



*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

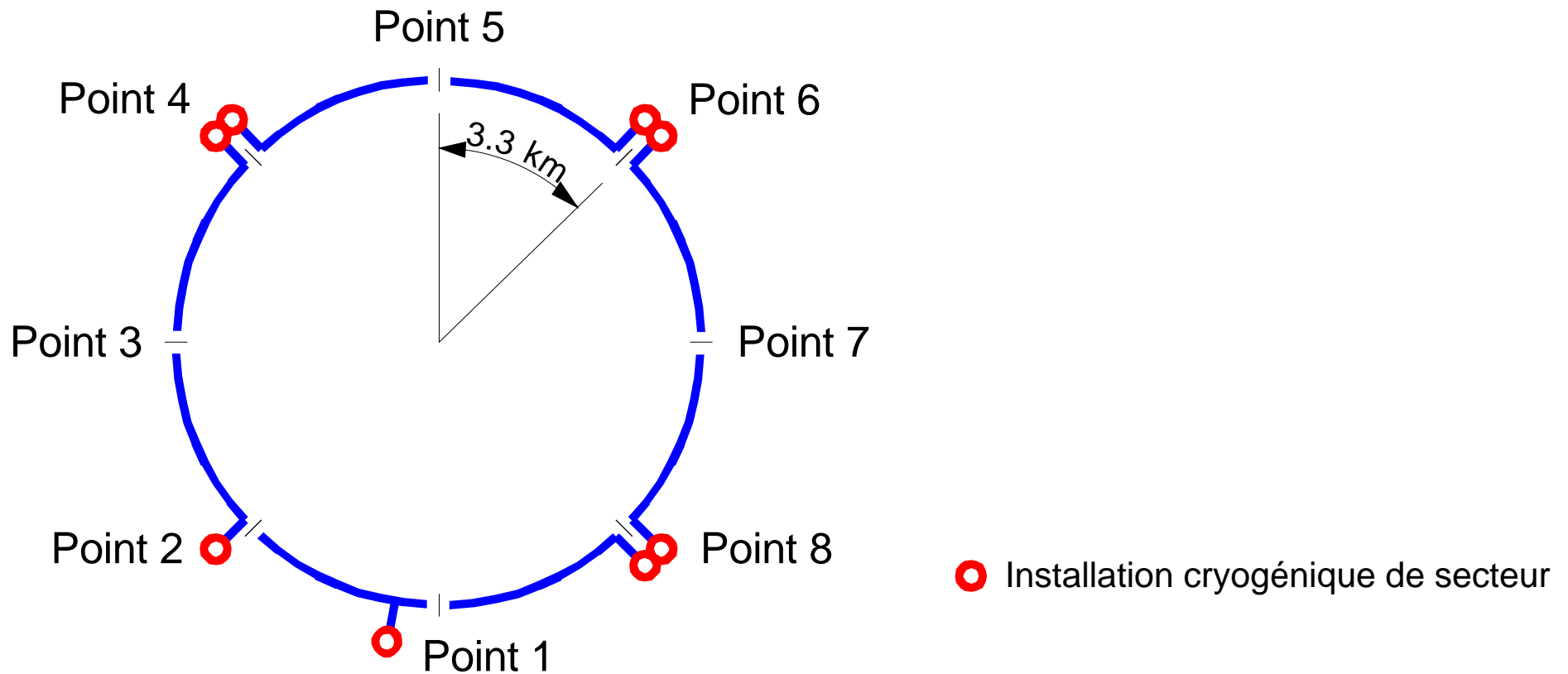
10 avril 2008



- **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**

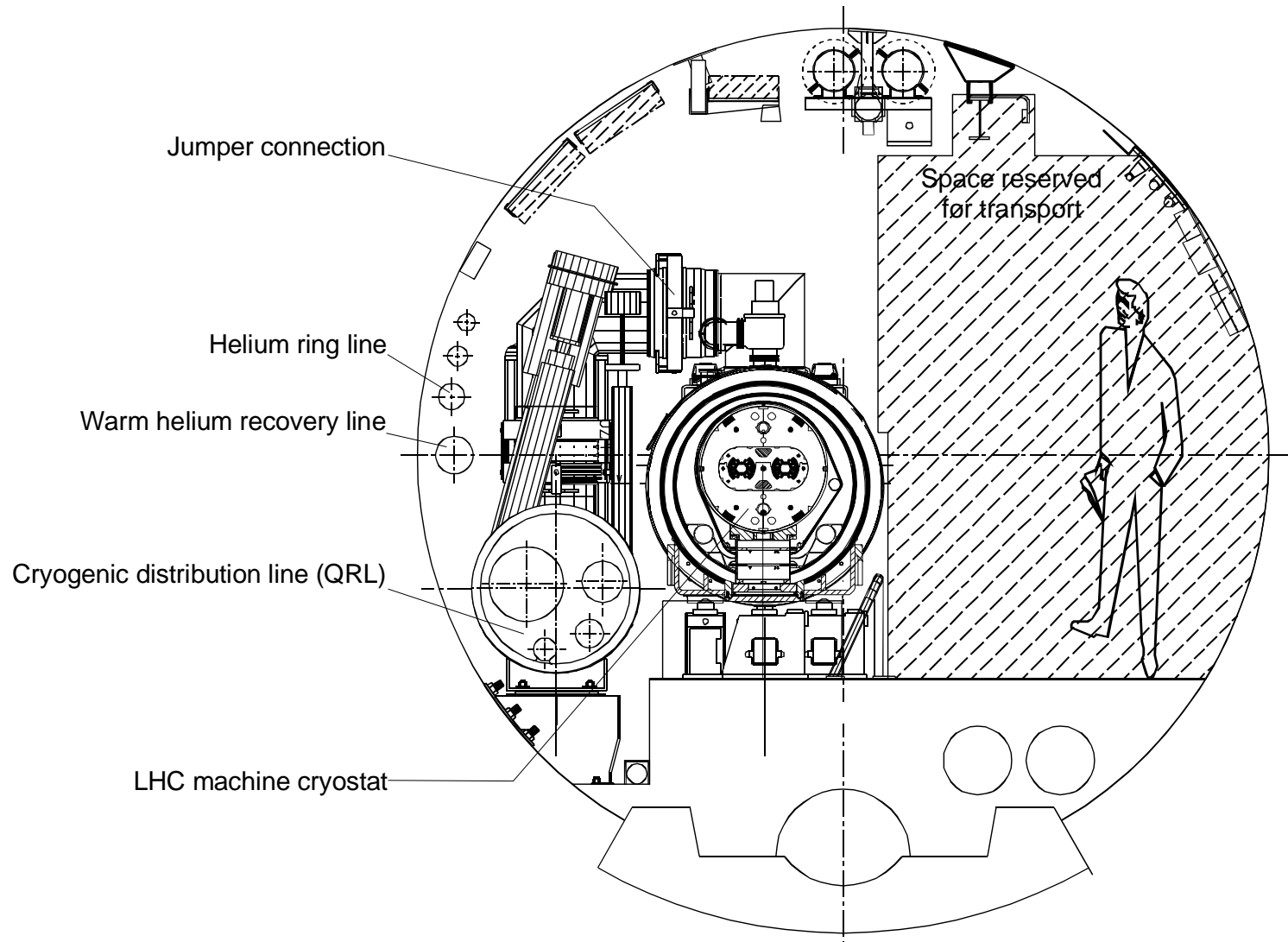


Layout du système cryogénique



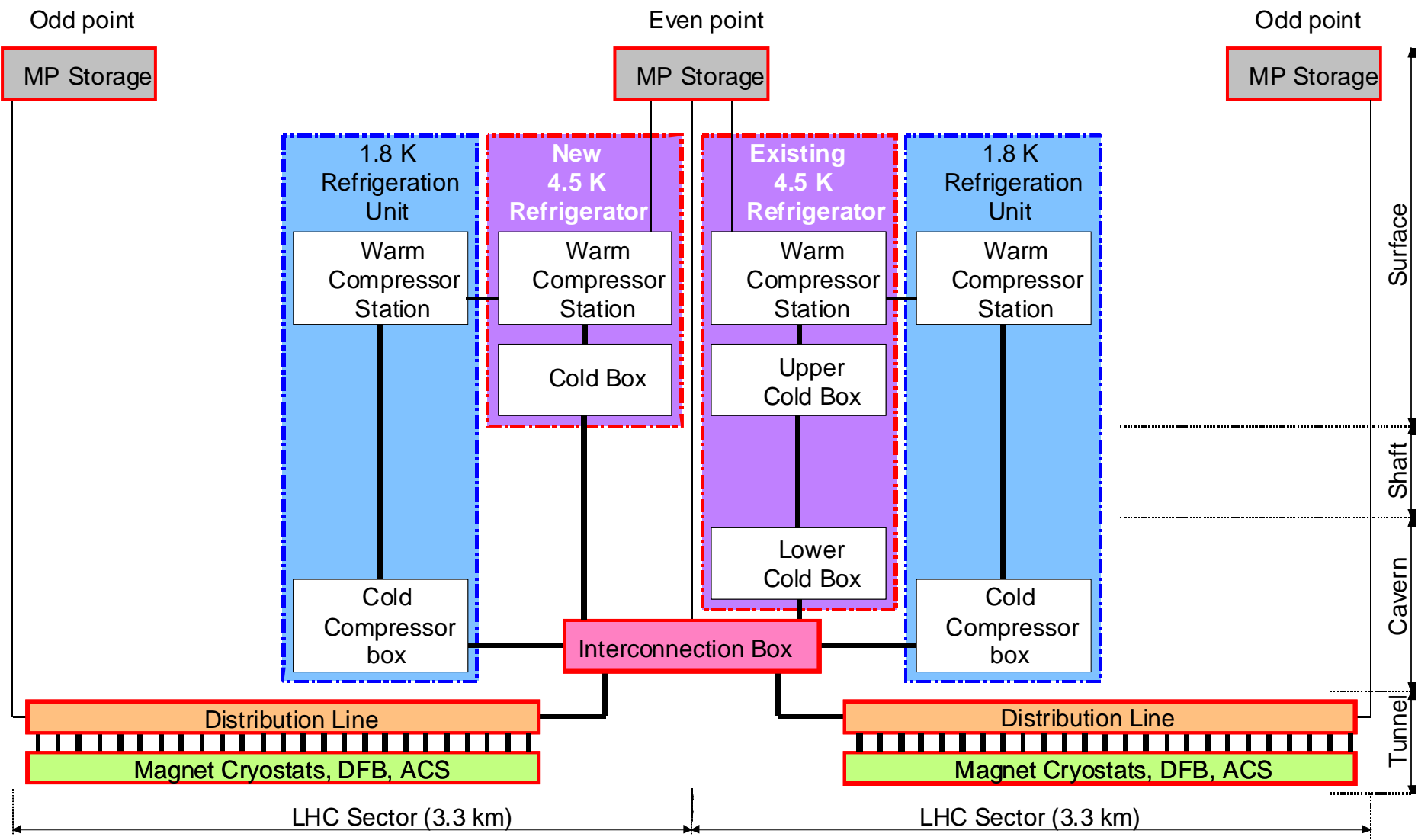


Coupe du tunnel





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)



Galerie de photos: Stockage et distribution



Stockages

Distribution





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

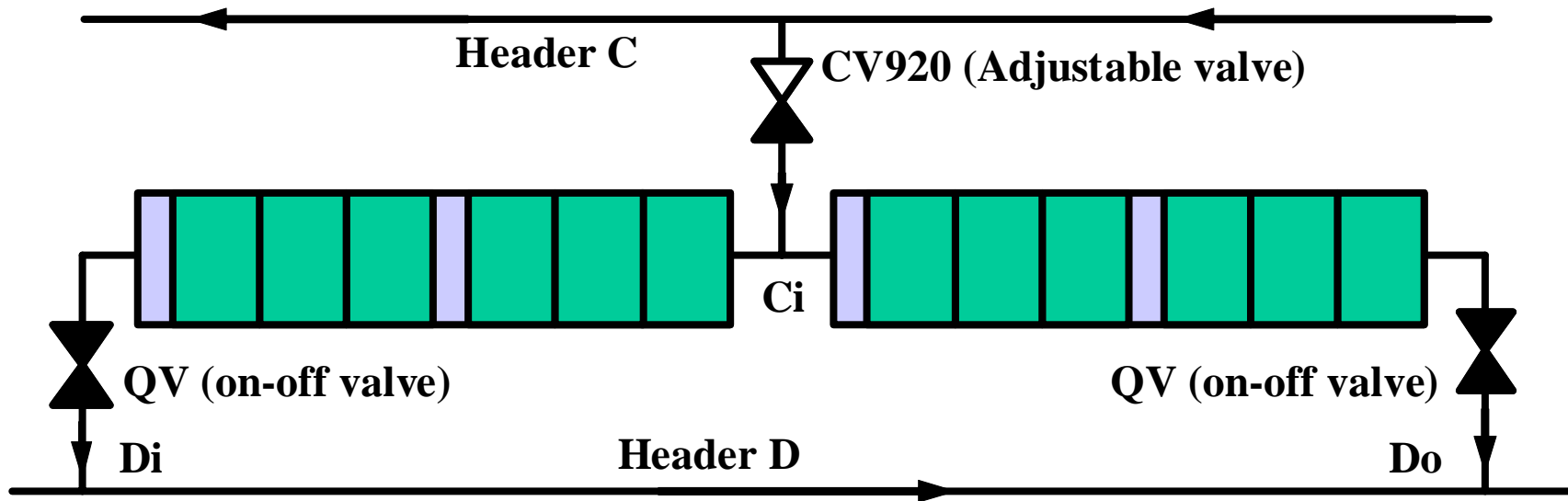


