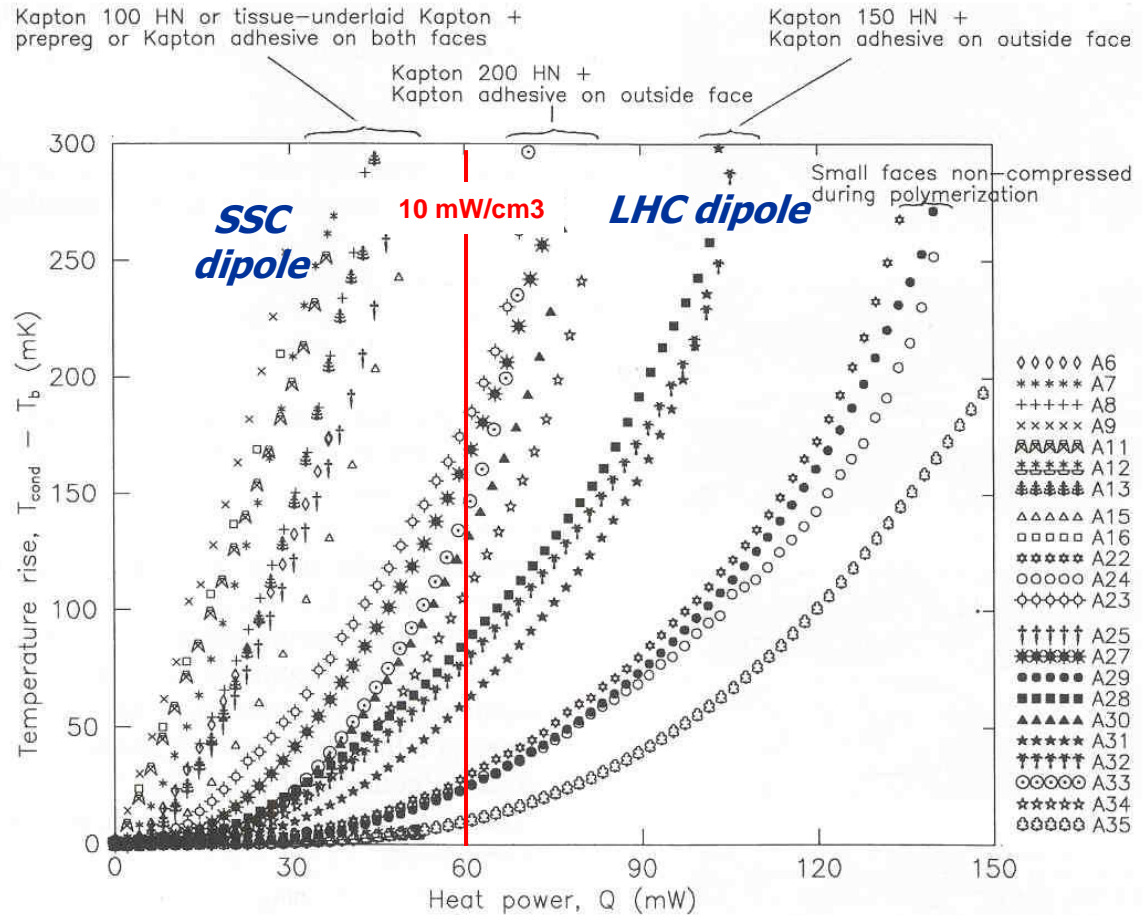
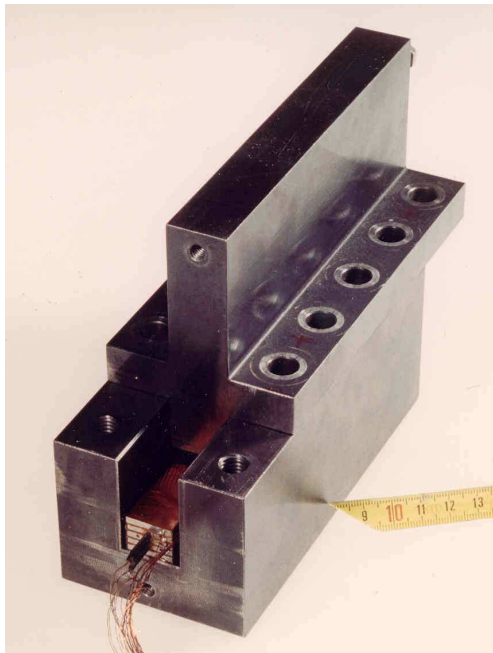


Transferts de chaleur dans les aimants du LHC (2/4)



