



*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 cryogénie de l'accélérateur

**Laurent Tavian, CERN**

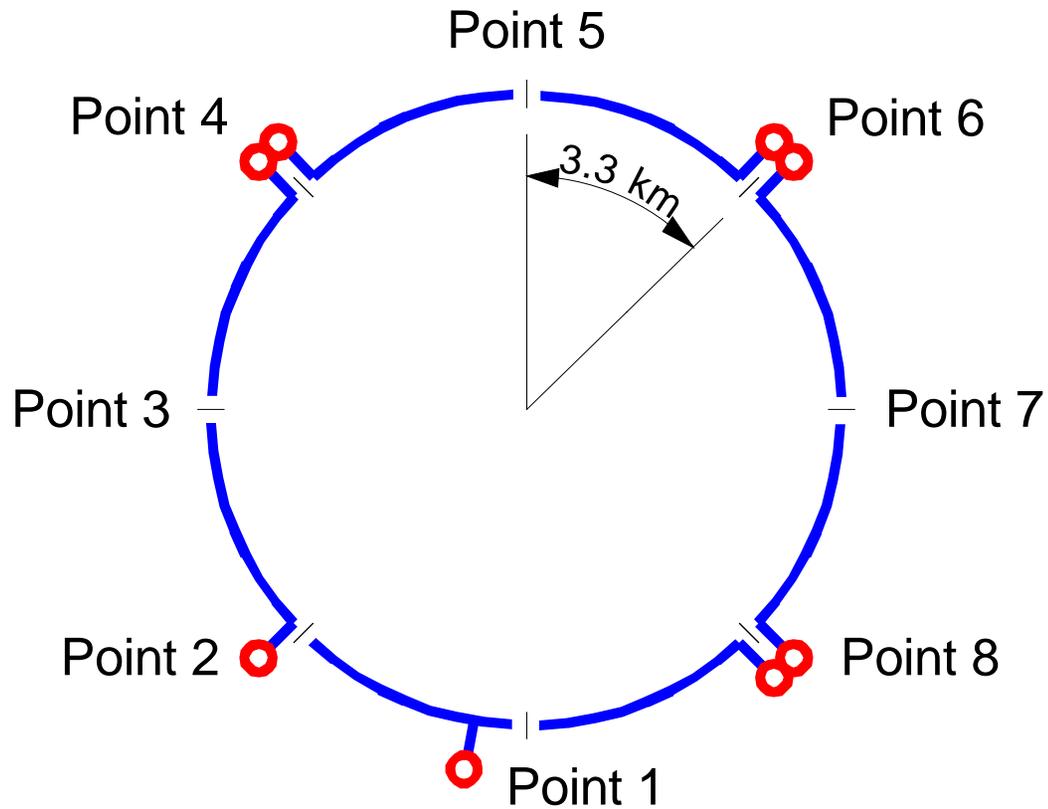
**10 avril 2008**



- **Architecture du système cryogénique**
- **Méthode de refroidissement & comparaison résultats - spécifications**
  - » Mises en froid des secteurs (5 opérations)
  - » Réchauffements des secteurs (2 opérations)
  - » Marche normale en régime établi
    - Température de fonctionnement
    - Redondance du refroidissement à 1.9 K
    - Entrées de chaleur
  - » Récupération de transitions résistives
  - » Disponibilité pour les tests de puissance électrique
- **Conclusion**