Dépotage de LHe & LN2:
~ 200 kCHF d'azote pour le refroidissement d'un secteur
~ 15 tonnes (120'000 l) de LHe pour le remplissage d'un secteur

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

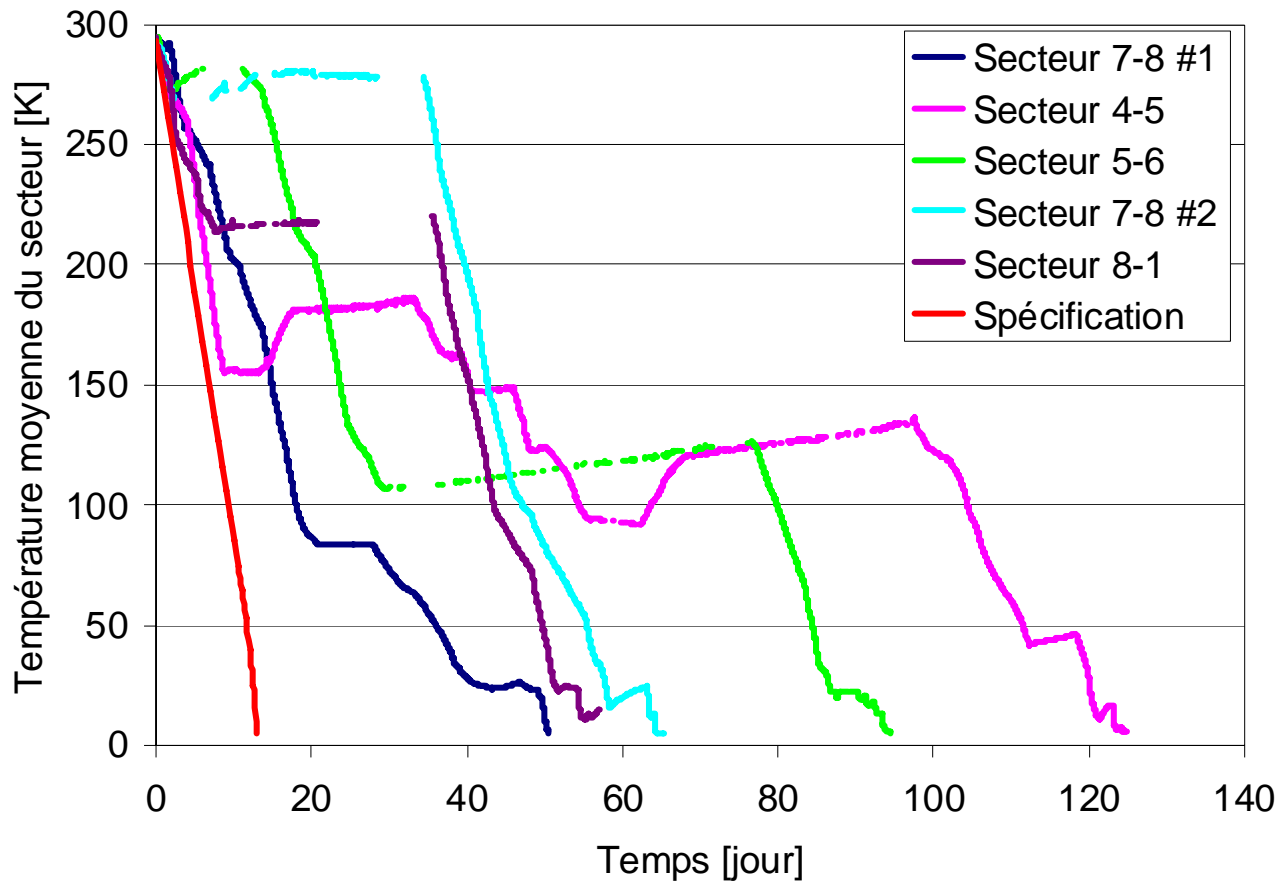




Mise en froid des 27 cellules (~107 m) en parallèle avec une vanne d'alimentation commune à deux cellules:
 → Déséquilibre de refroidissement si la perte de charge dans la ligne D n'est pas négligeable par rapport à celle d'une cellule. (Remède par circulation alternée)



