



## LHC Project Note 37

1996-03-12

(ajacquem@mt.msm.cern.ch)

# Essais de fatigue de soufflets fonctionnant à basse température. Développement et utilisation d'une machine de test.

J.C. Brunet, A. Jacquemod / LHC-CRI et C. Reymermier / EST-ESM

Mots clés : soufflets, basse température, test de fatigue

---

## Résumé

Les soufflets utilisés pour les jonctions entre aimants du LHC sont soumis à des contraintes assez sévères (*contraction et élongation mécaniques, maintien de l'ultravide et de la pression, isolation des bus bars, basse température*). Ils doivent donc être dimensionnés en conséquence.

La machine développée pour le test de fatigue permet de dégager les paramètres influant sur le comportement d'un soufflet en assurant que les conditions de test sont proches des contraintes réelles de travail.

L'automatisation d'une telle machine a permis d'acquérir une pleine confiance dans les résultats obtenus.

---

## 1. Introduction

La construction de l'accélérateur LHC nécessite divers composants permettant d'assurer les jonctions entre les aimants supraconducteurs. Ces éléments doivent remplir plusieurs fonctions :

- effectuer le transport des fluides cryogéniques d'alimentation en froid des câbles supraconducteurs (*Hélium liquide à 1.8 K*),
- assurer la continuité de l'ultravide dans les tubes permettant la circulation du faisceau de protons,
- protéger et isoler les lignes électriques (*bus bars*) d'alimentation des aimants.

Ces éléments, en terme de contraintes, doivent :

- absorber les contractions thermiques dues à la mise en froid du système,
- être capables de supporter les montées en pression créées par les quenches des aimants.

Les contraintes liées à ces diverses conditions de travail ont amené à utiliser des soufflets permettant d'assurer tout ou partie de ces fonctions. Il existe donc plusieurs types de soufflets dans chaque jonction liés chacun à une ou plusieurs fonctions.

Le développement et la mise au point de ces soufflets nécessitent bien sûr de nombreux calculs et de nombreuses réflexions sur leur utilisation particulière. Le simple calcul ne suffit pas à certifier de manière incontournable qu'un soufflet pourra assumer pleinement ses fonctions sans défaillance ; il devient donc nécessaire de tester chaque type de soufflet dans des conditions similaires à celles qu'il devra supporter lors de son utilisation en situation réelle.

Le test de fatigue à basse température en se rapprochant des conditions réelles de fonctionnement permet de contrôler plusieurs paramètres à la fois et de confirmer l'augmentation de résistance mécanique ainsi que l'influence sur la durée de vie.

Deux types de tests sont donc réalisés :

- un test dit mécanique imprimant au soufflet un cycle d'extension-compression le long de son axe et visant à simuler les mouvements dus au refroidissement ;
- un test dit de pression faisant subir au soufflet un cycle de montée-descente en pression interne ou externe, afin de simuler les élévations de pression dues aux quenches.

Les conditions d'essai, notamment les mouvements mécaniques à basse température et haute pression, ont amené au développement d'une machine de test spécifique permettant d'assurer toutes ces fonctions.

## 2. Conception mécanique

La machine est conçue de manière à pouvoir être plongée dans un cryostat. Sa construction est donc réalisée en acier inoxydable (*voir dessin 06LHCQAFAA0001*).

Elle est constituée de trois volumes isolés en pression les uns des autres et accessibles depuis l'extérieur du cryostat :

- Volume A : c'est le volume interne des soufflets à l'intérieur duquel on peut soit réaliser le vide, soit injecter du gaz sous pression. Il constitue le cœur de la machine.
- Volume B : il est constitué par une enceinte entourant le volume A tout en étant indépendant de celui-ci. Il permet de faire un vide primaire d'isolation, d'injecter du gaz sous pression ou de l'hélium liquide.
- Volume C : c'est le volume interne du cryostat qui sert au maintien en basse température de tout le système. Il peut être rempli d'azote ou d'hélium liquide.

Le générateur de mouvement ne pouvant pas fonctionner dans l'hélium liquide, on a donc placé un vérin pneumatique à l'extérieur du cryostat qui, par l'intermédiaire d'une canne, imprime un mouvement de va-et-vient à course réglable. Deux soufflets sont montés en tandem sur la canne, le point central est fixé à l'intérieur du volume B qui comporte également à ses extrémités les paliers de glissement assurant l'alignement du mouvement. Un soufflet est donc comprimé en même temps que son homologue est étendu et inversement. Le montage en tandem permet un travail sans variation de volume donc à pression constante. Un offset latéral (*décalage de l'axe*) peut être appliqué aux soufflets.