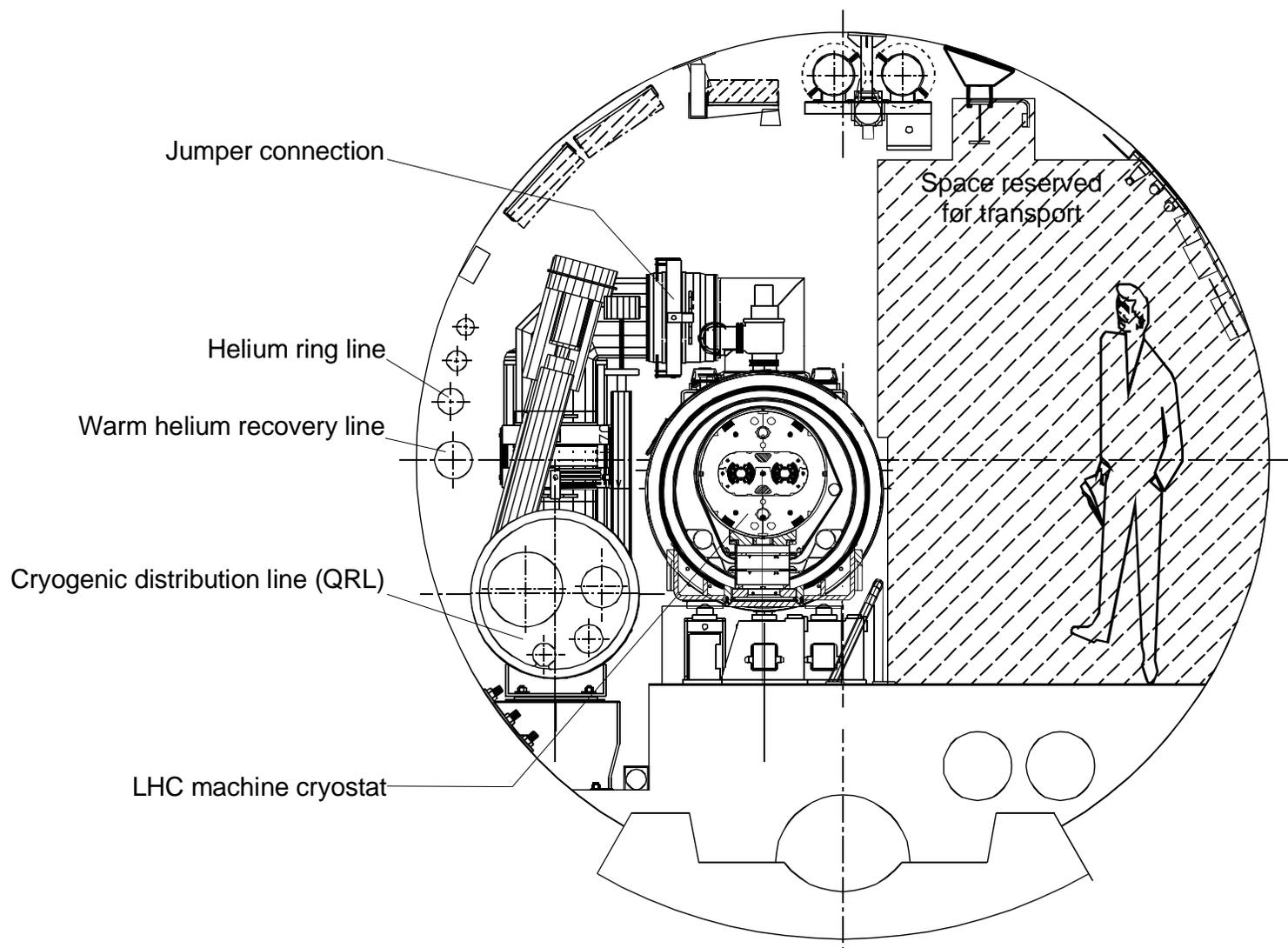
# Layout du système cryogénique



○ Installation cryogénique de secteur

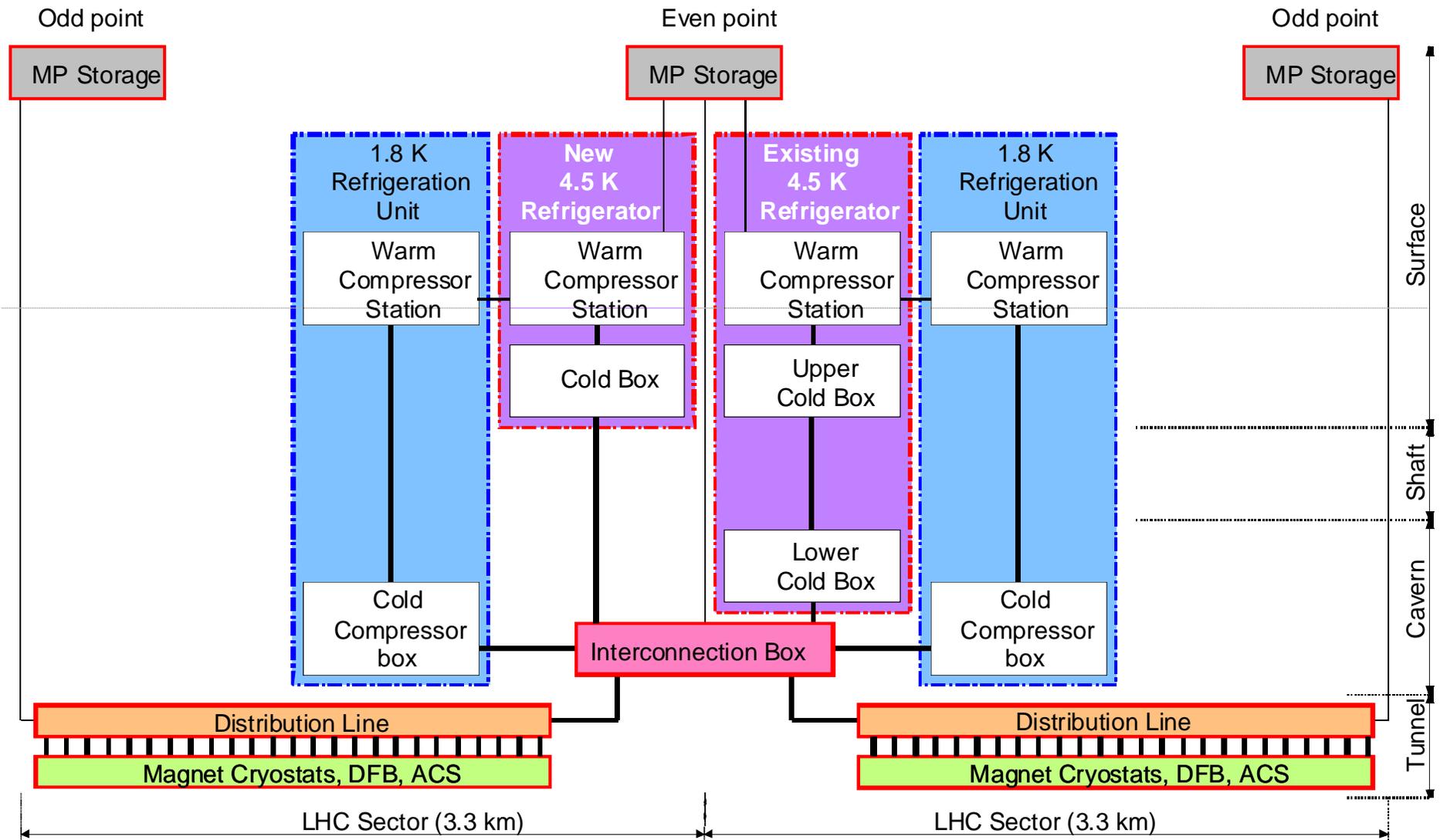


# Coupe du tunnel





# Architecture d'un ilot cryogénique typique





# Galerie de photos: Réfrigération



Réfrigération @ 4.5 K  
(18 kW @ 4.5 K)

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

Réfrigération @ 1.8 K  
(2.4 kW @ 1.8 K)

L. Tavian, 10 avril 2008



# Galerie de photos: Stockage et distribution



Stockages

Distribution





# Mises en froid des secteurs (4625 t sur 3.3 km)

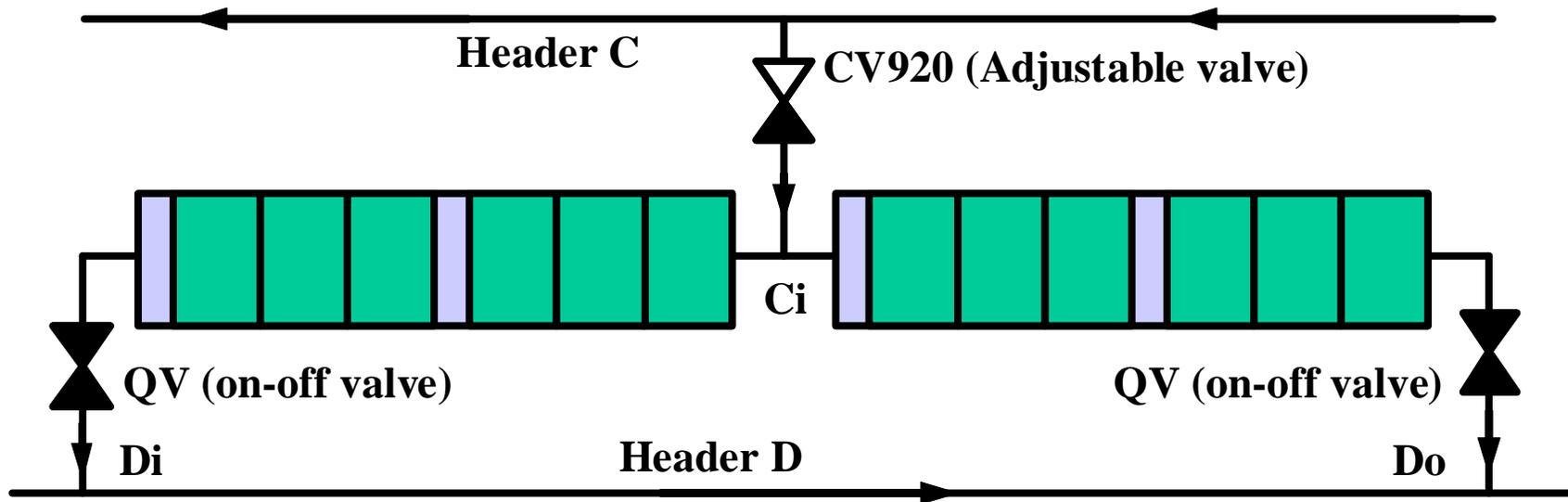


Dépotage de LHe & LN2:  
~ 200 kCHF d'azote pour le refroidissement d'un secteur  
~ 15 tonnes (120'000 l) de LHe pour le remplissage d'un secteur

Pré-refroidissement jusqu'à 80 K avec LN2:

- Capacité: 600 kW
- consommation: ~5 t/h de LN2
- Consommation totale: 1250 t de LN2
- 6 camions de LN2 par jour pendant 10 jours

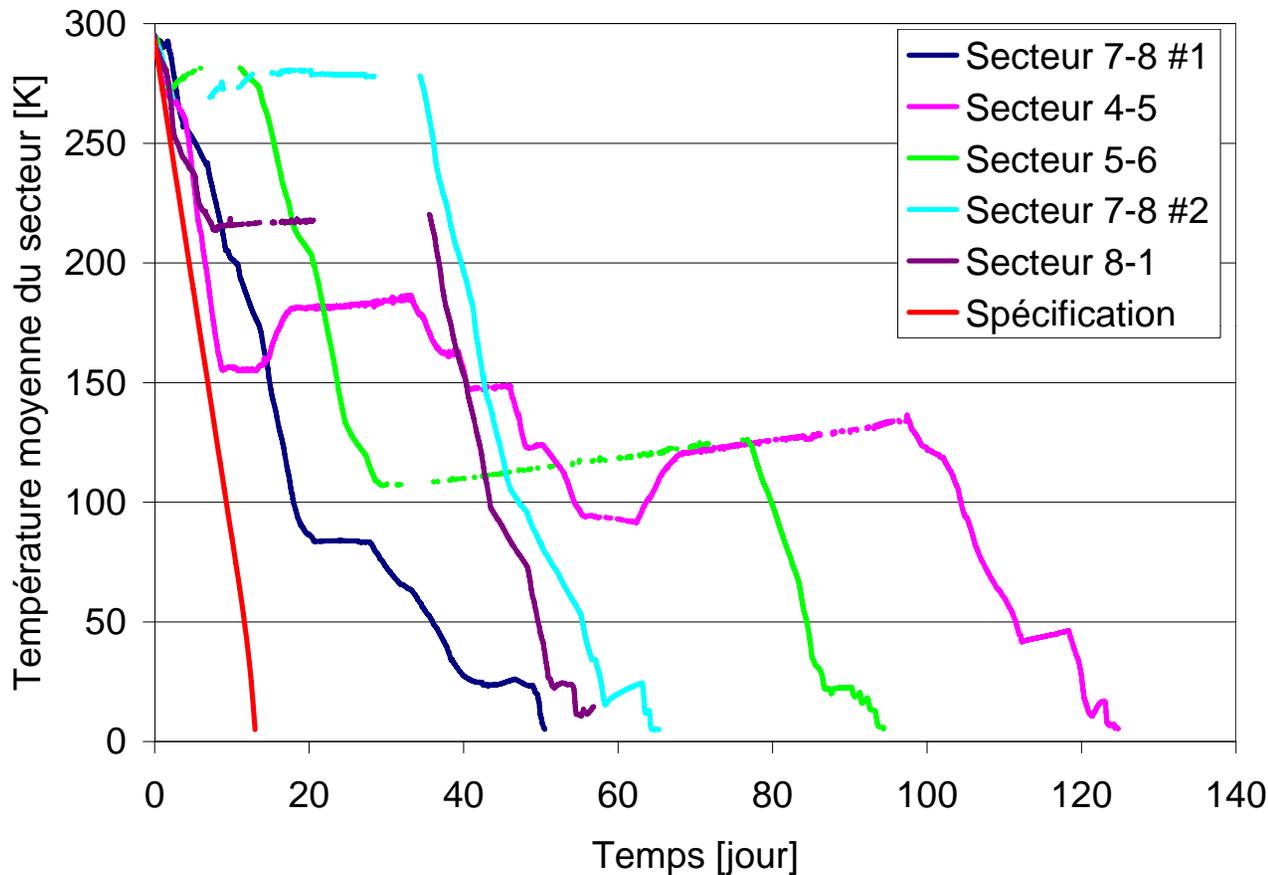




Mise en froid des 27 cellules (~107 m) en parallèle avec une vanne d'alimentation commune à deux cellules:  
→ Déséquilibre de refroidissement si la perte de charge dans la ligne D n'est pas négligeable par rapport à celle d'une cellule. (Remède par circulation alternée)



# Mises en froid avec aléas



## Aléas externes:

Fuites, court-circuits, plateaux de contrôle électrique demandant un arrêt du refroidissement ou un réchauffement partiel du secteur