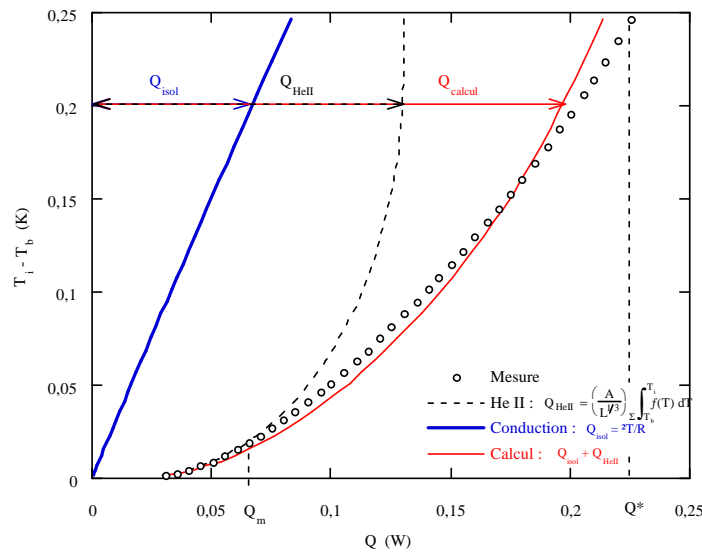
Transferts de chaleur dans les aimants du LHC (3/4)

- Reproduction des transferts de chaleur dans une bobine d'aimant d'accélérateur

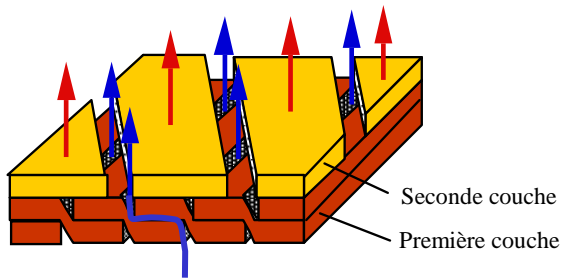
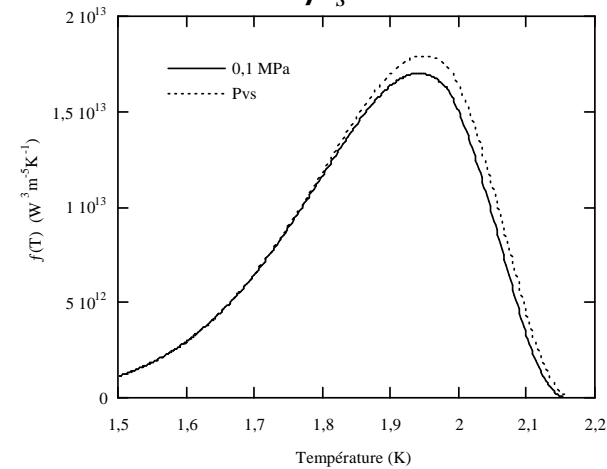


Transferts de chaleur dans les aimants du LHC (4/4)

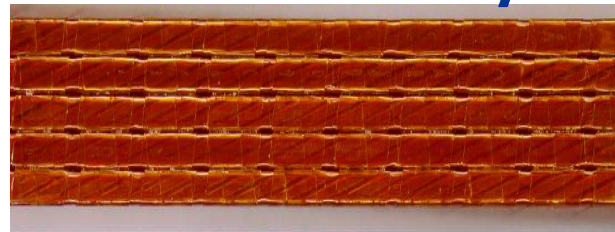
- Transfert de chaleur en He II dans les canaux d'hélium et conduction dans l'isolation
 - » A grand flux de chaleur $Q_{\text{HeII}} < Q_{\text{conduction}}$



$$\vec{\nabla} T \approx - \frac{A \rho_n}{\rho_s^3 s^4 T^3} |\vec{q}|^2 \vec{q}$$