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

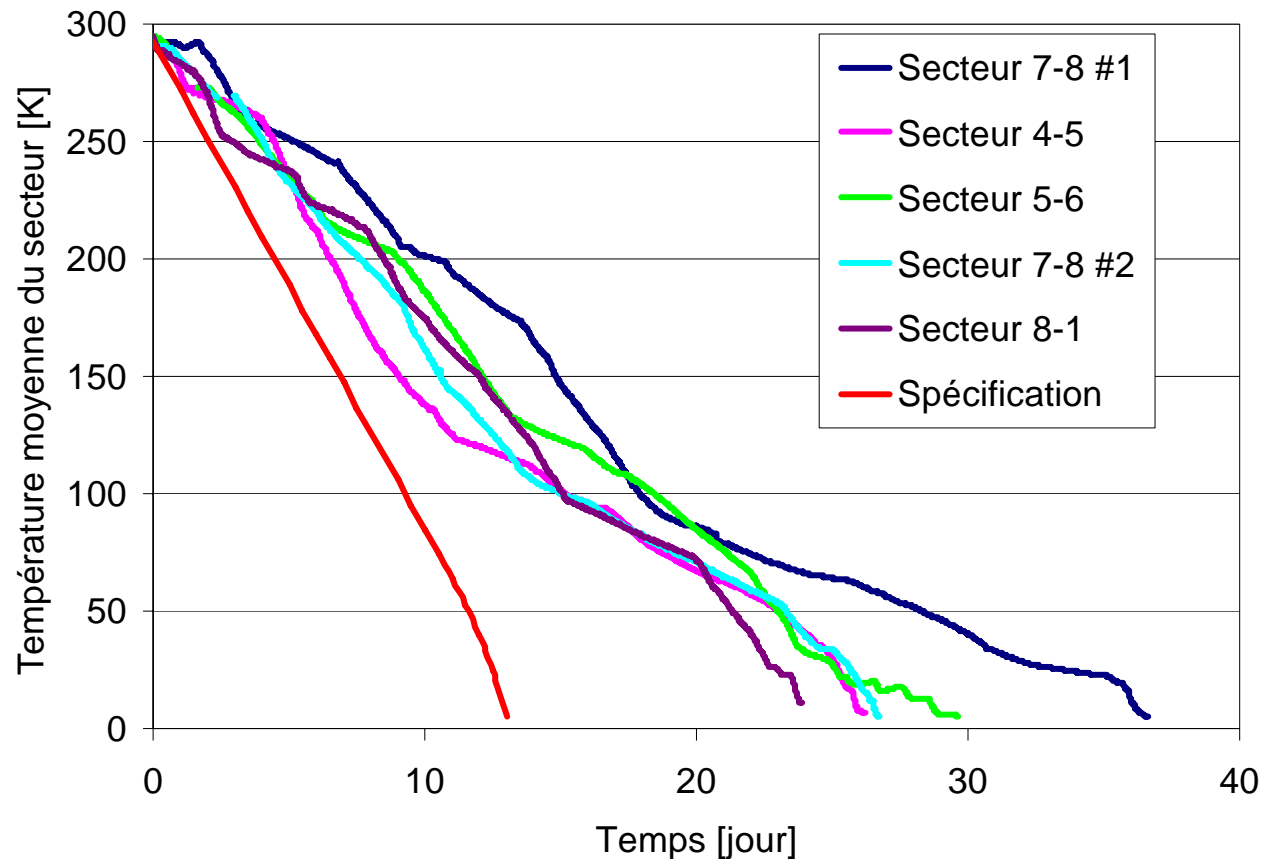
Aléas cryogéniques:

Déséquilibre entre cellules, arrêts réfrigérateurs,...

Facteur 4 à 10 par rapport à la spécification !



Mises en froid corrigées

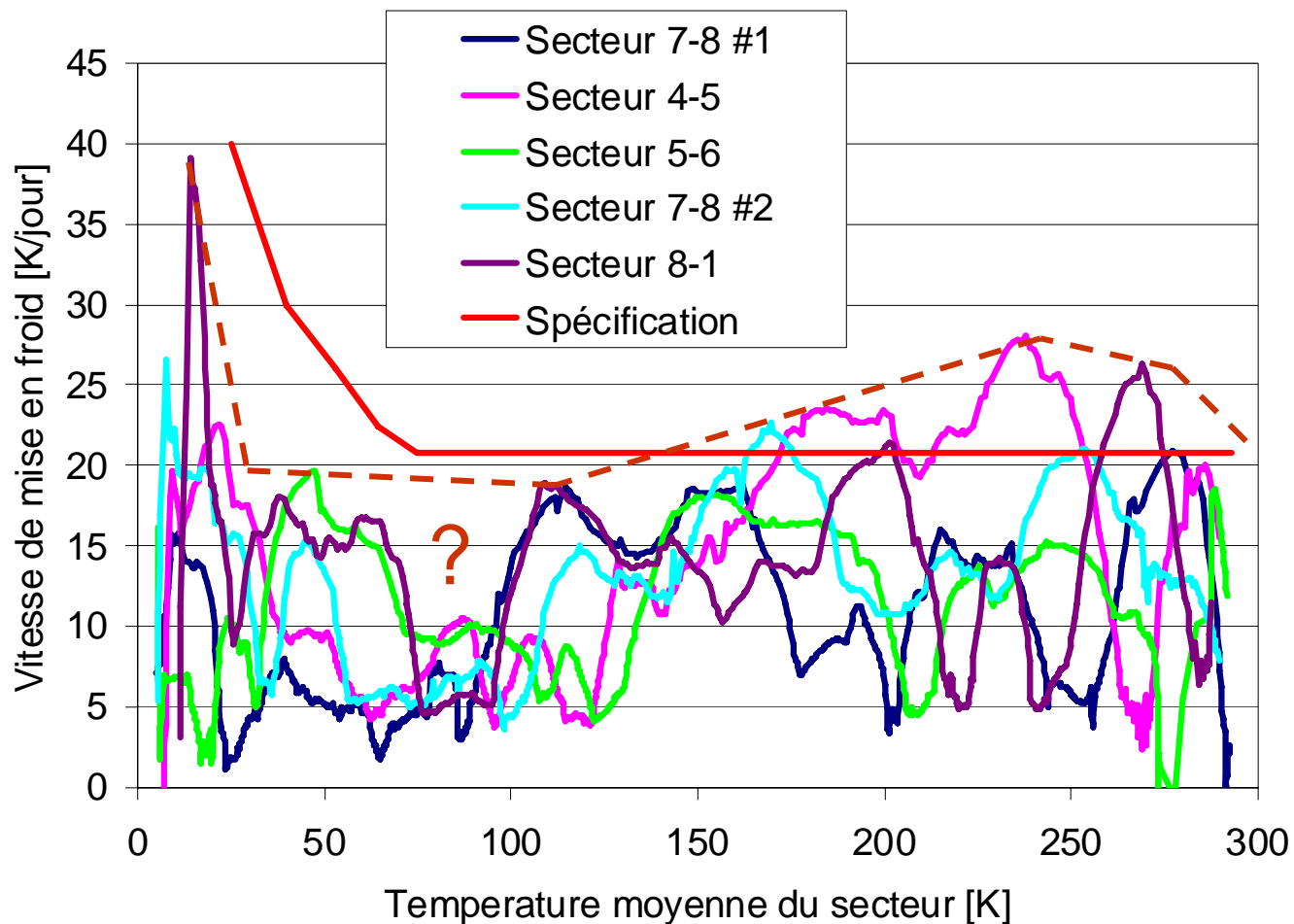


Mises en froid corrigées
des aléas externes et
arrêts cryogéniques

Facteur 2 à 3 par rapport à la spécification !



Vitesse de mises en froid

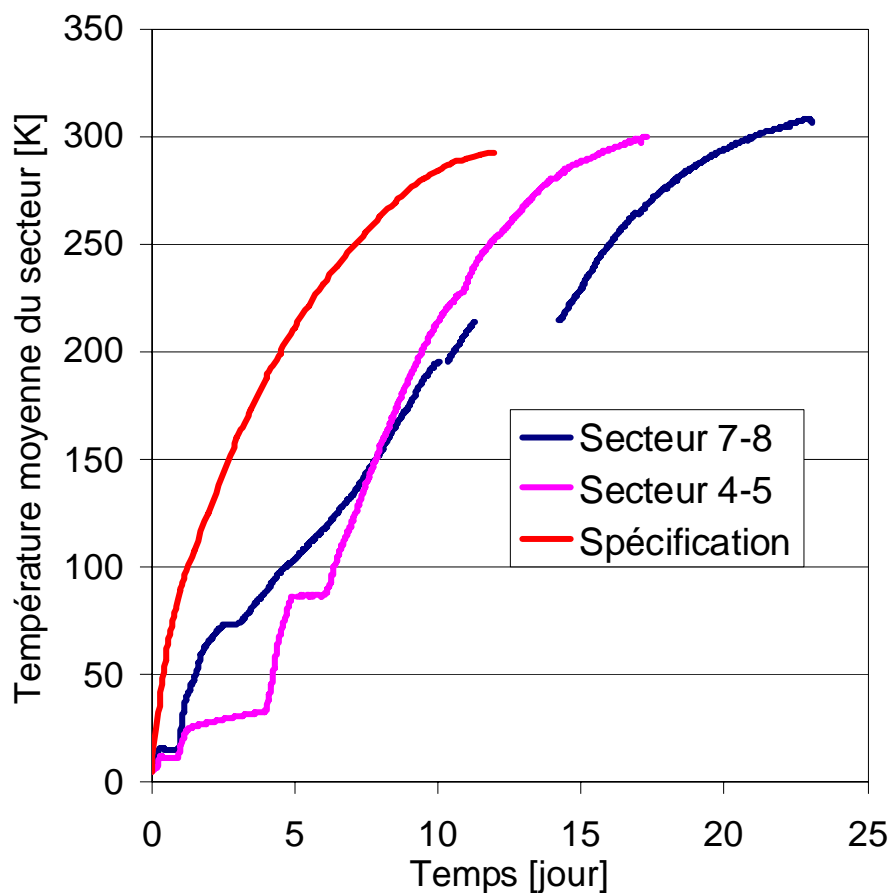


Courbe enveloppe encourageante !

