



Influence de la couche extérieure de protection (Vitrulan®) sur les matelas de superisolation

V. Benda, Ch. Darve, T. Wikberg

1. INTRODUCTION

Lors de la réception des matelas de superisolation équipant le Modèle Thermique du Cryostat (CTM3), il a été noté que ces derniers sont recouverts d'un filet extérieur en Vitrulan® [1]. Le rôle de ce filet en fibre de verre est de rigidifier les matelas de 10 couches de superisolation (type C : tableau 1), afin de rendre plus pratique leur installation sur les écrans des cryostats du dipôle. La fragilité de cette superisolation nécessite un renfort supplémentaire pour faciliter l'assemblage, le transport et l'installation finale.

L'émissivité de la fibre de verre étant proche de celle du corps noir, le problème posé est de s'assurer que le transfert de chaleur par radiation entre les différents niveaux de température du dipôle n'est pas trop accru par les caractéristiques de cette couche de protection.

Le but de cette note est de quantifier l'apport de chaleur dû à l'utilisation du Vitrulan®. Cette étude a pour conséquence la prévision de tests expérimentaux au laboratoire de cryogénie "Cryolab".

2. DEFINITION DU PROBLEME

2.1. L'écrantage

Le problème peut être défini en considérant la conception des écrantages du cryostat autour de la masse froide (figure 1). Les pertes thermiques de la masse froide sont régies par la combinaison des entrées de chaleur entre le tank à vide et l'écran thermique, puis entre l'écran thermique et l'écran radiatif et, finalement, entre l'écran radiatif et la masse froide. Afin de minimiser ces pertes et de conserver la masse froide à 1.9 K, des thermalisations aux niveaux de températures [5 – 20 K] et [50 – 75 K] sont prévues au moyen de lignes cryogéniques.

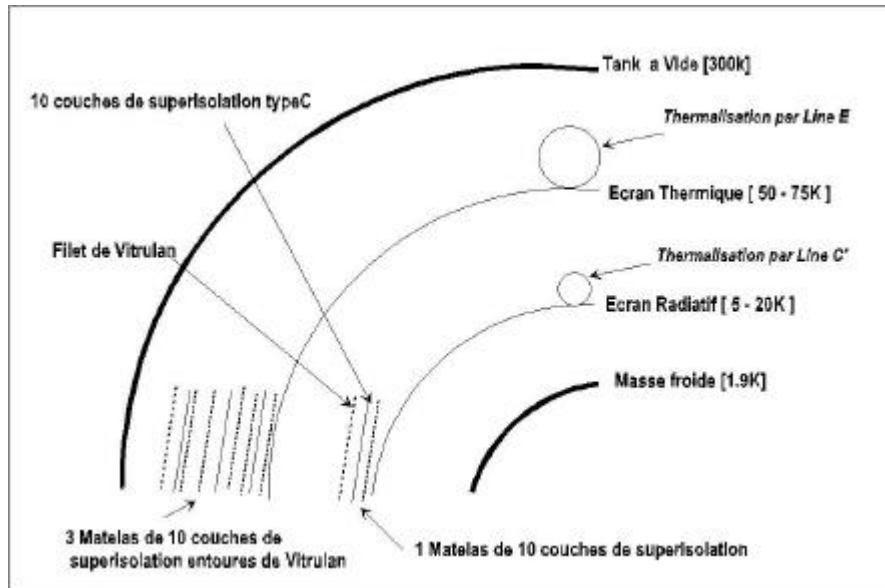


Figure 1 : Schéma des écrantages du cryostat des aimants du LHC

Afin de simplifier les calculs, nous ferons l'hypothèse des températures suivantes :

Temp. tank à vide = 300 K,	Temp. écran thermique = 77 K,	Temp. écran radiatif = 4.2 K.
----------------------------	-------------------------------	-------------------------------

Par ailleurs, ces valeurs de températures seront celles utilisées pour des tests au “Cryolab”. Ainsi les deux rangs de températures [300 – 77 K] et [77 - 4.2 K] se veulent représentatifs des conditions de fonctionnement des cryostats du dipôle LHC.

@ 50 - 75 K	Ecran thermique activement refroidi + superisolation type C, 30 couches
@ 4.5 - 50 K	Ecran radiatif activement refroidi + superisolation type C, 10 couches
Superisolation	Type C : * multicouches, double aluminisation ($2 \times 400 \text{ \AA}$) du film : Mylar® (6 μm), * espaceur tulle en polyester (0.025mm), masse spécifique 5g/m ² , maillage 2*3 mm ²

Tableau 1 : Proposition pour l'écrantage du cryostat dipôle LHC et CTM3

Le modèle mathématique développé pour calculer la contribution du Vitruan® dans le transfert thermique au travers de la superisolation est basé sur les formules de Boltzmann (radiation) et de Fourier (conduction). Le couplage de ces deux modes de transfert sera utilisé pour les deux échelles de températures aux limites [Tc – Tf] soit explicitement : [300 K – 77 K] et [77 K - 4.2 K].