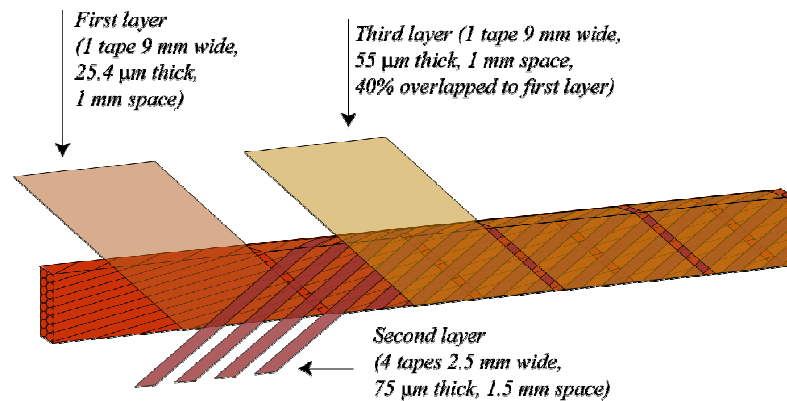


Isolation «tout Kapton» multicouche

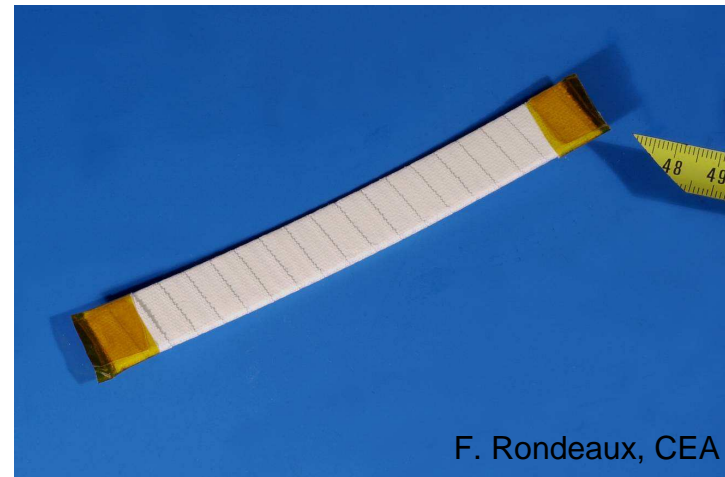


Les nouveaux systèmes d'isolation électrique

- Nouveau enrubannage en « Tout polyimide » pour aimant NbTi
- Nouvelle isolation poreuse en matériaux « céramique » pour aimant Nb₃Sn



D. Tommasini, CERN



F. Rondeaux, CEA



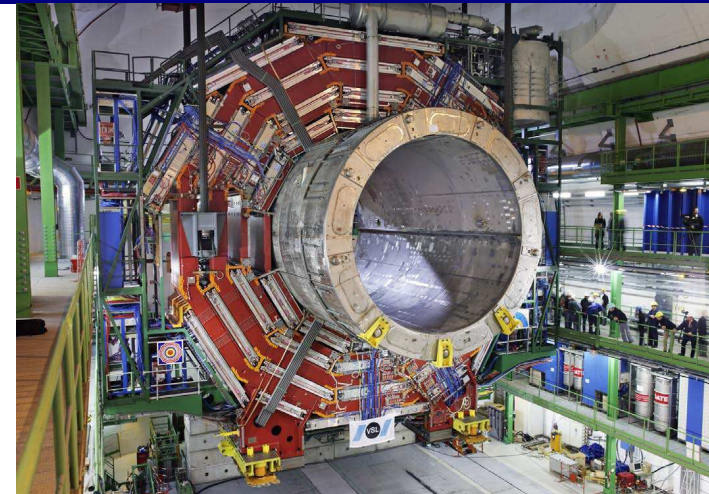
Transfert de chaleur dans les bobines supraconductrices

- **Le Refroidissement des aimants supraconducteurs**
 - » La stabilité thermique des aimants
 - » Les différents types d'aimant
 - » Les modes de refroidissement
- **Transfert de chaleur dans les aimants d'accélérateur du LHC**
 - » Mode de refroidissement des aimants d'accélérateur
 - » Les transferts de chaleur dans les aimants du LHC
 - » Les nouveaux systèmes d'isolation électrique

- **Transfert de chaleur dans l'aimant du détecteur CMS**
 - » Mode de refroidissement des aimants de détecteur
 - » Refroidissement par écoulement « thermosiphon » diphasique en hélium
 - » Le refroidissement de l'aimant de CMS