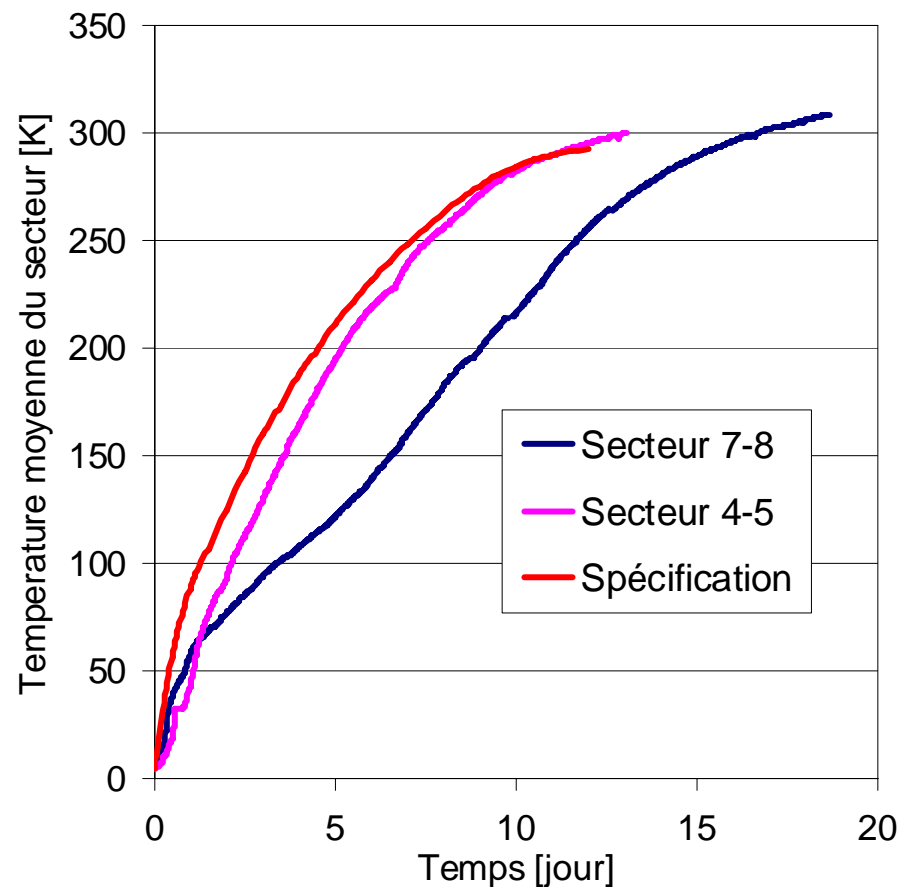


Réchauffement des secteurs

Utilisation d'un réchauffeur électrique de 600 kW



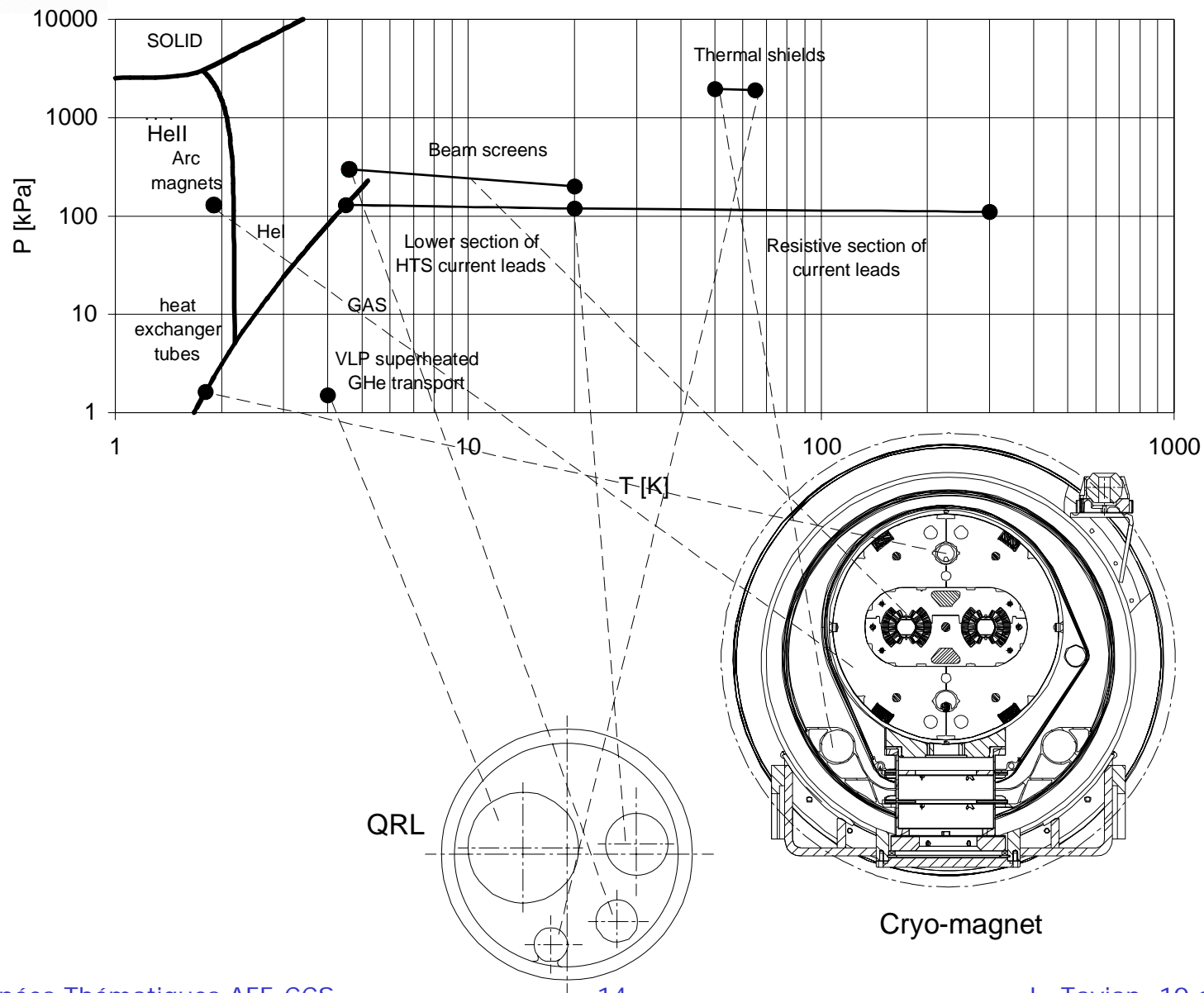
Avec aléas:
Facteur 1.5 à 2

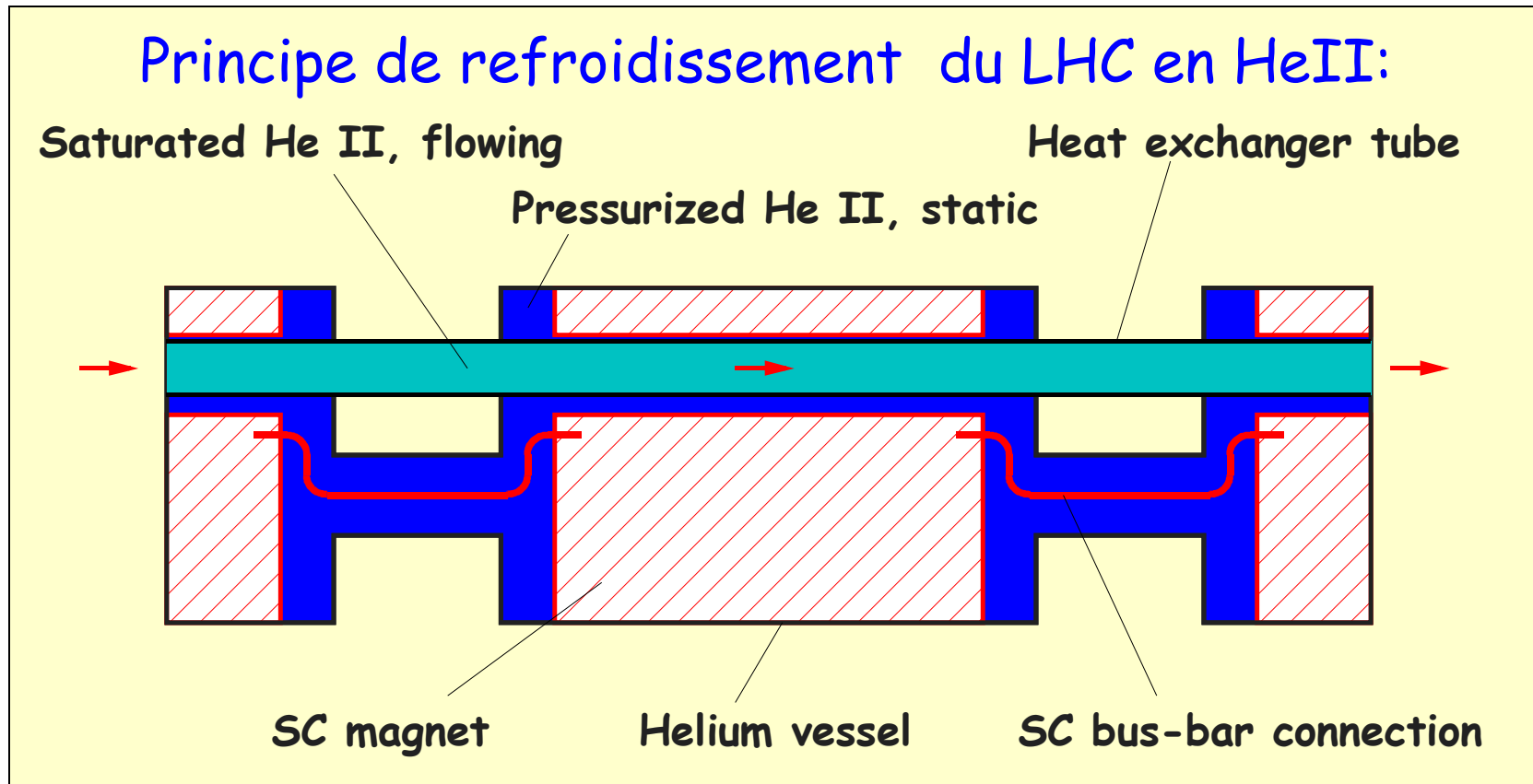


Sans aléas:
Spécification atteinte !

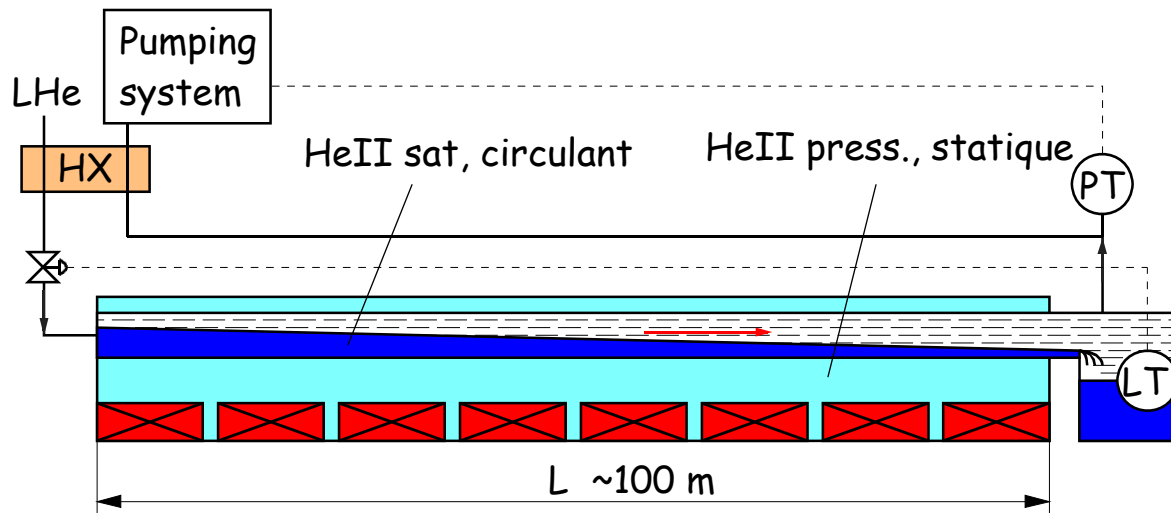


Marche normale