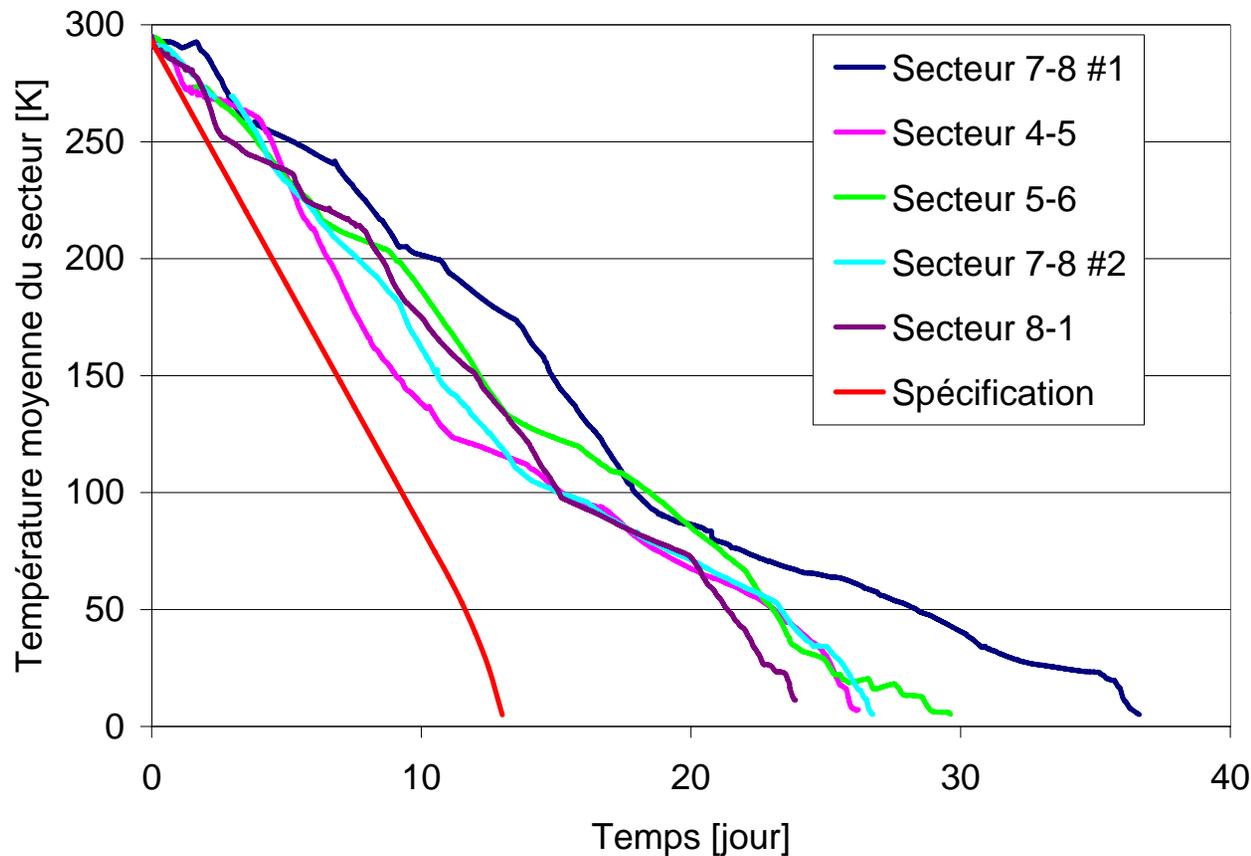
## Aléas cryogéniques:

Déséquilibre entre cellules, arrêts réfrigérateurs,...

**Facteur 4 à 10 par rapport à la spécification !**



# Mises en froid corrigées

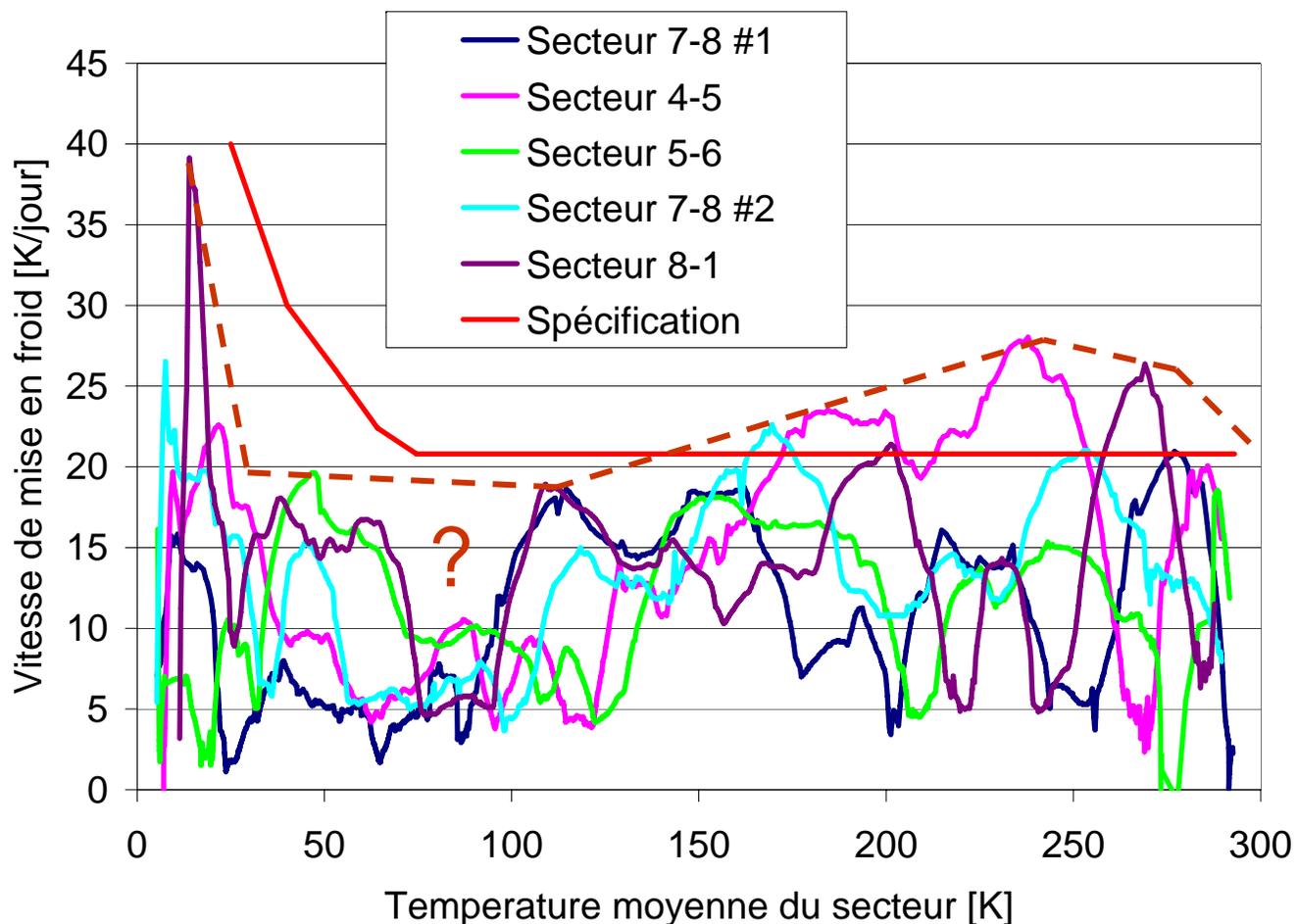


Mises en froid corrigées  
des aléas externes et  
arrêts cryogéniques

**Facteur 2 à 3 par rapport à la spécification !**



# Vitesse de mises en froid

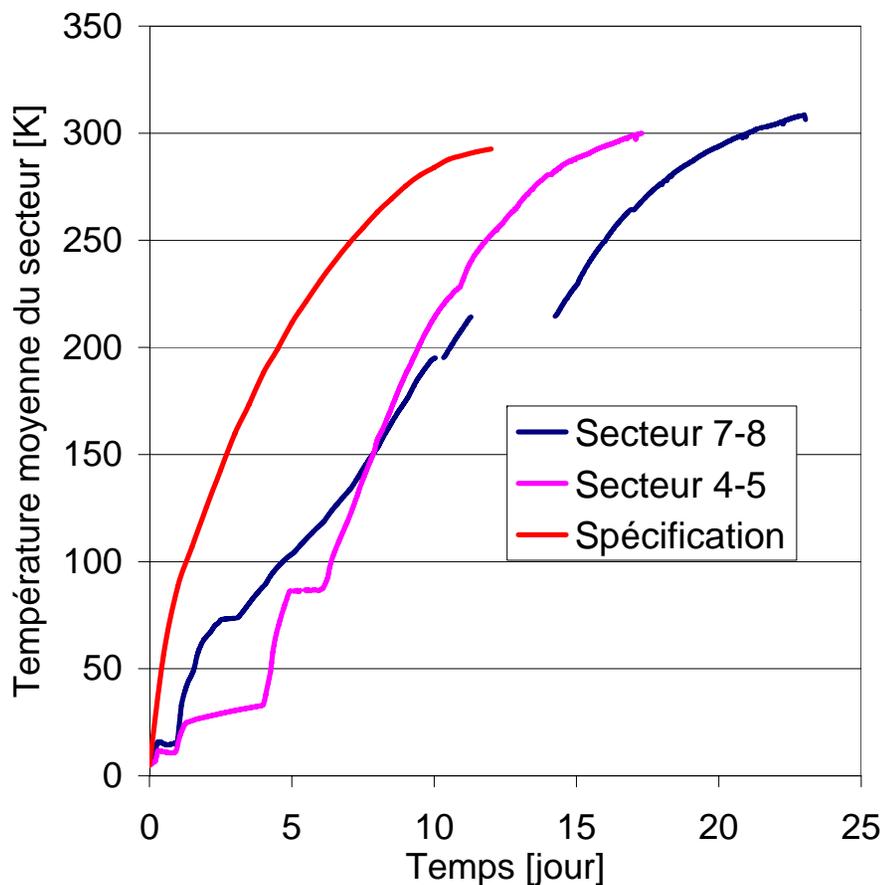


Courbe enveloppe encourageante !