Les aimants supraconducteurs de détecteur

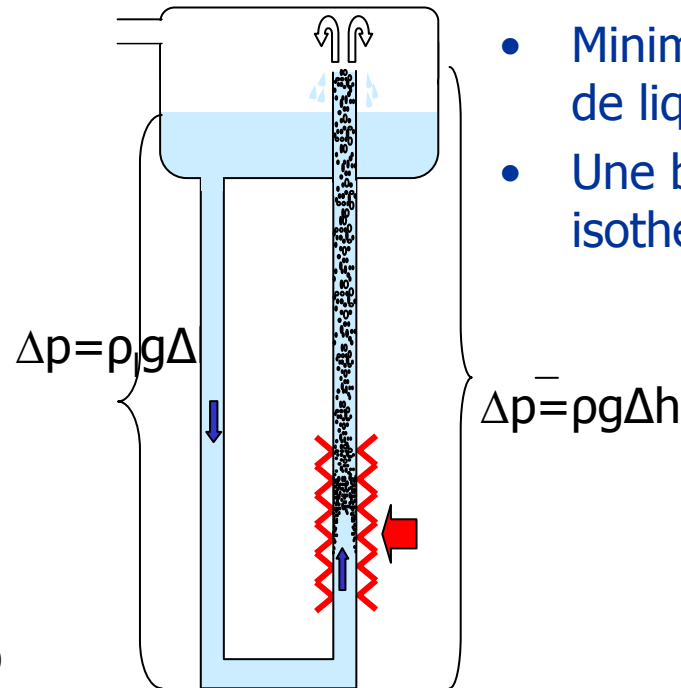
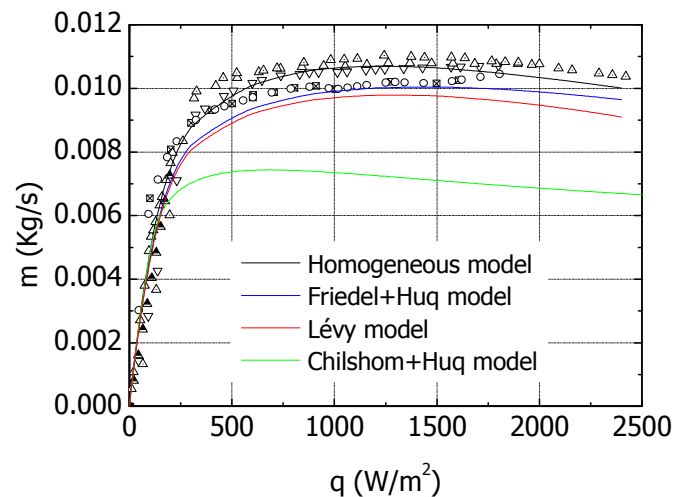
- **Apports thermiques faibles**
- **Faible densité de courant pour induction magnétique moyenne (5 T)**
- **Aimant unique de grande dimension**
 - » Limitation du volume d'hélium (quench)
- **Bobinage supraconducteur moins optimisé car aimant unique**
 - » $\Delta T \sim 2$ K (60% sur la droite de charge)
 - » Lors de Quench T^e augmente jusqu'à 100 K (volume grand)
 - » Limitation des contraintes mécaniques lors du réchauffement
- **Aimant « sec »**
 - » Réfrigération indirecte du bobinage
 - » Conducteur sur-stabilisé avec matrice de bonne conductivité
- **Modes**
 - » Écoulement d'hélium diphasique en convection forcée ou naturelle (CMS, ATLAS)



Refroidissement par écoulement « thermosiphon » diphasique en hélium

- **Convection naturelle diphasique**

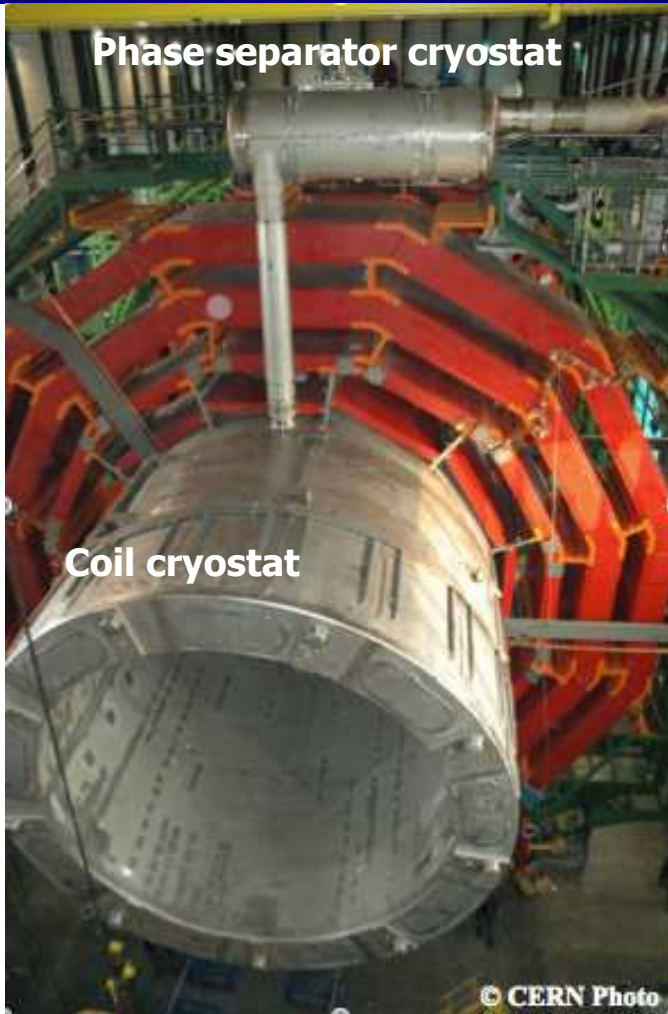
- » Puissance à extraire (aimant)
- » Ébullition nucléée
- » Déséquilibre de poids
- » Écoulement induit
 - limité par la friction
 - Amorçage