La démarche consiste à déterminer les flux thermiques entre les différentes surfaces maintenues aux températures indiquées.

2.2. Le principe de calcul

L'utilisation du Vitrulan® entraîne principalement une différence de températures de la couche extérieure entre les deux cas : sans Vitrulan® (cas 1) et avec Vitrulan® (cas 2). La température de cette couche extérieure est notée T_i , soit pour le cas 1 et le cas 2 : T_1 et T_2 .

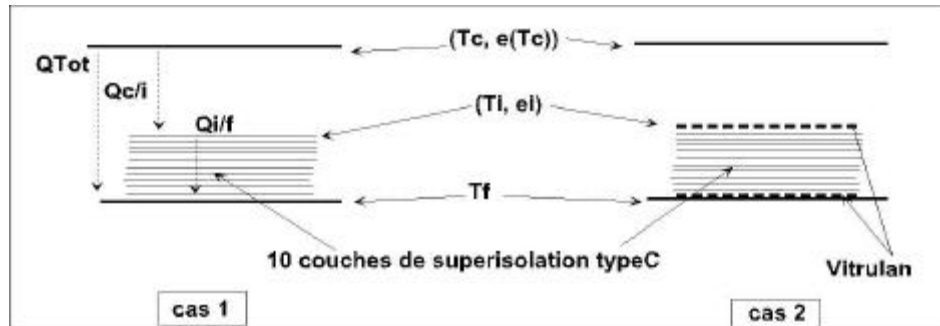


Figure 2 : Schéma de principe avec et sans Vitrulan®

L'approche mathématique considère quatre combinaisons des paramètres T_c , T_f dans les cas 1 et cas 2 (voir configuration du tableau 3).

Le flux de chaleur entre 77 K et 4.2 K, au travers des 10 couches de superisolation type C, a été mesuré au CERN [2]. En ce qui concerne les flux de chaleur mesurés entre 77 K et 300 K pour 30 couches de superisolation, les données proviennent de la bibliographie [3] et ont été confirmées par les mesures réalisées sur le CTM2 [4].

On définit les quantités suivantes :

- Q_{Tot} le flux de chaleur entre T_c et T_f ,
- $Q_{c/i}$ le flux de chaleur entre les surfaces T_c et la couche extérieure i ,
- $Q_{i/f}$ le flux de chaleur entre cette même couche i et la surface à la température T_f .

Le principe de calcul est l'égalité de ces quantités : $Q_{c/i} = Q_{i/f} = Q_{tot}$.

La procédure est alors la suivante :

1. Grâce à la formule de Boltzmann, nous pouvons connaître la température (T_{i1}) de la couche extérieure du cas 1.
2. Puis il suffit de considérer l'application de la relation de Fourier pour en déduire la conductivité thermique (cond) au travers du matelas de superisolation. Ces paramètres permettent de caractériser le comportement de la superisolation sans Vitrulan® (cas 1).
La répartition du Vitrulan® et de la superisolation (Mylar® aluminisé) sur la couche extérieure ont été estimées à 30% et 70%.
3. Nous pourrions alors calculer la température (T_{i2}) de la couche extérieure dans le cas 2.
4. Puis nous pouvons calculer du flux de chaleur relatif aux échantillons avec Vitrulan®, soit Q_2 (cas 2).

3. CALCUL DES FLUX DE CHALEUR

3.1. Expression des flux de chaleur pour le cas 1 (sans Vitrulan,)

Etape 1 : Calcul de T_{i1}

Connaissant les résultats expérimentaux des flux de chaleur (Q_{Tot}), sans Vitrulan® pour les deux gammes de températures, et étant donné que Q_c/i est égal à Q_{tot} , nous pouvons extraire T_{i1} .

$$\text{alors } T_i = \left(T_c^4 - \frac{Q_c/i}{s * E1} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{si} \quad Q_c/i = Q_{Tot} = E1 * s * (T_c^4 - T_i^4)$$
$$\text{avec} \quad E1 = \frac{e_i * e(T_c)}{e(T_c) + (1 - e(T_c)) * e_i}$$
$$s = 5.68 * 10^{-8} \text{ Watt} / \text{m}^2 \text{K}$$

Remarques :

- e_i est l'émissivité de la couche extérieure (e_{i1} : estimée selon l'expérience pour le cas 1),
- E est le facteur de forme dépendant de l'émissivité des surfaces en jeu ($E1$ dans le cas1).

Pour le cas du tank à vide [T_c (300 K)], l'émissivité de l'acier est telle que : $e(300 \text{ K}) = 0.25$.