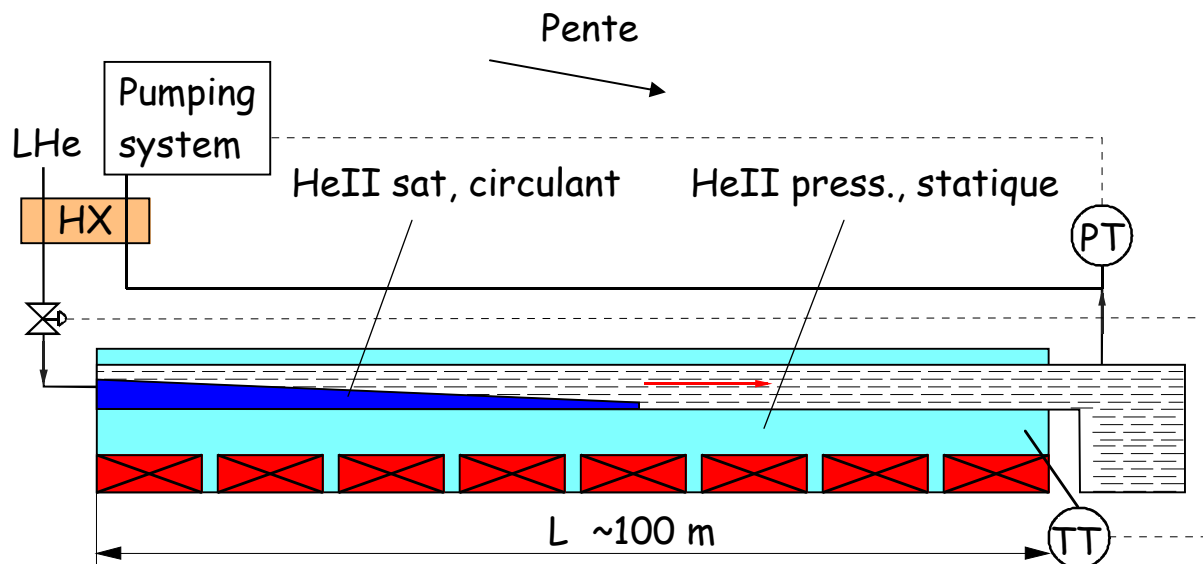


Echangeur de chaleur: Tube en Cu avec un diamètre DN50
 Conductance thermique totale: $\sim 100 \text{ W/m.K}$
 (i.e., pour 1 W/m , une différence de température de 10 mK)



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

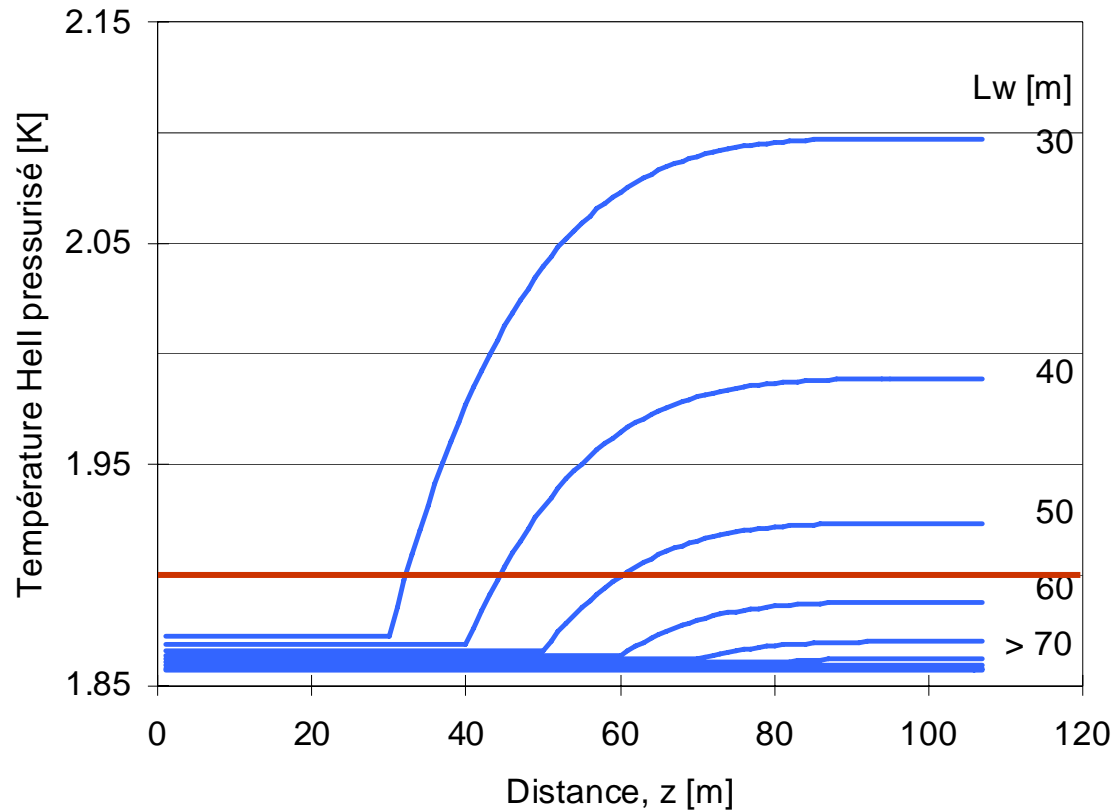
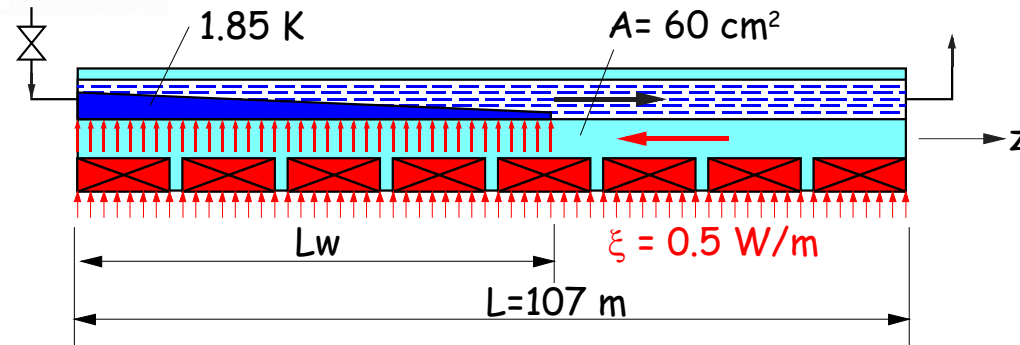