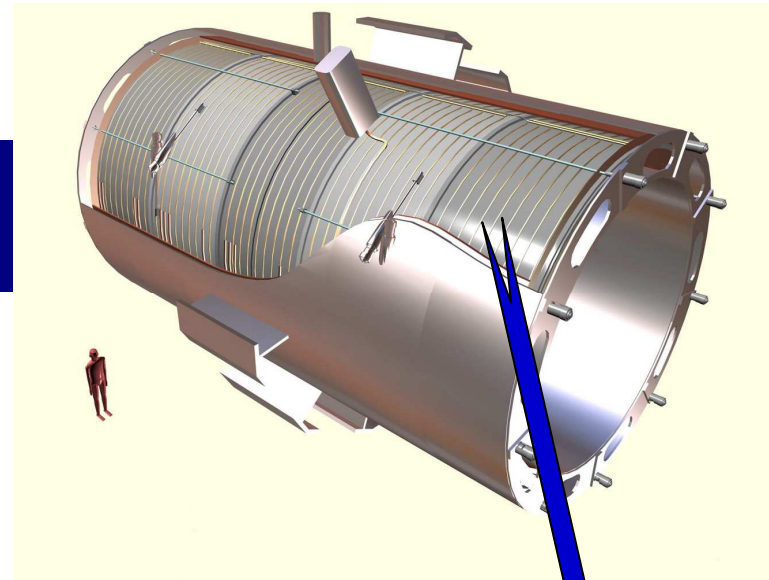
- Écoulement passif
- Autonomie en cas d'arrêt de la cryogénie externe
- Minimisation du volume de liquide
- Une boucle quasi isotherme et isobare