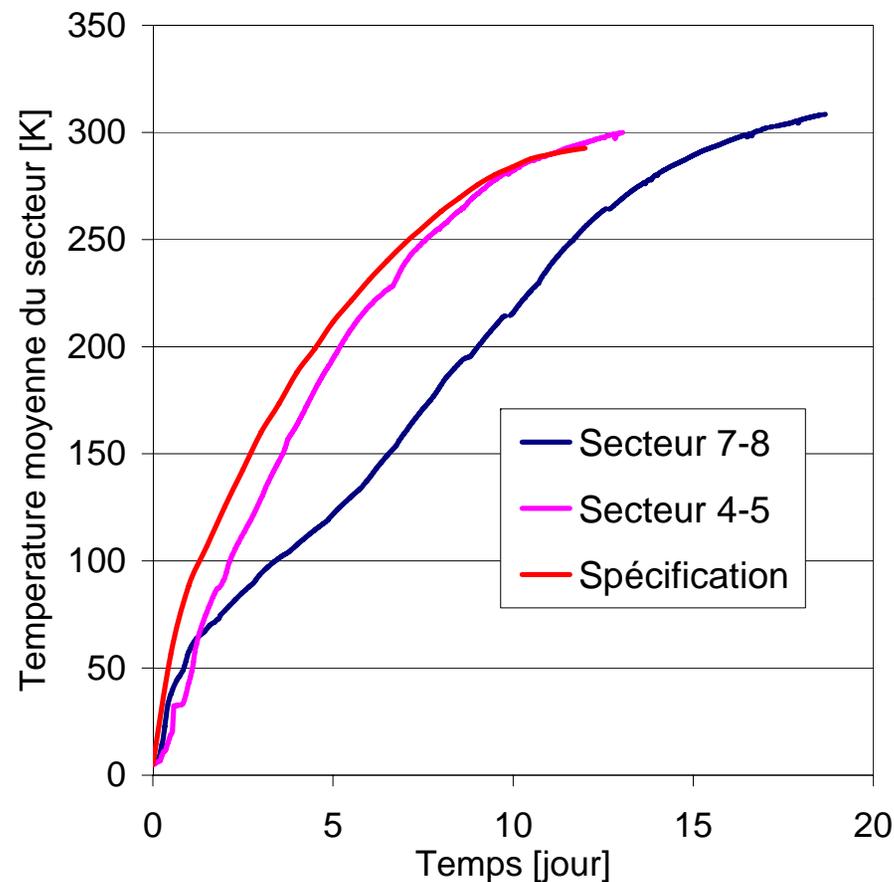


# Réchauffement des secteurs

## Utilisation d'un réchauffeur électrique de 600 kW



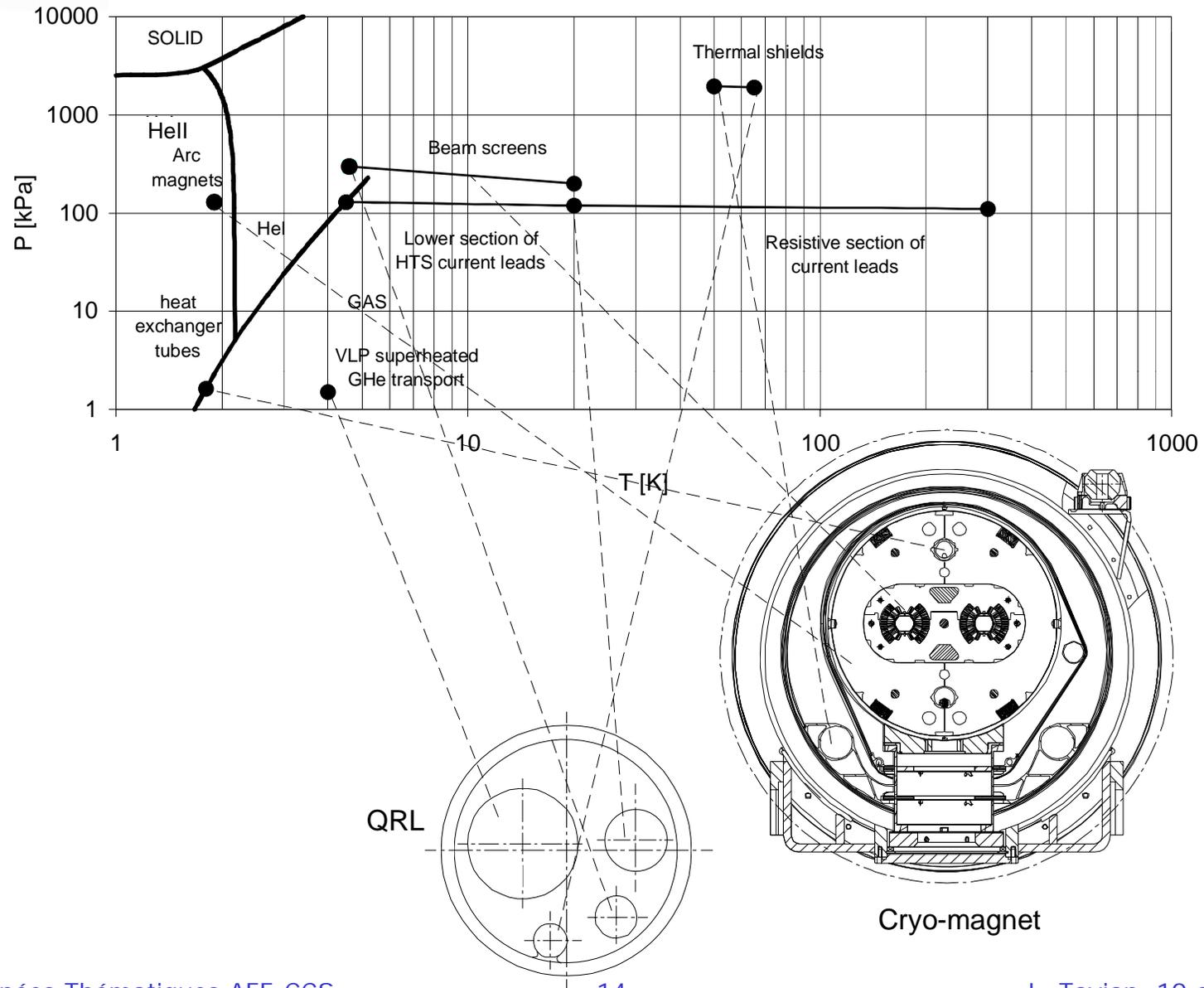
**Avec aléas:  
Facteur 1.5 à 2**

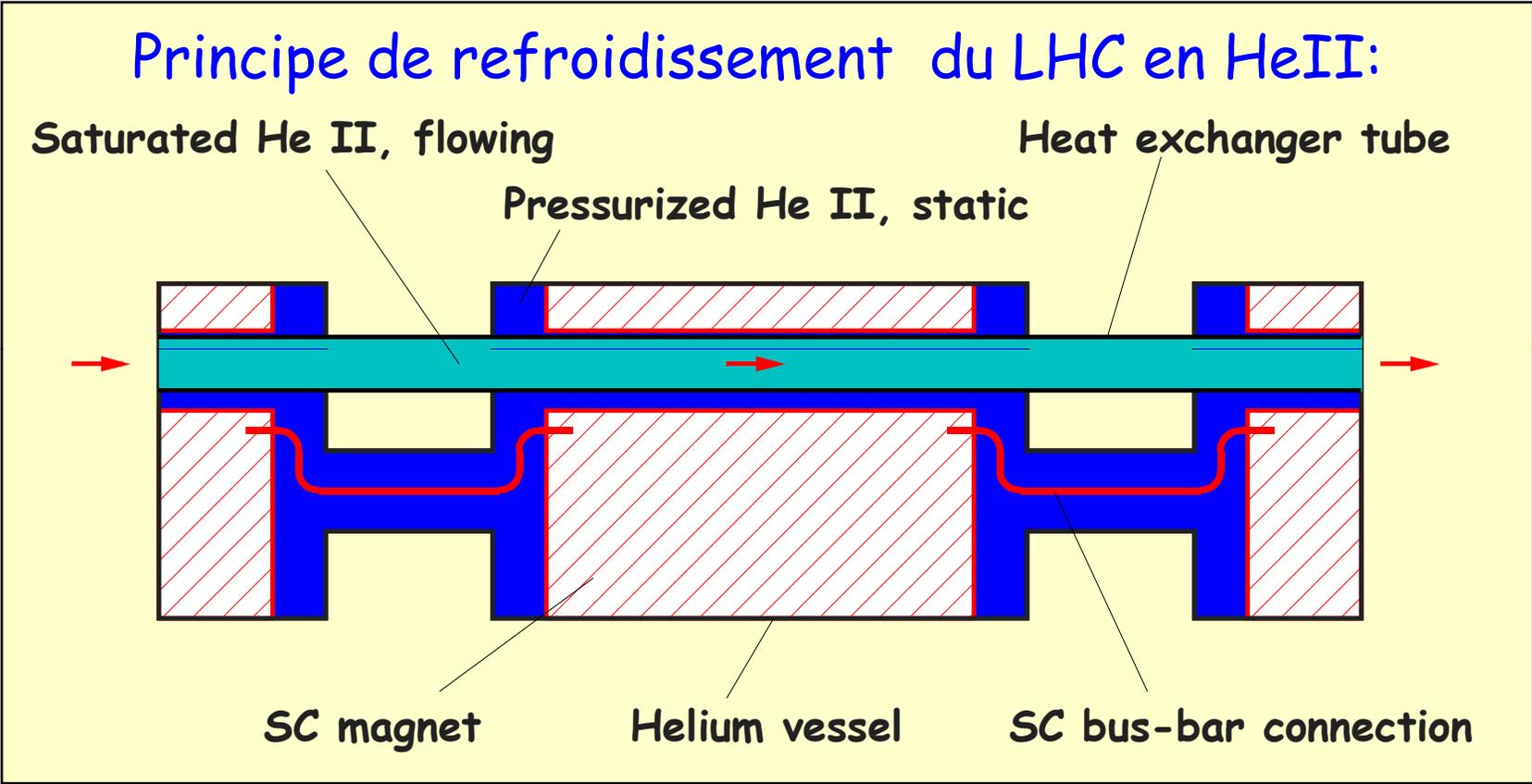


**Sans aléas:  
Spécification atteinte !**

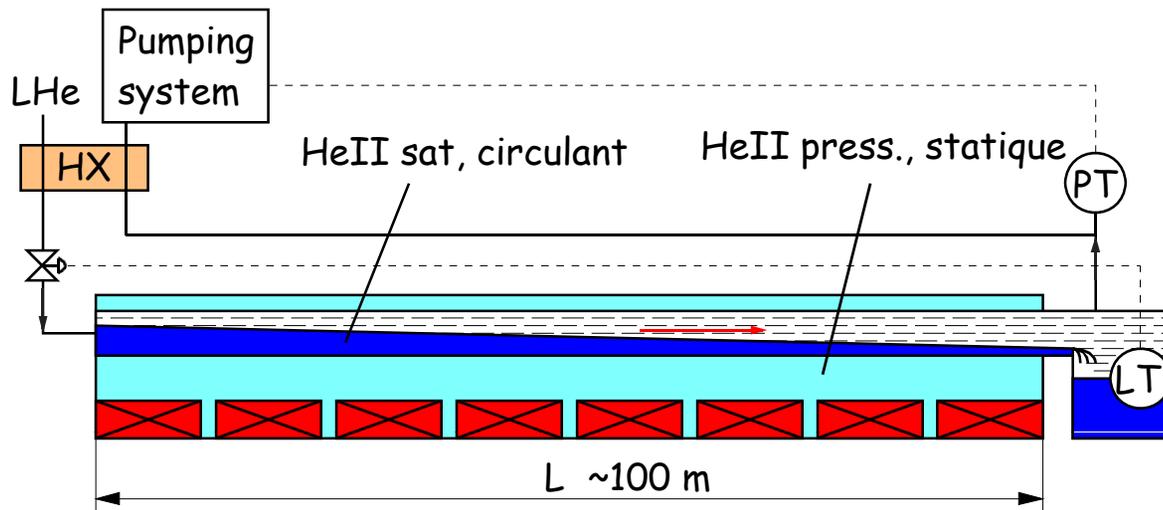


# Marche normale



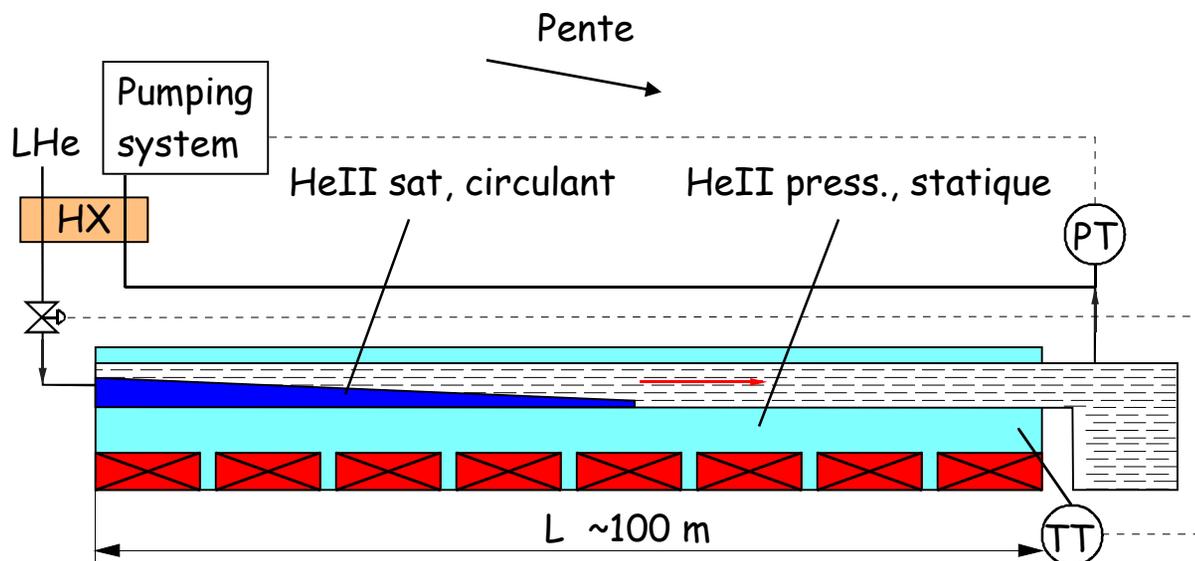


Echangeur de chaleur: Tube en Cu avec un diamètre DN50  
 Conductance thermique totale:  $\sim 100 \text{ W/m.K}$   
 (i.e., pour  $1 \text{ W/m}$ , une différence de température de  $10 \text{ mK}$ )