Pour le cas de la tôle de l'écran thermique [T_c (77 K)], l'émissivité de l'aluminium brut est : $e(77 \text{ K}) = 0.12$.

Etape 2 : Calcul de la conductivité thermique du matelas de superisolation : cond

Grâce à la formule de Fourier, nous pouvons extraire la quantité [$cond = K * A / l$] qui est le paramètre régissant la conduction entre les 10 couches de superisolation.

$$\underline{Q_i / f = cond * (T_{i1} - T_f)}$$

3.2. Expression des flux de chaleur pour le cas 2 (avec Vitrulan,)

Les caractéristiques géométriques du filet de Vitrulan® permettent de considérer que la surface de la couche extérieure est recouverte à 30% de fibre de verre.

L'émissivité des 30% du Vitrulan® sur la couche extérieure a été estimée comme suit (cf. Emissivité du corps noir) :

$$e_i(77 \text{ K}) = 0.8 \quad \text{et} \quad e_i(300 \text{ K}) = 1$$

L'émissivité totale (e_{i2}) de la couche extérieure fera donc intervenir celle du corps noir et celle du Mylar® aluminisé.

Etape 3 : Détermination de la température de la couche extérieure couverte à 30% de Vitrulan® : Ti2

La température de la couche extérieure en Vitrulan® (Ti2) est déterminée après itération en connaissant la valeur de la conductivité thermique (cond) et des facteurs de forme E1 et E2.

Etape 4 : Calcul du flux de chaleur dans le cas d'un matelas couvert d'un filet de Vitrulan®

Finalement le flux de chaleur Q2 (ou Qi / f) est calculé à partir de la température Ti2 et de la conductivité thermique (cond).

De manière à relativiser ces résultats, l'apport de chaleur par l'utilisation du filet de Vitrulan® est mis sous forme de pourcentage, soit Q% ce pourcentage.

3.3 Approche numérique

On considère dans chacun des cas que le vide d'isolation est de 5E-5 Pascal.

Par l'intermédiaire d'un programme avec le logiciel Mathcad, il est possible de faire évoluer simplement les différents paramètres de calcul. Ainsi, il a été noté qu'une modification des caractéristiques des émissivités estimées, ei, influence peu les résultats. Ce modèle théorique est donc à même de répondre à une première quantification concernant l'influence du Vitrulan® sur les matelas de superisolation.

Les calculs ont été réalisés avec les estimations présentées dans les paragraphes précédents. La valeur des émissivités ei, de la couche extérieure i, est estimée d'après l'expérience. La remarque précédente tend à relativiser cette estimation. Ainsi le facteur de forme E peut être exprimé dans chacun des cas 1 et cas 2, d'après les estimations des émissivités suivantes :

	Cas 1 (sans Vitrulan®)		Cas 2 (avec Vitrulan®)	
Tc [K]	300	77	300	77
Ti [K]	297.2	55.9	298.5	60.93
ei	0.08	0.042	1 (pour 30%)	0.8 (pour 30%)
E	0.065	0.032	0.25	0.115

Tableau 2 : Estimations des émissivités

Les résultats sont résumés dans le tableau 3 ci-dessous.

- Pour le cas 1, ces valeurs sont calculées (suite aux mesures de Q_{Tot} et aux approximations des émissivités ϵ_i).
- Pour le cas 2, ces valeurs sont déduites des calculs du cas 1.

	Cas 1 (sans Vitrulan®)		Cas 2 (avec Vitrulan®)	
	Tc= 300K et Tf=77K	Tc=77K et Tf=4.2K	Tc= 300K et Tf=77K	Tc=77K et Tf=4.2K
Qtot [W/m ²]	1.09 [4]	0.046 [2]	1.096	0.051
Ti [K]	297.2	55.9	298.5	60.93
Cond [W/ m ² K]	4.95E-3	0.89 E -3	4.95E-3	0.89 E -3
Qc/I [W/m ²]	1.09	0.046	1.096	0.051
Qi/f [W/m ²]	1.09	0.046	1.096	0.051
Q %			1 %	11 %

Tableau 3 : Résultats mathématiques

4. DISCUSSION

Les résultats numériques montrent que l'apport de chaleur par l'utilisation du Vitrulan® en tant que couche extérieure de protection sur les 3 matelas de 10 couches placés entre le tank à vide (300 K) et l'écran thermique (77 K), est négligeable (inférieur à 1%).

Par contre, pour la gamme de températures inférieures, à savoir entre l'écran thermique (77 K) et l'écran radiatif (4.2 K), cette utilisation provoque un flux de chaleur supplémentaire de 11%.