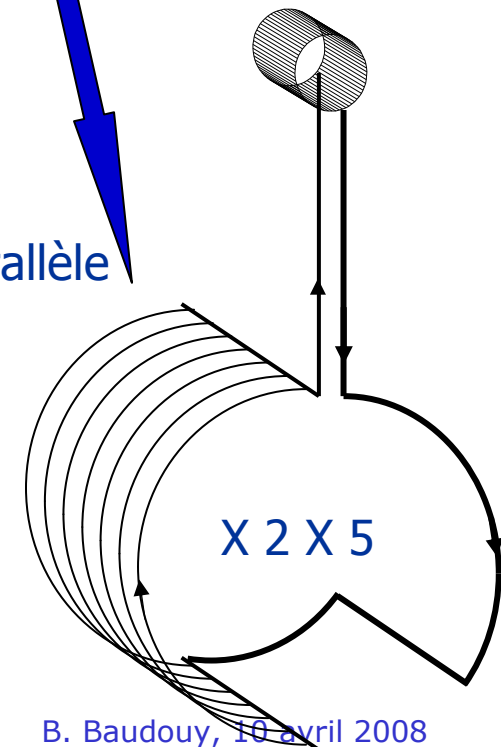
CMS

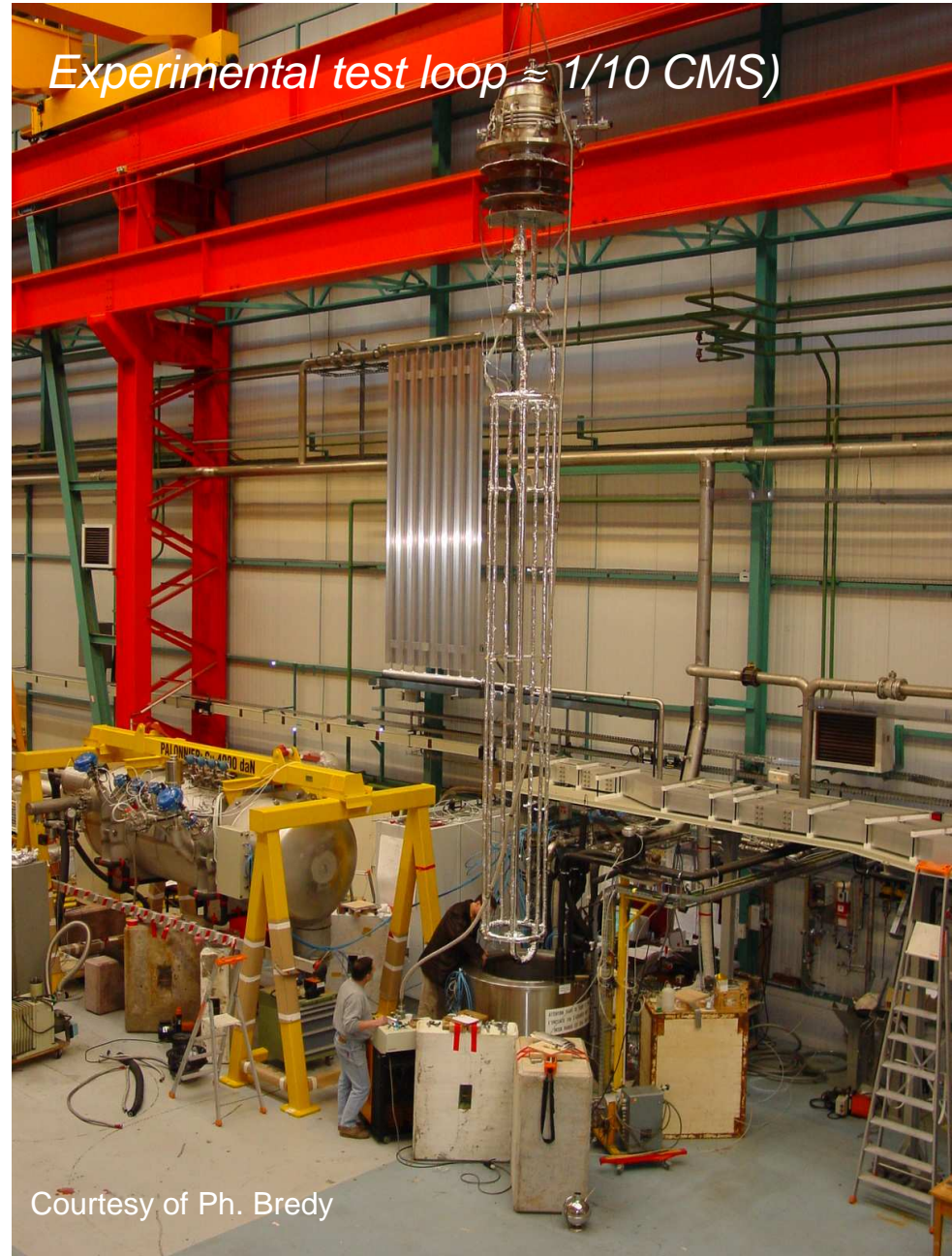
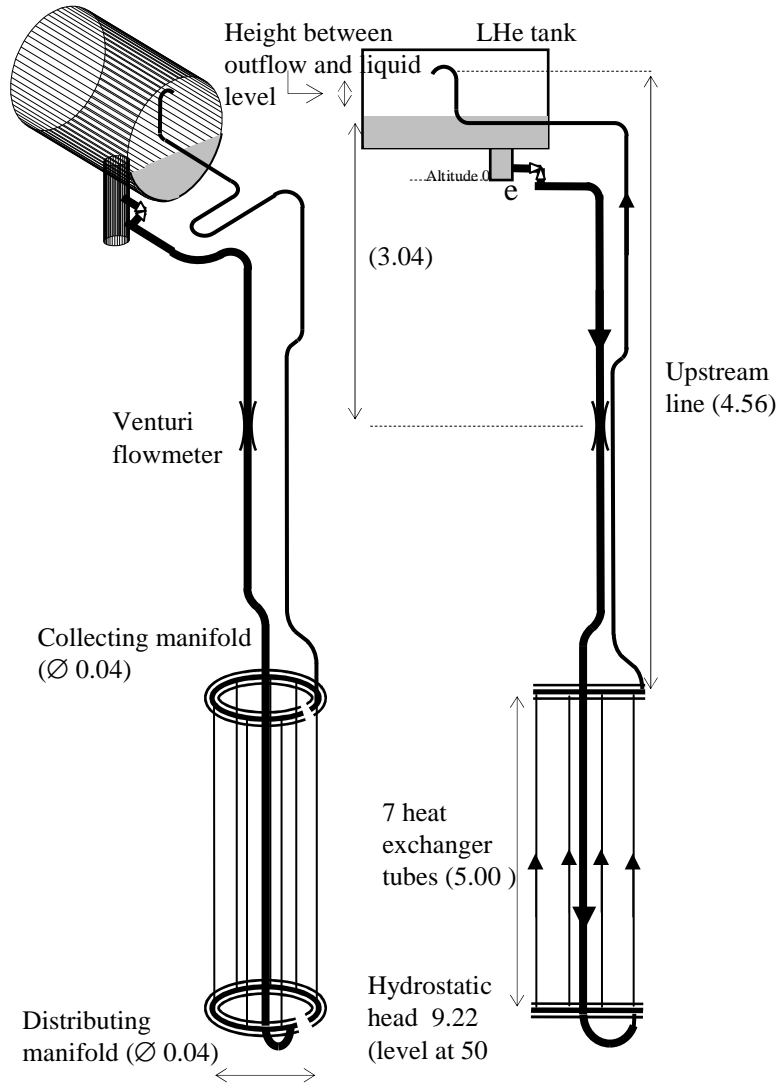