## Contrôle de niveau:

- optimum pour le mouillage donc pour la température des masses froides
- mais demande le contrôle d'un retard pur ~ 20 mn
- Pas retenu pour le LHC

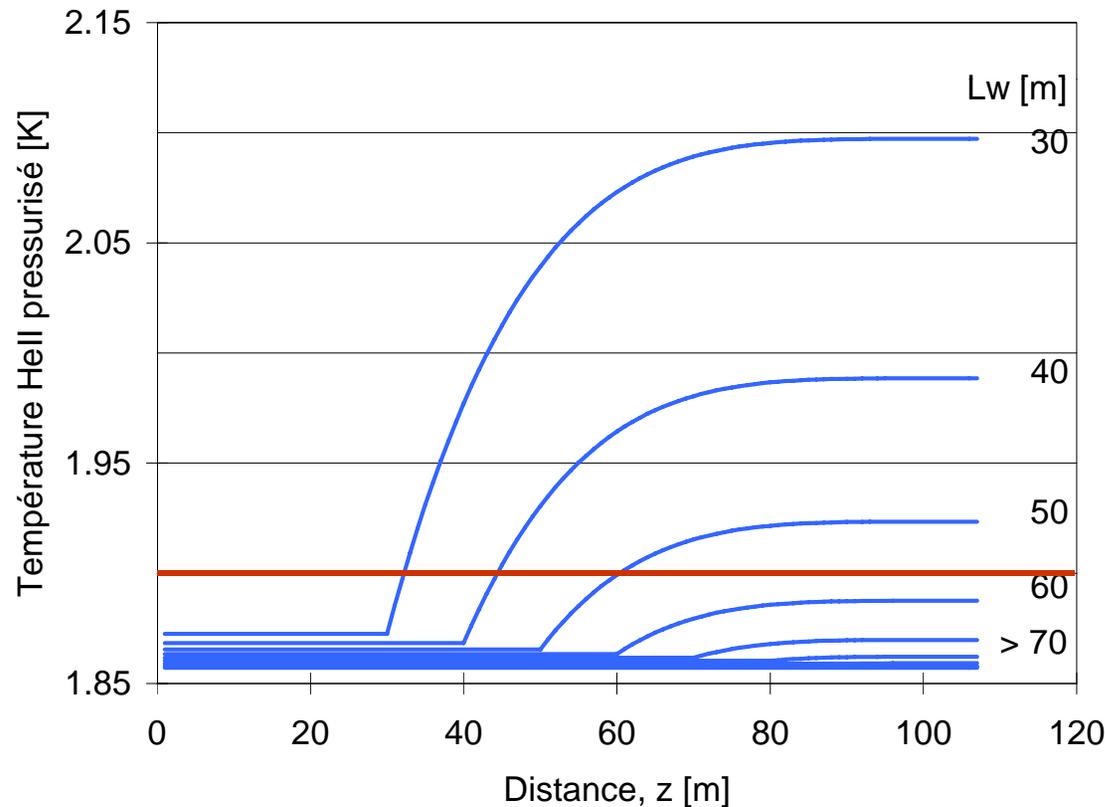
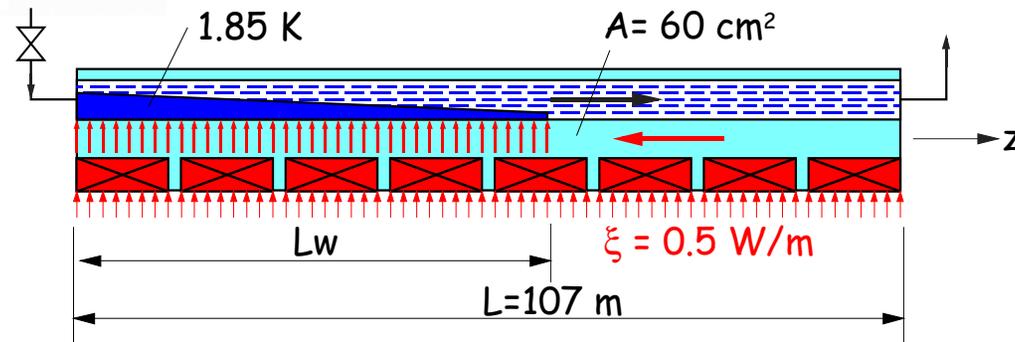


## Contrôle de température:

- Le tube échangeur est partiellement mouillé.
- Une fraction de la cellule est refroidie par conduction longitudinale dans l'hélium superfluide statique créant une élévation de température additionnelle.
- Pas de retard tant que la cellule reste en superfluide
- Retenu pour le LHC