Contrôle de température:

- 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

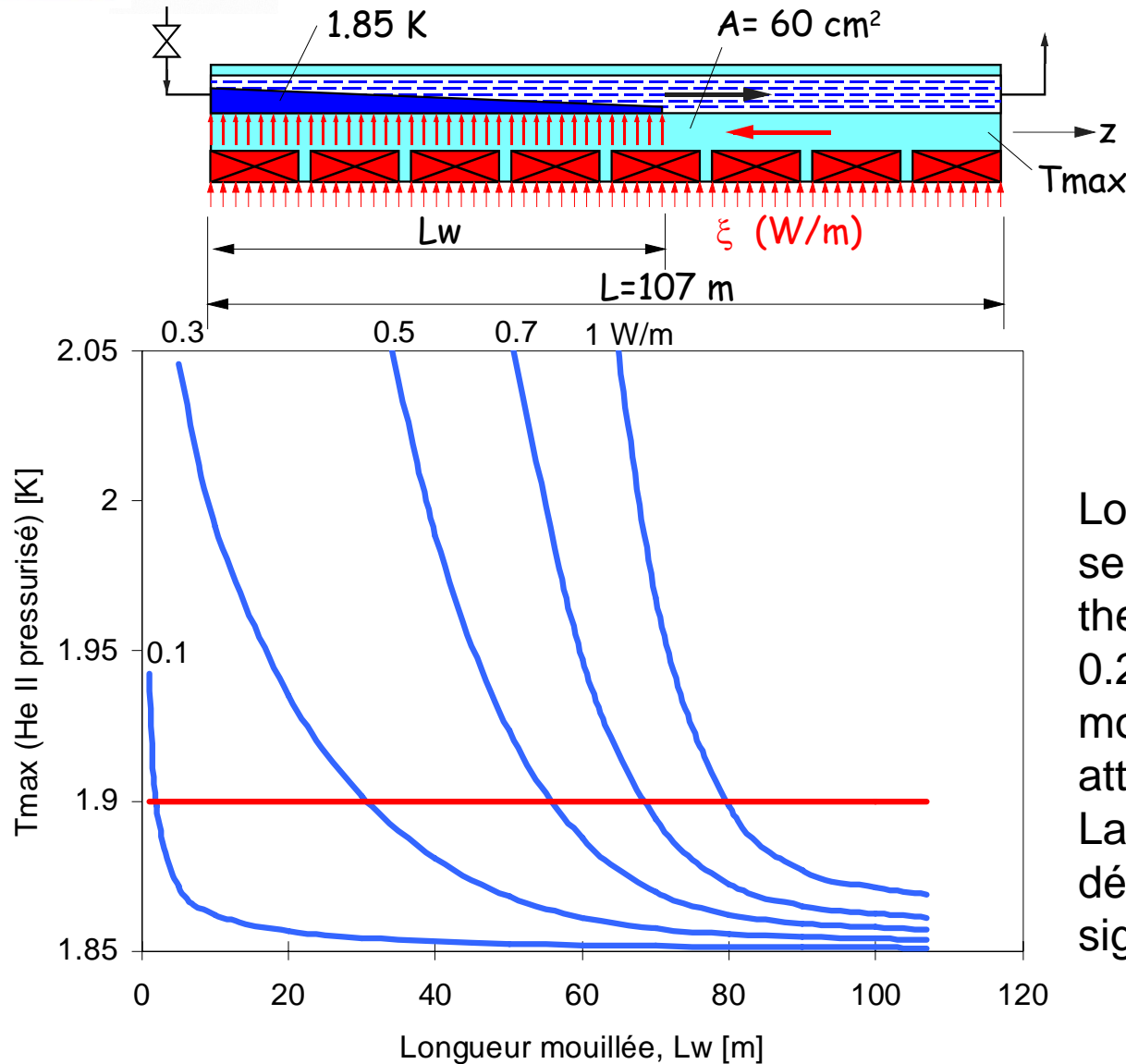


Profil de température avec mouillage partiel



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

Tmax vs longueur mouillée

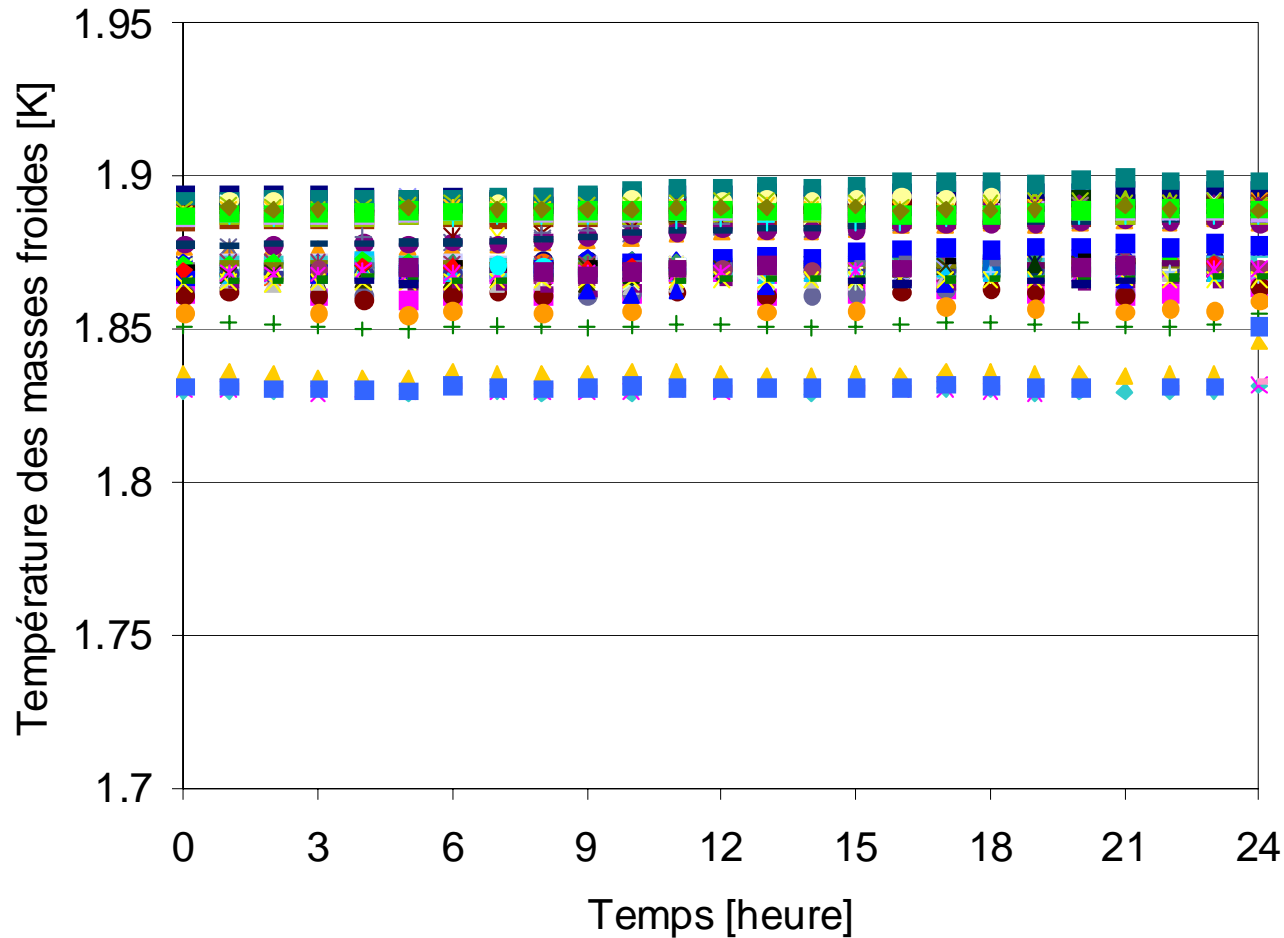


Lors de la mise en service des secteurs, avec des charges thermiques statiques de 0.2 W/m, une longueur mouillée d'environ 20 m est attendue:
La marge vis-à-vis du débordement est donc significative