Il semble donc possible de diminuer l'entrée de chaleur sur l'écran radiatif par un choix plus judicieux de la couche extérieure. Les solutions à ce problème peuvent être l'utilisation de Vitrulan® aluminisé ou bien l'utilisation de Mylar® (25µm) aluminisé pour remplacer le filet de Vitrulan®.

D'autres solutions seront à développer si cette influence est jugée contraignante.

Afin de valider ces calculs, il a été décidé d'un test au laboratoire de cryogénie "Cryolab". Ce test envisage de caractériser l'influence du Vitrulan® sur des échantillons de superisolation [5].

5. CARACTERISATION DES TESTS EXPERIMENTAUX

Il est nécessaire de valider ces résultats grâce à une campagne de tests. Le but sera de mesurer et de comparer la qualité de la superisolation, avec et sans Vitrulan®. Un test de la solution proposée avec un filet de Vitrulan® aluminisé est aussi au programme [5], de manière à quantifier une des solutions.

Les tests se repartiront en 3 phases :

Phase 1 : Mesure du flux de chaleur à travers un matelas de 10 couches de superisolation type C.

Phase 2 : Mesure du flux de chaleur à travers un matelas de 10 couches de superisolation type C, entourées d'un filet de Vitrulan®.

Phase 3 : Mesure du flux de chaleur à travers un matelas de 10 couches de superisolation type C, entourées d'un filet de Vitrulan® aluminisé.

Ces trois phases permettront des mesures dans les deux gammes de températures [300 - 77 K] et [77 - 4.2 K].

Bien que les conditions LHC impliquent actuellement 30 couches de superisolation entre 300 K et 77K, il a été décidé de faire le test expérimental avec un matelas de 10 couches seulement, afin de réaliser des mesures plus significatives. Les mesures se dérouleront à partir du mois de janvier 1998, dans un cryostat horizontal du "Cryolab".

6. CONCLUSION

Des tests expérimentaux sont nécessaires afin de valider l'influence du filet de Vitrulan®. Il semblerait que l'utilisation du Vitrulan® implique 11% de pertes thermiques supplémentaires au niveau de l'écran radiatif thermalisé [5 - 20 K]. En ce qui concerne la superisolation installée sur l'écran thermique, l'influence du Vitrulan® semble être négligeable (d'après les calculs).

Le manque de données concernant le comportement de la superisolation dans la gamme de températures [300 - 77 K] implique aussi des mesures de flux de chaleur de la superisolation type C.

En résolvant ce problème, les coûts de réfrigération du LHC pourraient être éventuellement réduits. Les coûts supplémentaires d'une modification de la couche extérieure des matelas de superisolation doivent être estimés. De même l'évaluation des améliorations doit être confirmée.

Suite aux conclusions de ce prochain test au "Cryolab", des solutions seront proposées de manière à éventuellement diminuer le coût de réfrigération sur écran actif à 5 K et à mieux protéger la masse froide des entrées de chaleur. Finalement, un juste compromis entre l'influence financière et les facilités de fabrication et de manipulation des matelas devra être déterminé aux vues des résultats des tests.

Références

- [1] Fiche technique du Vitrulan®
- [2] “Investigation and qualification of the thermal insulation systems between 80 K and 4.2 K”, Ph Lebrun, L. Mazonne, V. Sergo, B. Vullierme; Cryogenics 32, ICMC Supplément, pp44-47 (1992)
- [3] “Element de Cryogenie”, R.R Conte, Masson (1970)
- [4] “Thermal performance measurements for a 10 meters LHC dipole prototype” LHC Project Note 112
- [5] Programme des tests au “Cryolab” – compte rendu de la réunion du 15 Octobre 1997

Distribution :

Benda V	LHC-ACR
Brunet J.C.	LHC-CRI
Burla P.	LHC-CRI
Calvino Palacios G.	LHC-CRI
Castoldi M.	LHC-CRI
Darve Ch.	LHC-CRI
Dauvergne J.P.	LHC-ECR
Jacquemod A.	LHC-CRI
Kowalczyk P.	LHC-CRI
Lebrun Ph.	LHC-ACR
Moiroux R.	LHC-CRI
Parma V.	LHC-CRI
Perriraz J.J.	LHC-CRI
Poncet A.	LHC-CRI
Ract-Gras Y.	LHC-CRI
Rieubland J.M.	LHC-ECR
Rohmig P.	LHC-CRI
Rousselin A.	LHC-CRI
Saban R.	LHC-CRI
Sacré Ph.	LHC-CRI
Schneider G	LHC-VAC
Skoczen B.	LHC-CRI
Struik M.	LHC-CRI
Vandoni G.	LHC-ECR
Vincent D.	CNRS/IN2P3
Vuitton Ch.	LHC-CRI
Wikberg T.	EST/LEA
Williams L.R.	LHC-CRI