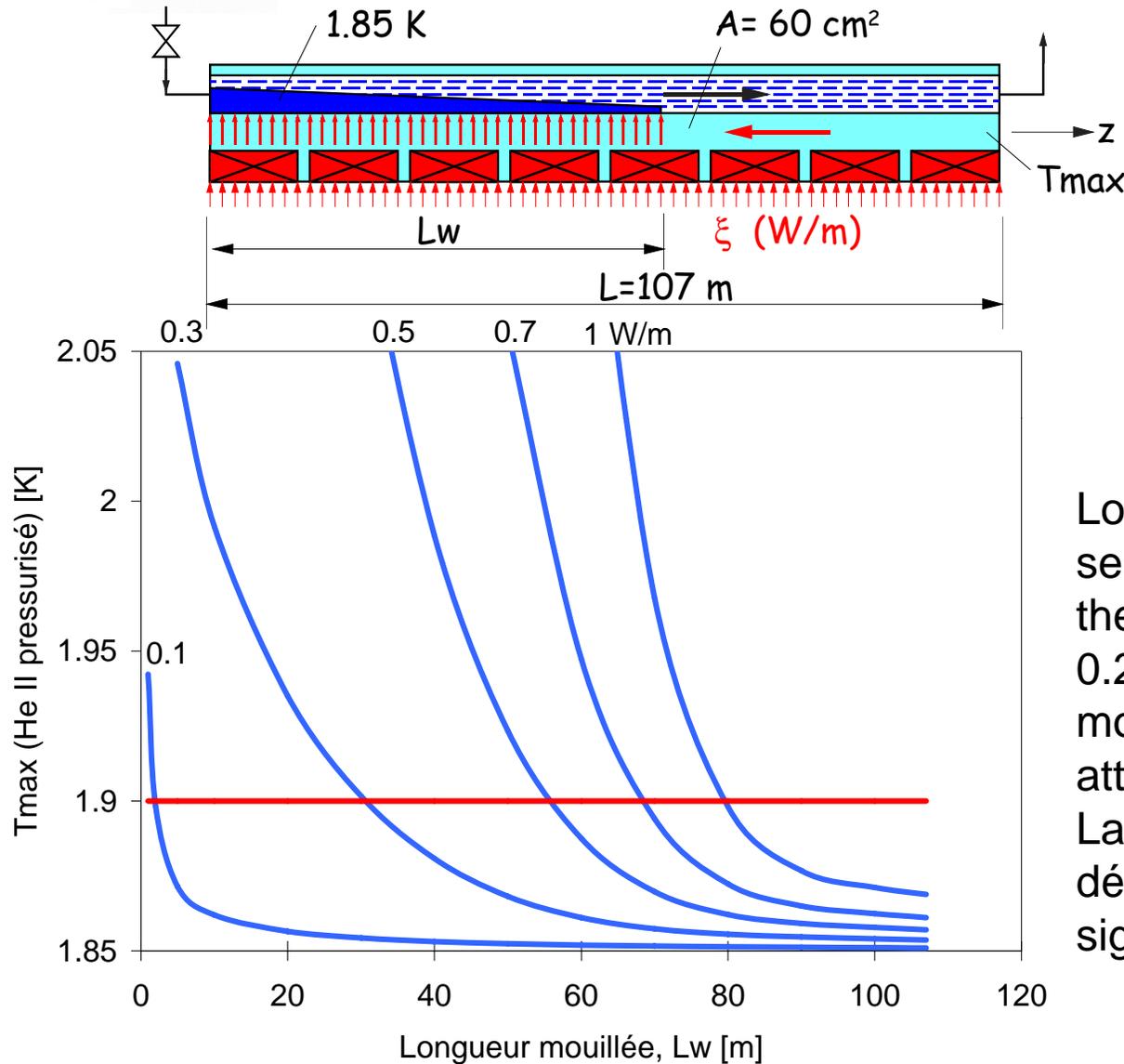


# Profil de température avec mouillage partiel



Avec une puissance distribuée de 0.5 W/m, 60 % de la longueur de l'échangeur est mouillé

# Tmax vs longueur mouillée

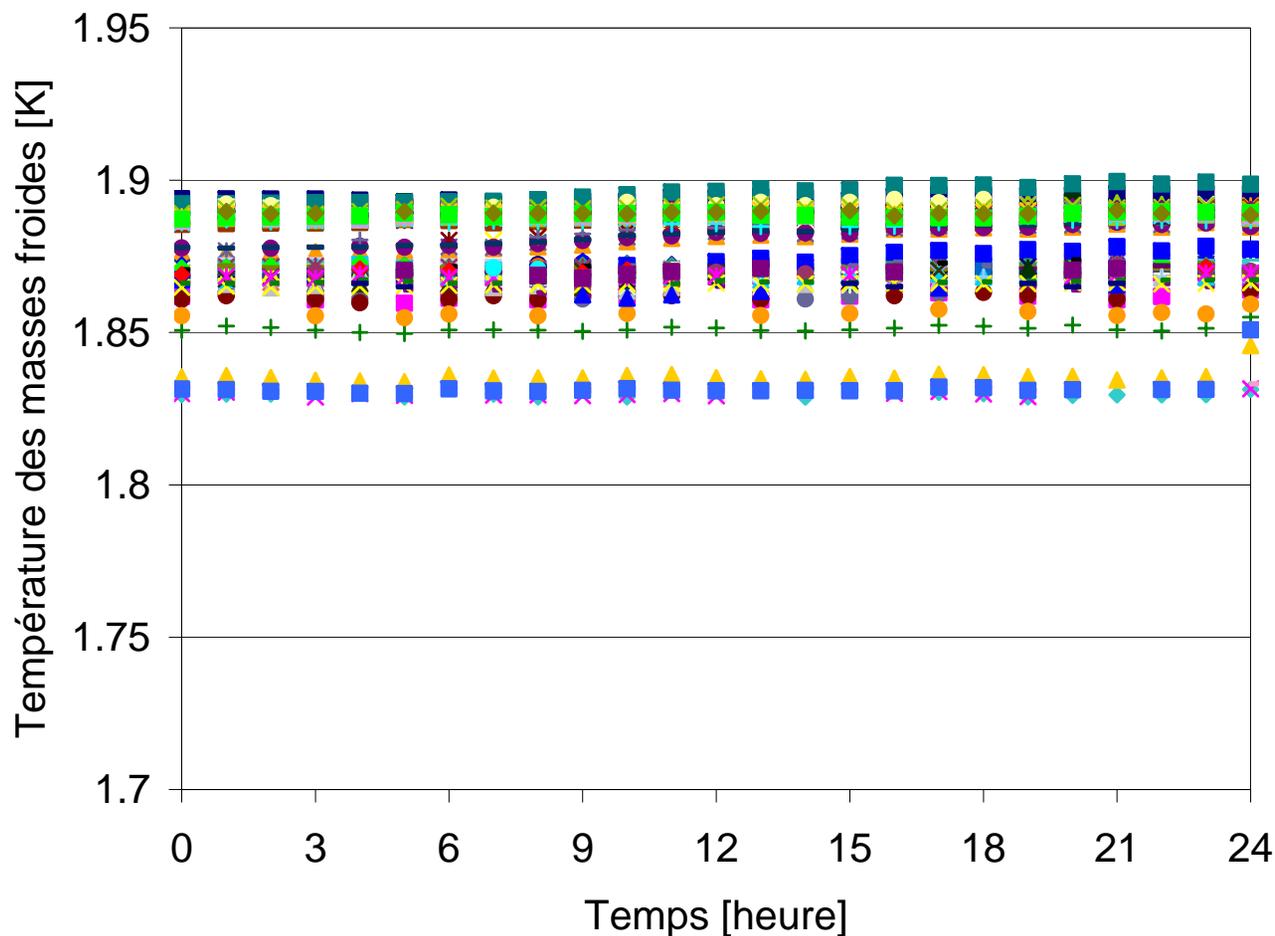


Lors de la mise en service des secteurs, avec des charges thermiques statiques de  $0.2 \text{ W/m}$ , une longueur mouillée d'environ  $20 \text{ m}$  est attendue:  
La marge vis-à-vis du débordement est donc significative