Refroidissement du Secteur 4-5

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



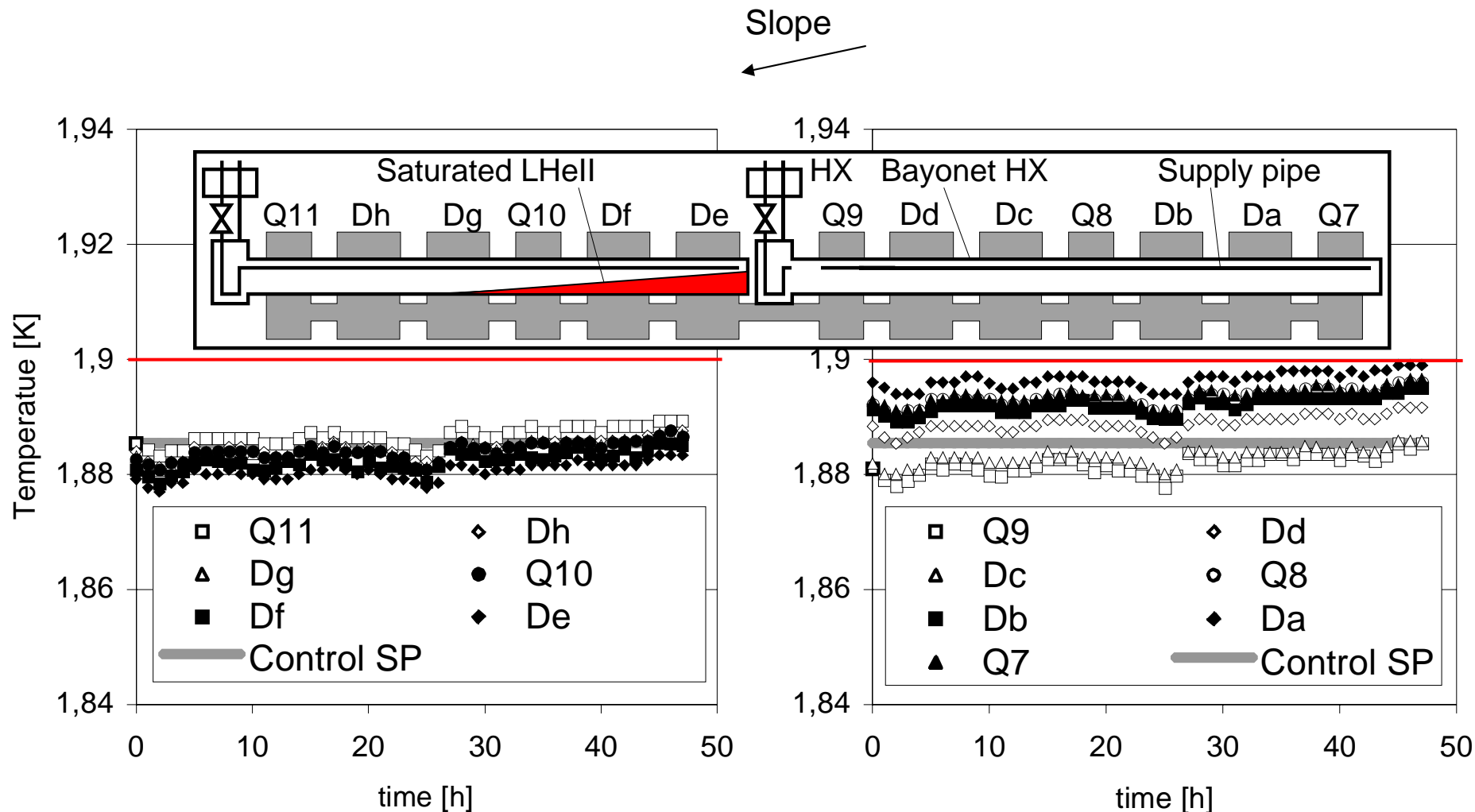
Très bonne stabilité sans problème de contrôle ni de débordement:

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

Validation de la qualité de la thermométrie du LHC !



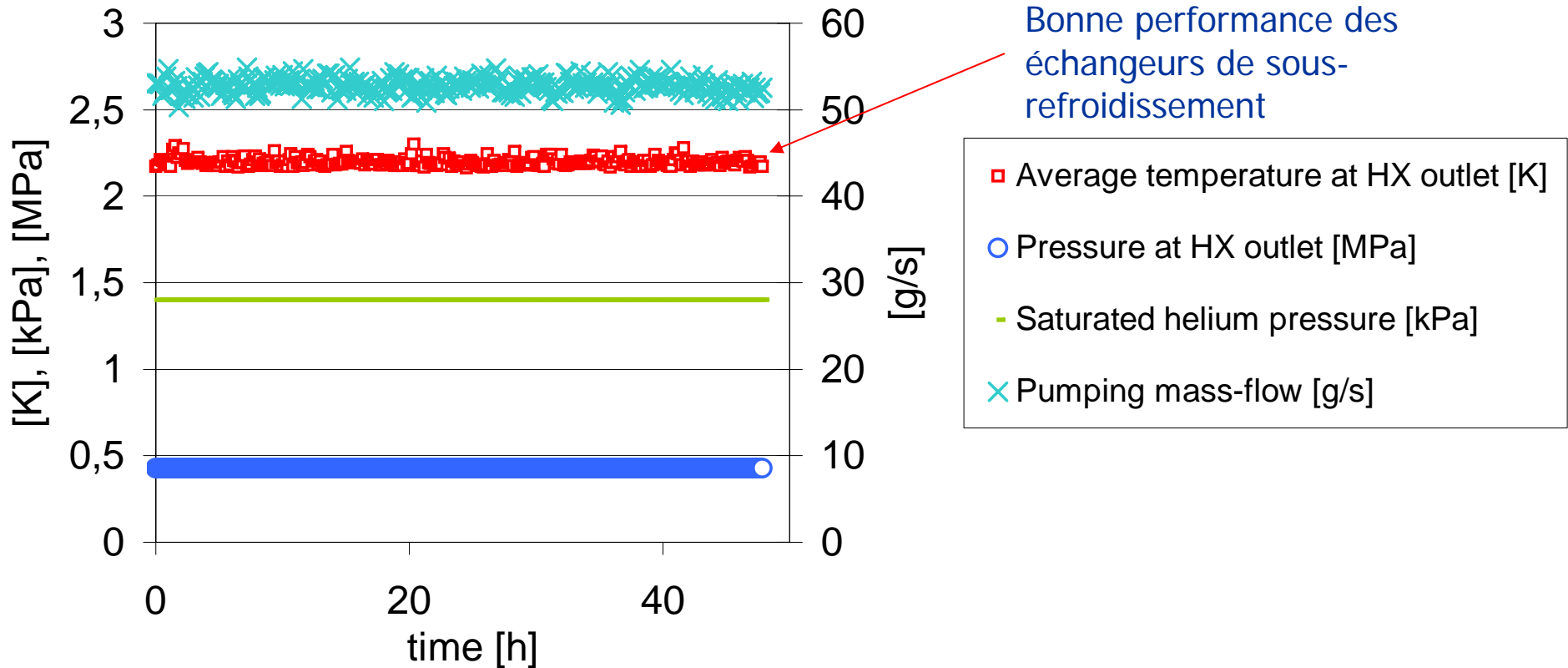
Redondance entre boucles de refroidissement



Validation de la redondance entre boucle de refroidissement adjacente !



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

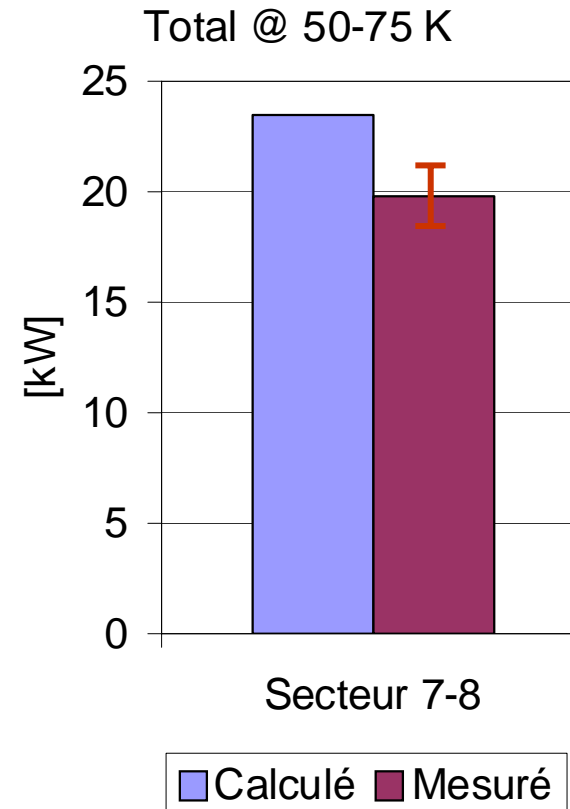
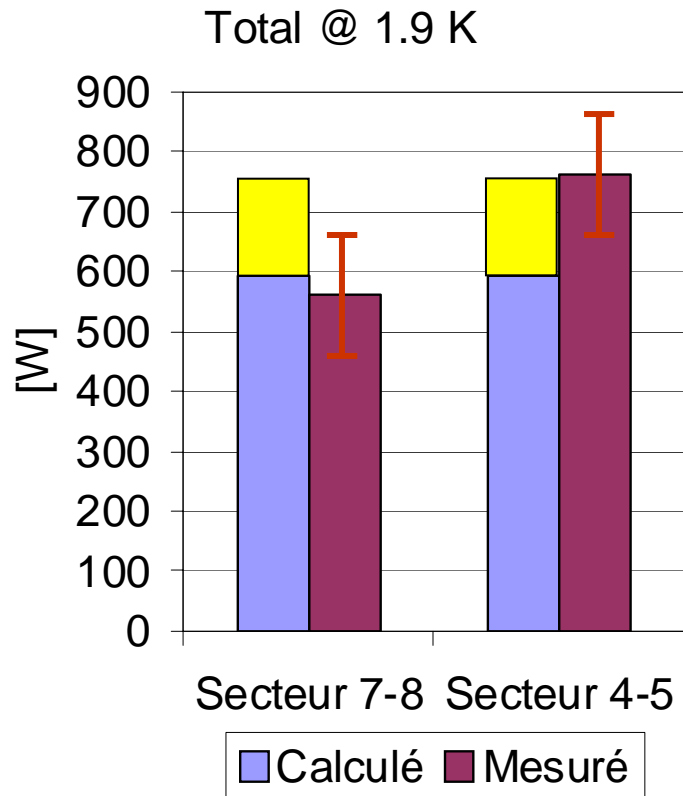


Entrée de chaleur totale de 961 W incluant 401 W de chauffage électrique additionnel
→ 560 W d'entrée de chaleur à 1.9 K, i.e. 0.2 W/m (0.21 W/m calculé sans marge pour une cellule standard).