Les Journées Thématiques AFF-CCS, CERN, Genève, Suisse



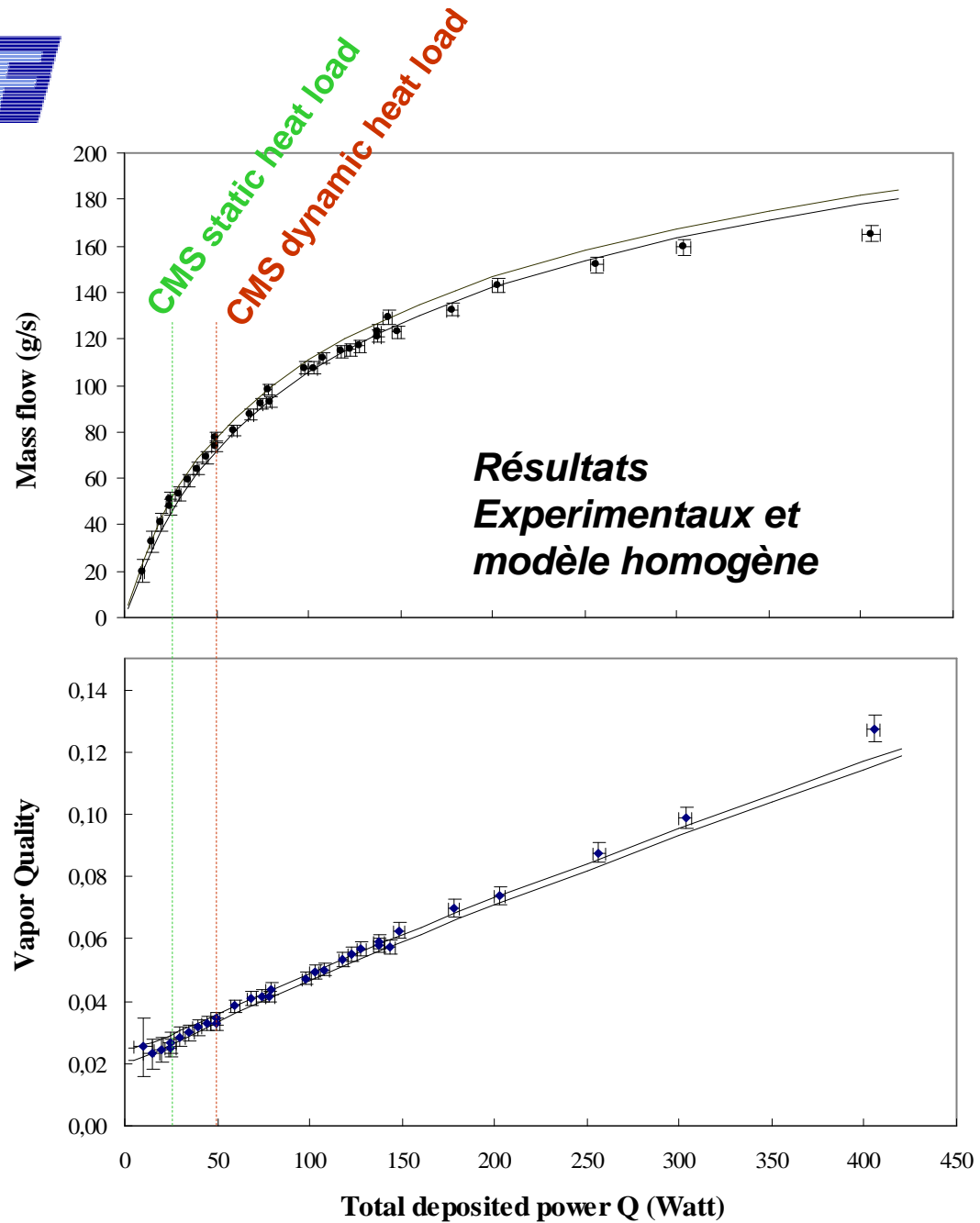
- 220 tonnes à 4,5 K
- 174 to 500 W à 4,5 K
- 5 modules
- 86 échangeurs en parallèle
- 7 m de diamètre
- 4 m de riser