# Refroidissement du Secteur 4-5

Evolution des températures (~150 mesures) du secteur 4-5 en régime établi



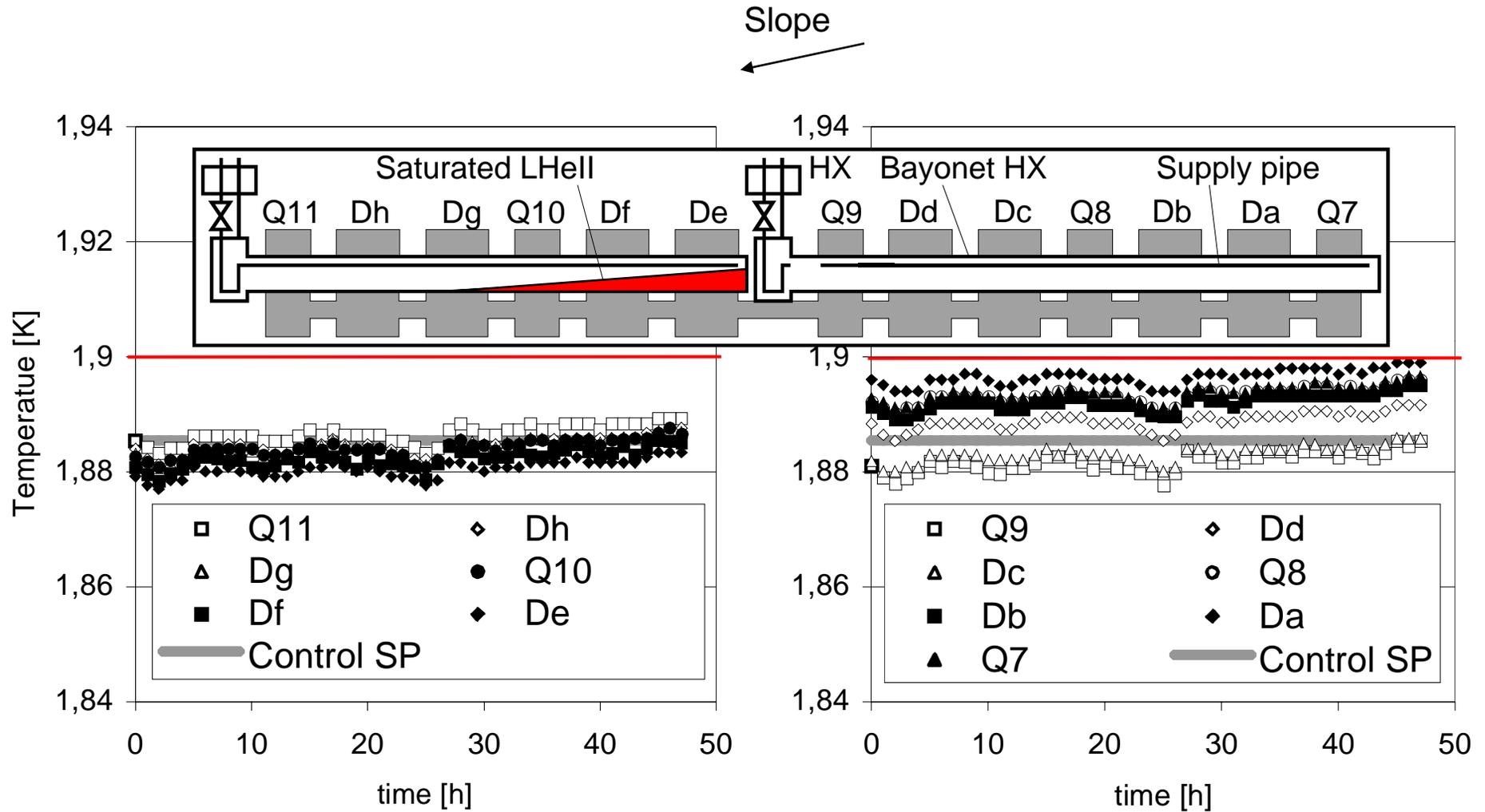
Très bonne stabilité sans problème de contrôle ni de débordement:

Confirmation de la méthode de refroidissement des masses froides à 1.9 K !

Validation de la qualité de la thermométrie du LHC !



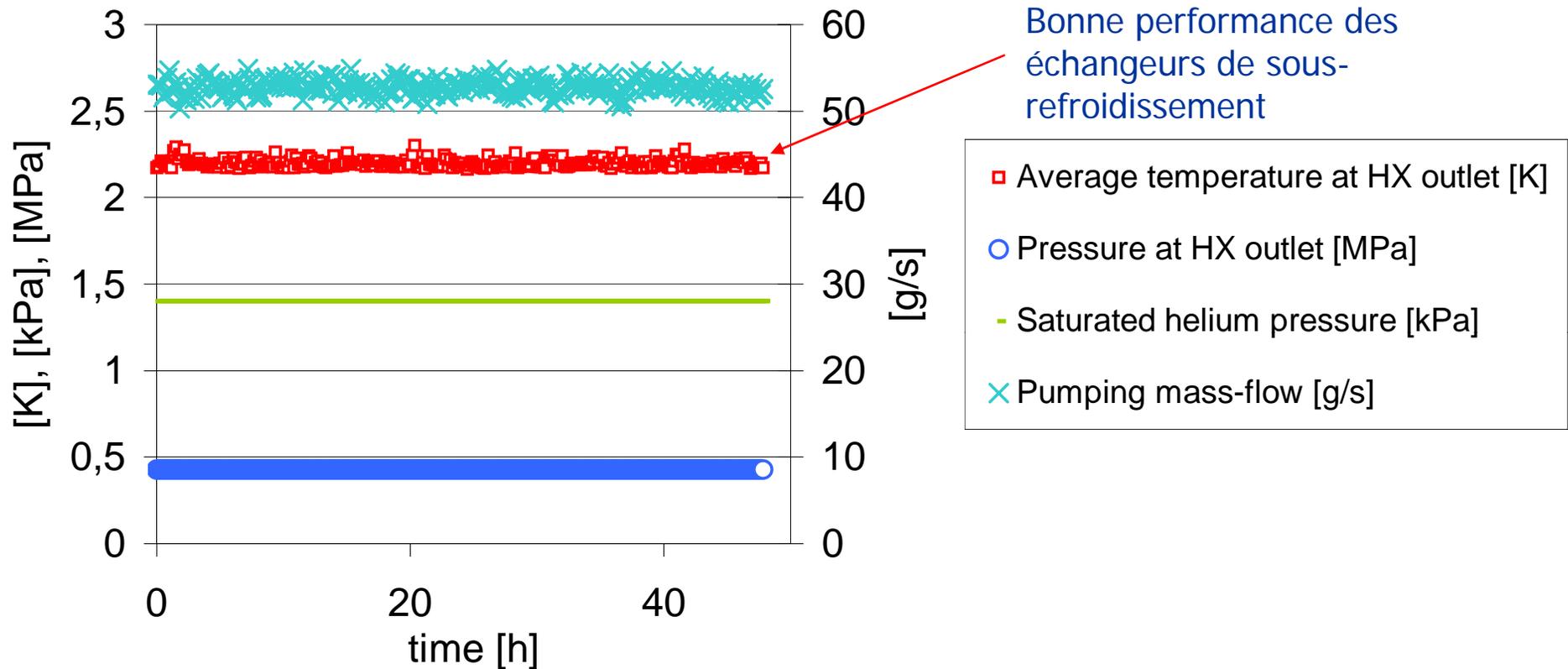
# Redondance entre boucles de refroidissement



Validation de la redondance entre boucle de refroidissement adjacente !



# Entrées de chaleur @ 1.9 K: Mesure globale du Secteur 7-8

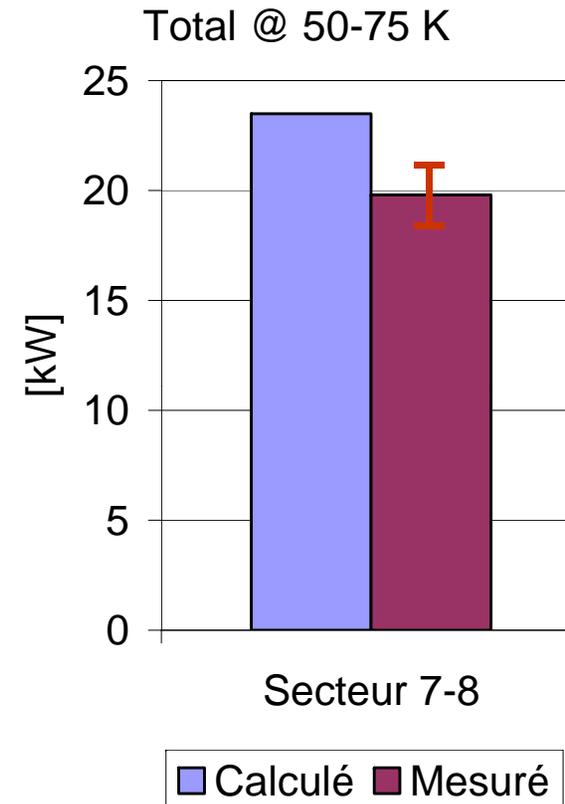
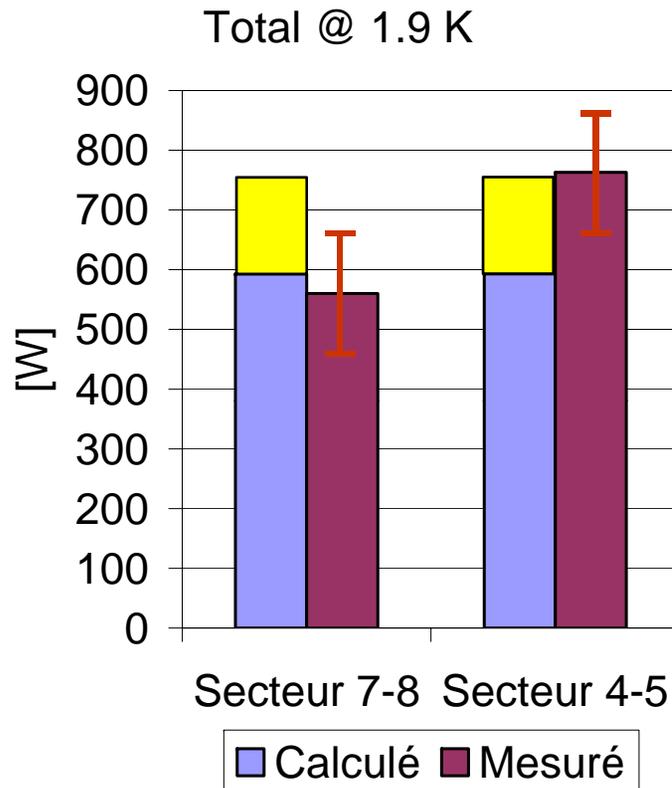


Entrée de chaleur totale de 961 W incluant 401 W de chauffage électrique additionnel  
→ 560 W d'entrée de chaleur à 1.9 K, i.e. 0.2 W/m (0.21 W/m calculé sans marge pour une cellule standard).