(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)

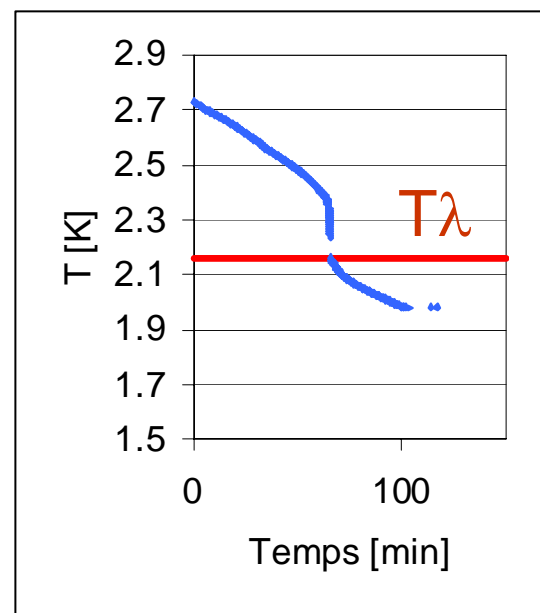
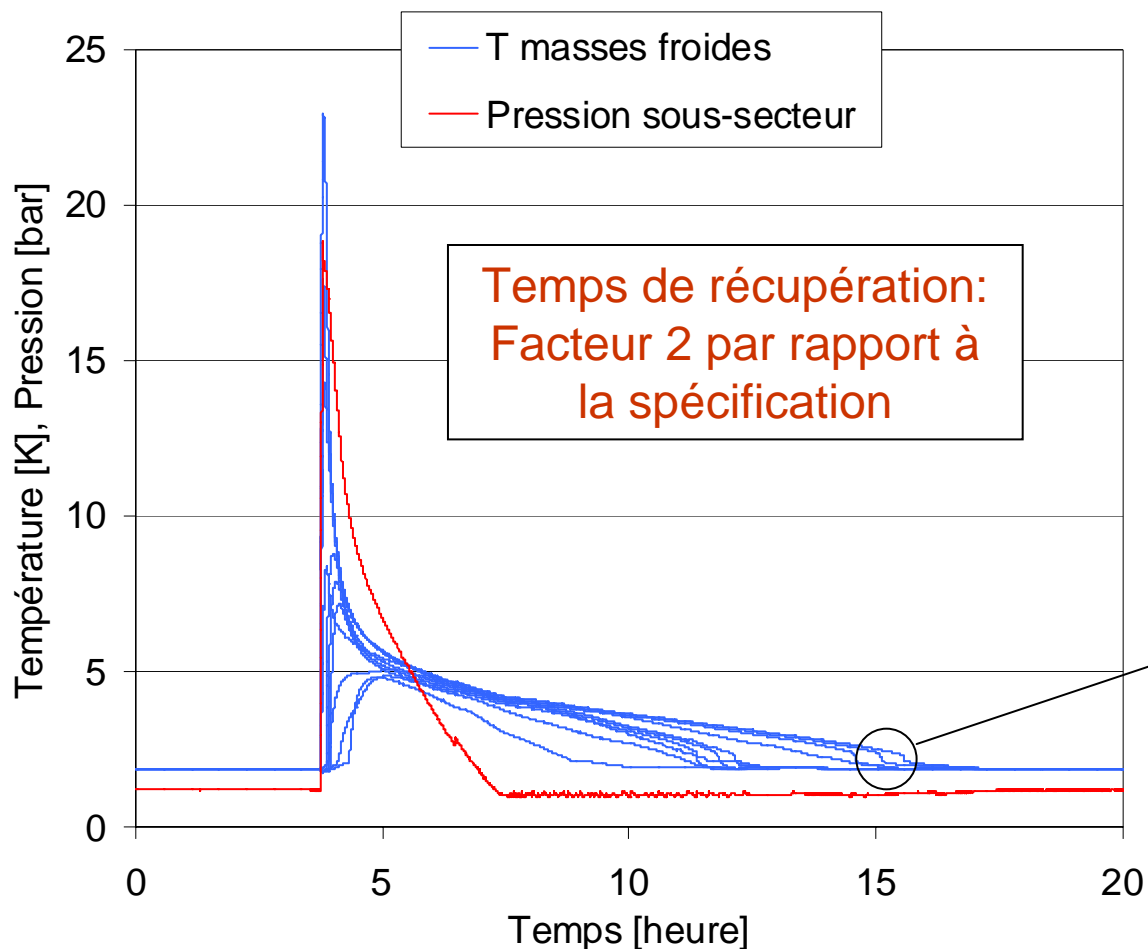
25 % de marge ajoutée aux valeurs calculées pour dimensionner les réfrigérateurs

Validation de la performance thermique globale !



Récupération des transitions résistives

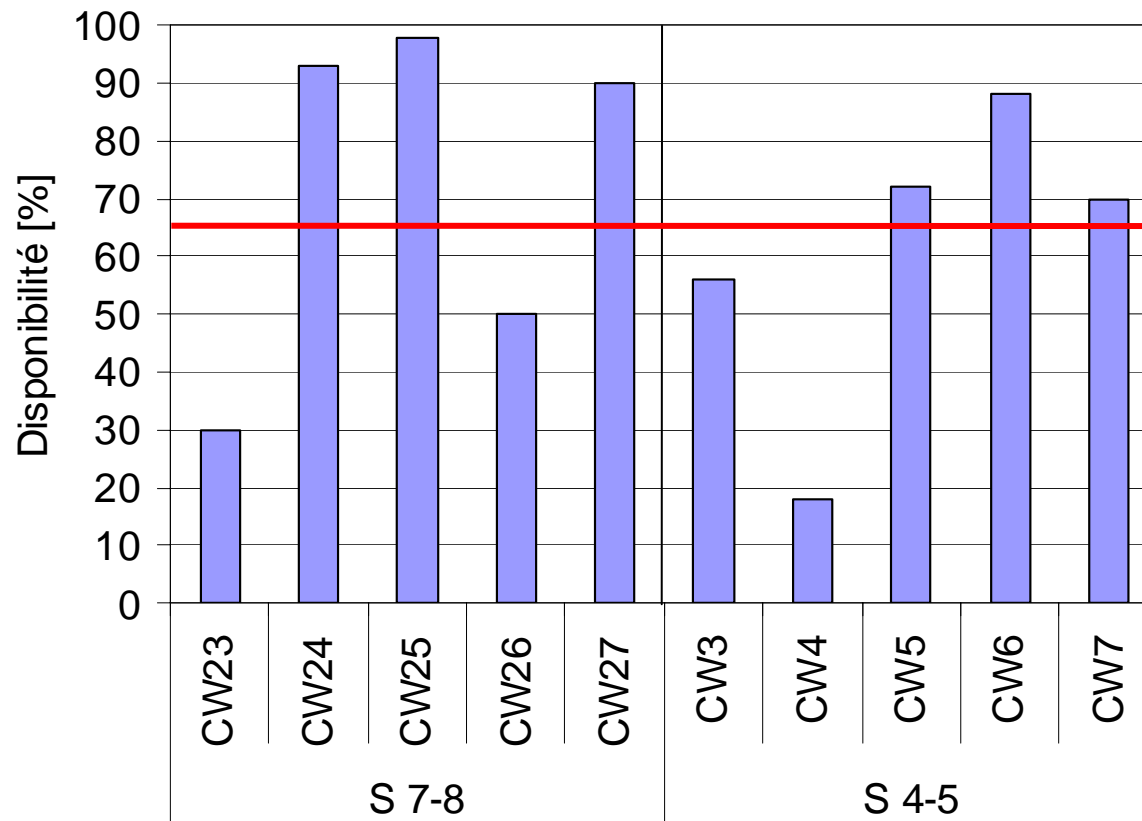
Transition résistive d'un dipôle à 10.3 kA dans un sous-secteur (2 cellules)



Passage de la transition λ 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.