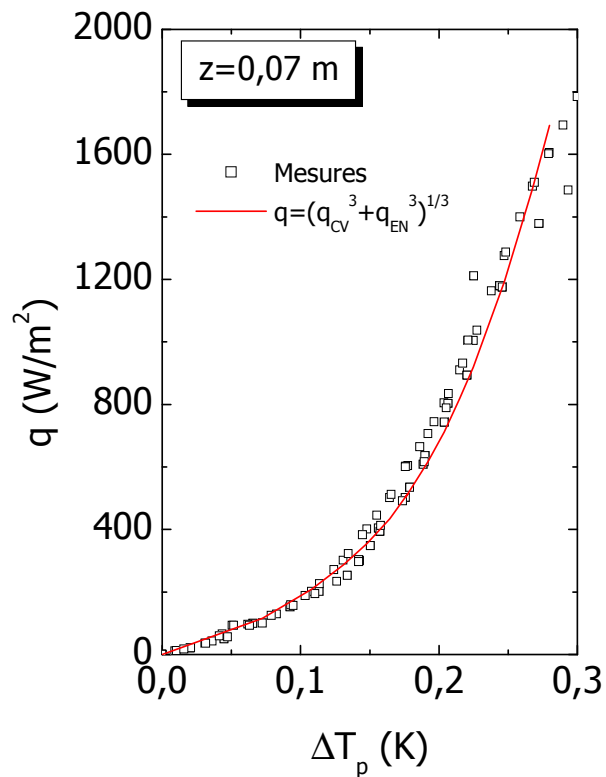




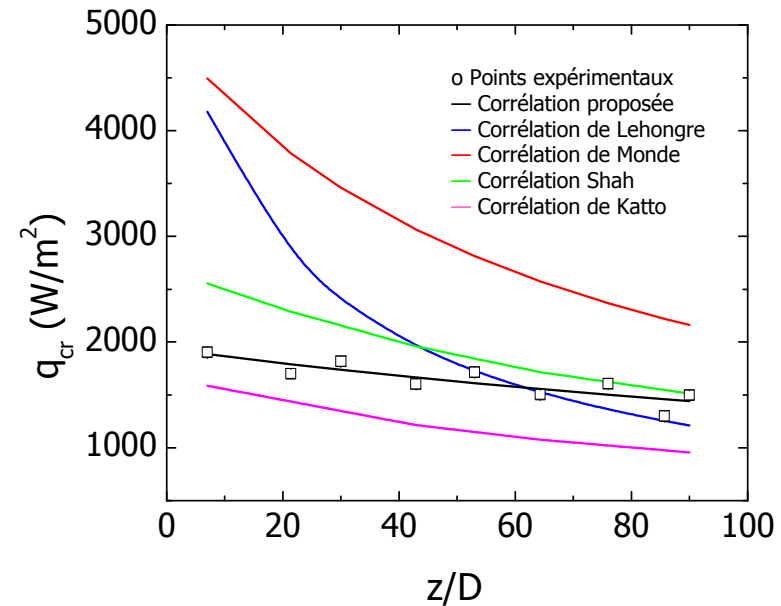
- **Modèle homogène valide jusqu'à un titre de 14%**
- **Hauteur de liquide dans le réservoir**
- **$x \neq 0$ pour $Q \sim 0$**
» Rehausse en sortie
- **A bas flux de chaleur, la moitié de la boucle est sous refroidie**



Transfert de chaleur dans CMS



- Convection forcée + ébullition nucléée
- Flux critique 5 fois plus petits qu'en ébullition nucléée





Références

- **D. Richter, D. Fleiter, B. Baudouy, and A. Devred, Evaluation of the Transfer of Heat From the Coil of the LHC Dipole Magnet to Helium II, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, (2007) 17 1263-1268**
- **L. Benkheira, B. Baudouy, and M. Souhar, Heat transfer characteristics of two-phase He I (4.2 K) thermosiphon flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2007) 50 3534-3544**
- **L. Benkheira, B. Baudouy, and M. Souhar, Flow boiling regimes and CHF prediction for He I thermosiphon loop, Proceedings of the 21th International Cryogenic Engineering Conference, Ed. G. Gistau, (2006) 385-388**
- **L. Benkheira, B. Baudouy, and M. Souhar, Régimes d'ébullition convective d'un écoulement thermosiphon en hélium normal (4,2 K), Acte du Congrès français de thermique 2006, Société française de Thermique, Ed. SFT, (2006) 149-154**
- **P. Brédy, F.-P. Juster, B. Baudouy, L. Benkheira, et al., Experimental and Theoretical study of a two phase helium high circulation loop, Advances in Cryogenics Engineering 51, AIP, Ed. J. G. Weisend, (2005) 496-503**
- **L. Benkheira, M. Souhar, and B. Baudouy, Heat and mass transfer in nucleate boiling regime of He I in a natural circulation loop, Advances in Cryogenics Engineering 51, AIP, Ed. J. G. Weisend, (2005) 871-878**

- **Burnod L, Leroy D, Szeless B, Baudouy B, and Meuris C. Thermal modelling of the L.H.C. dipoles functioning in superfluid helium. Proceedings of 4th EPAC 1994.p. 2295-2297.**
- **Meuris C, Baudouy B, Leroy D, and Szeless B. Heat transfer in electrical insulation of LHC cables cooled with superfluid helium. Cryogenics 1999; 39: 921-93**
- **Kimura N, Kovachev Y, Yamamoto A, Shintomi T, Nakamoto T, Terashima A, Tanaka K, and Haruyama T. Improved heat transfer for Rutherford-type insulated cables in pressurized He II. Proceedings of Magnet technology 1998.p. 1238-1241.**
- **Baudouy B, François MX, Juster F-P, and Meuris C. He II heat transfer through superconducting cables electrical insulation. Cryogenics 2000; 40: 127-136.**
- **Kimura N, Yamamoto A, Shintomi T, Terashima A, Kovachev V, and Murakami M. Heat transfer characteristics of Rutherford-type superconducting cables in pressurized He II. Ieee Transactions on Applied Superconductivity 1999; 9: 1097-1100**