(Remarque: En moyenne, les écrans thermiques étaient plus froids d'environ 5 K, mais quelques cellules avaient un vide dégradé)



# Entrées de chaleur: Mesure globale (préliminaire)



Secteur 7-8: Ecrans sous-refroidis

Secteur 4-5: Certains supports pas bien thermalisés  
(+ ~10 W par cellules non-thermalisées)

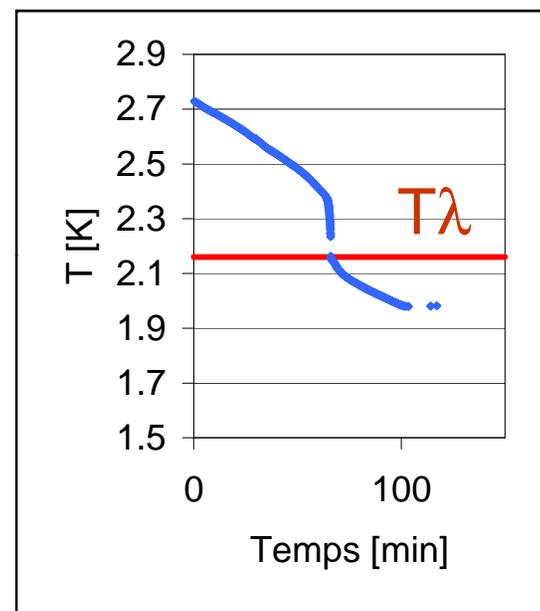
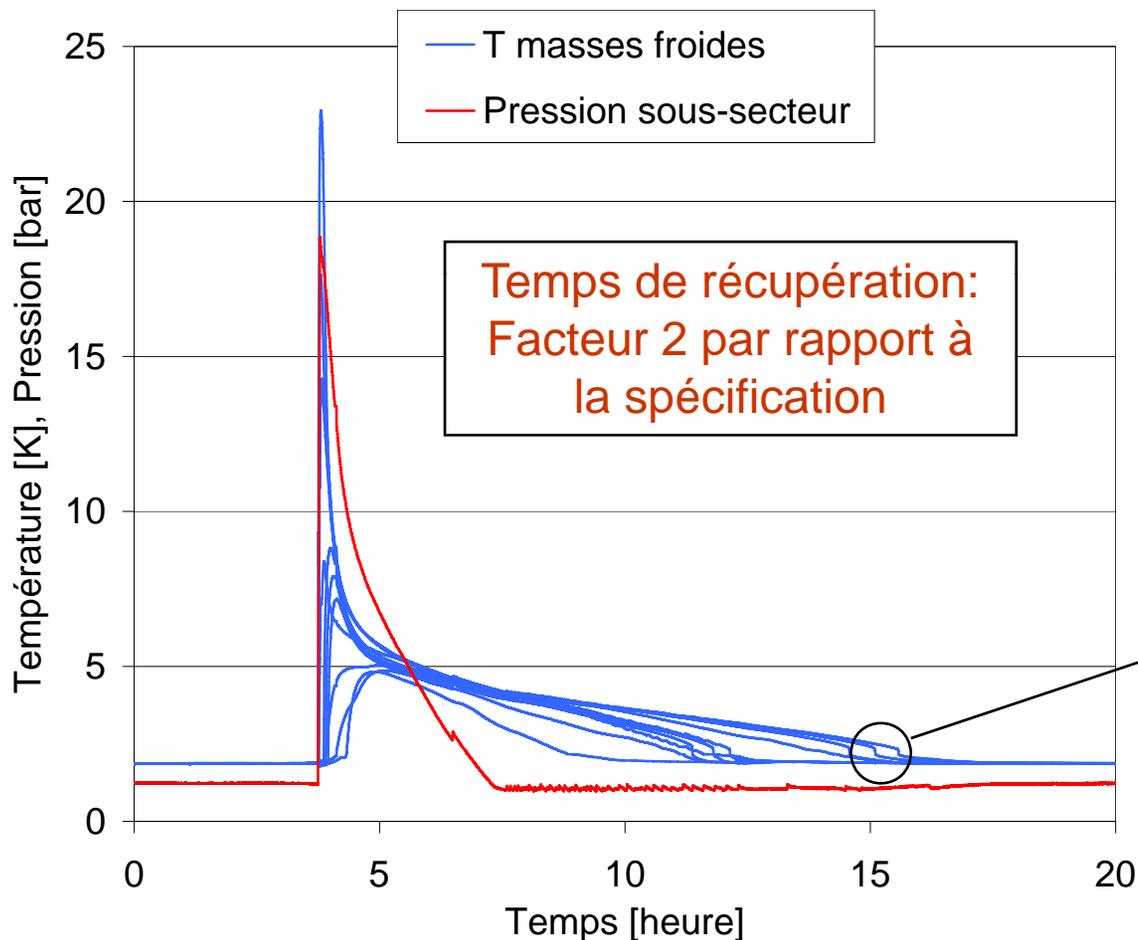
25 % de marge ajoutée aux valeurs calculées pour dimensionner les réfrigérateurs

## Validation de la performance thermique globale !



# Récupération des transitions résistives

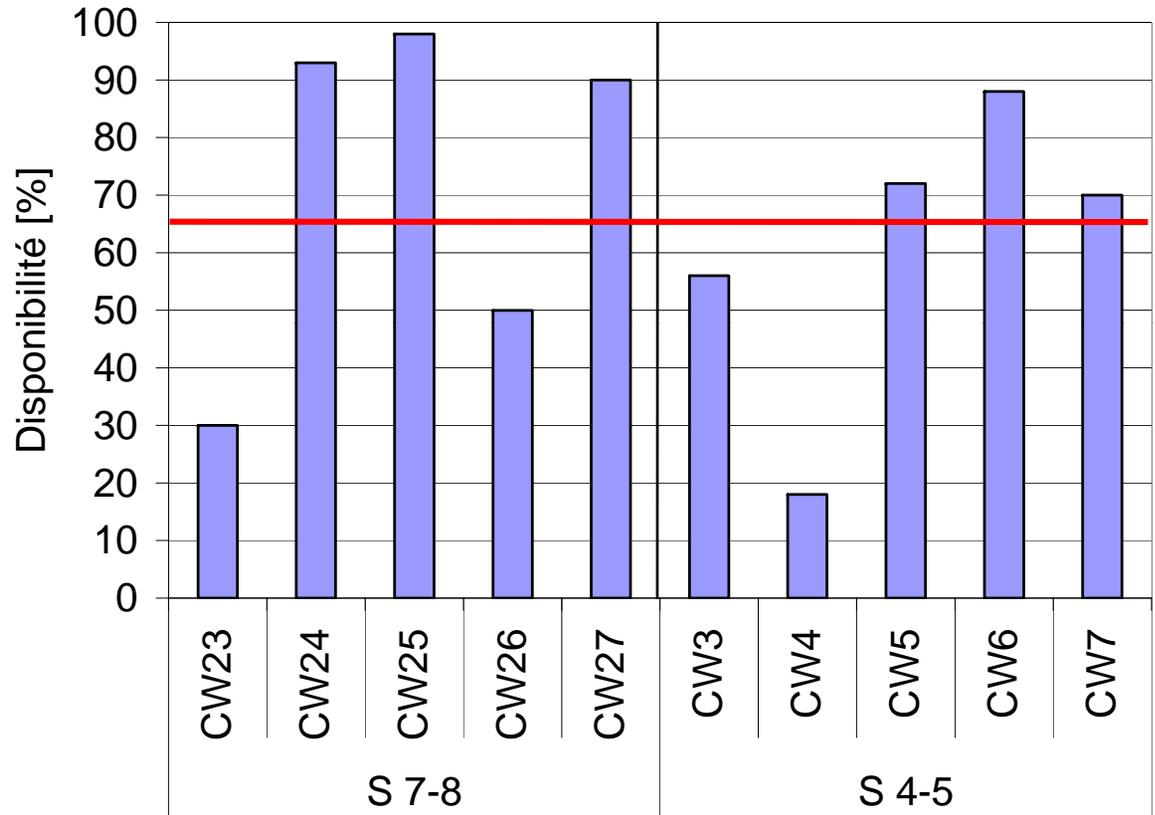
Transition résistive d'un dipôle à 10.3 kA dans un sous-secteur (2 cellules)



Passage de la transition  $\lambda$  un peu curieux !?



# Disponibilité pour les tests de puissance



~65 % de disponibilité



# Conclusion

- La mise en service des secteurs du LHC est en cours avec du refroidissement dans 5/8 secteurs. L'inventaire en HeII a dépassé les 20 tonnes.
- Les mises en froid des secteurs sont perturbées et demandent encore des améliorations pour être conformes aux durées attendues.
- Les réchauffements des secteurs sont conformes aux attentes
- Le refroidissement en hélium superfluide des secteurs à 1.9 K est conforme:
  - » Bonne stabilité des bains pressurisés et du contrôle
  - » La redondance prévue fonctionne et a déjà été mise à contribution
  - » L'inertie du bain pressurisé permet des arrêts de réfrigération jusqu'à 15 heures sans vider les masses froides (confort opérationnel).
- Les premières mesures d'entrées de chaleur sont encourageantes
- Le comportement cryogénique du système pendant les transitions résistives sont pour l'instant conformes aux attentes. Les temps de récupération après une transition résistive reste à optimiser.
- Ces résultats sont le fruit de 15 ans d'efforts soutenus. Un grand merci pour l'engagement des différentes équipes et collaborateurs qui ont contribué à cette réalisation.