Les tests de pression sont réalisés par injection de gaz dans les volumes A ou B par l'intermédiaire d'une vanne trois voies placée à l'extérieur du cryostat.

### **3. Instrumentation**

#### **3.1. Instrumentation générale :**

La machine est reliée à une armoire de commande dans laquelle sont placés tous les instruments nécessaires à son fonctionnement.

Des sondes de température (*carbone et platine*) permettent de contrôler la température dans les trois volumes du cryostat à des niveaux différents.

Une jauge de niveau d'hélium permet de contrôler les remplissages.

Des manomètres sont reliés aux volumes A et B afin d'assurer les conditions de sécurité requises avant le remplissage en hélium.

#### **3.2. Test mécanique :**

Le vérin assurant le mouvement est équipé de capteurs-limitateurs de course permettant de régler la course de celui-ci et donc les valeurs de compression-élongation soumises aux soufflets.

Un détecteur de fuite est relié au volume A lors du test afin de déceler la rupture d'un des soufflets.

#### **3.3. Test de pression :**

Deux capteurs de pression piezo-électriques sont reliés respectivement aux volumes A et B afin de contrôler la pression y régnant.

#### **3.4. Automatisation :**

Prévue dans un premier temps pour une utilisation manuelle, l'utilisation de cette machine a permis de se rendre compte du temps requis pour chaque test, des imprécisions dues à une lecture manuelle et des risques liés à l'utilisation de haute pression et cryogénie. L'armoire de commande a donc été connectée à un PC par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition multifonction permettant une gestion semi-automatique des tests. Le pilotage de cette carte est réalisé à l'aide de LabView.

Cette carte permet l'acquisition de toutes les valeurs de pression, température, niveau d'hélium et vide. Des valeurs de consignes ont donc été établies pour chaque paramètre interdisant une utilisation erronée du système. Les valeurs utilisées et les résultats peuvent également être conservés dans un fichier informatique réutilisable à tout moment.

Le pilotage de la vanne de mise sous pression, également réalisé par la carte, permet le fonctionnement de la machine seule sans opérateur.

Il est prévu à l'avenir d'équiper le système d'acquisition d'une carte GPIB pouvant enregistrer directement les valeurs fournies par le multimètre de lecture des températures. Ce système éliminerait les erreurs dues à la lecture directe sur les sondes carbone et platine et augmenterait, de manière sensible, la résolution de la mesure.

## 4. Déroulement type d'un test

Un protocole d'essai type est annexé à ce rapport (*annexe 1*) et concerne l'utilisation de la machine avant son automatisation.

### 4.1. Test mécanique :

Après installation de la canne, équipée de ses deux soufflets sur la machine, et fermeture du volume B, la machine est mise en place dans le cryostat. Un vide primaire (*dégazage*) est réalisé dans les volumes B et C. Le volume A est raccordé au détecteur de fuites, puis pompé en permanence.

Durant le remplissage en hélium liquide du volume C, le volume B est alimenté en hélium gaz qui va se refroidir jusqu'à 4.2 K. Il sera donc, lui aussi, rempli d'hélium liquide.

Dès stabilisation du niveau dans les deux volumes B et C, le vérin démarre le mouvement de cyclage. Celui-ci est automatiquement stoppé dès que la pression du volume A augmente (*fuite ou rupture de soufflet*), ou dès qu'un des paramètres contrôlés (*température, niveau d'hélium*) dérive de sa valeur de consigne. L'écran du PC affiche alors la cause de l'arrêt. Un arrêt manuel du test est également possible depuis le PC.

Après un test, un protocole est automatiquement affiché à l'écran puis enregistré dans un fichier. Il peut également être imprimé (*voir annexe 2*).

### 4.2. Test de pression :

Le test de pression est toujours réalisé après un test mécanique pour éviter un refroidissement supplémentaire. Il est réalisé par un gonflage à l'azote et une température de 100 K pour des raisons techniques et économiques (*voir §5*).

Les volumes C et B sont réchauffés progressivement jusqu'à obtention d'une température de 100 K. La vanne trois voies envoie alors une pression d'azote de 20 bar dans le volume A, puis la stabilise pendant quelques minutes. Ensuite, la vanne bascule et la pression retombe à 1 bar dans le volume A ; l'azote contenue précédemment dans ce volume est évacuée à l'atmosphère, puis le cycle recommence.

La commande de la machine stoppe le cyclage si la pression dans le volume B augmente (*rupture de soufflet*) ou si la bouteille d'azote alimentant le système ne contient plus assez de gaz pour fournir une pression de 20 bar ; dans ce cas, un message à l'écran demande à l'opérateur de changer la bouteille. Le cyclage est également stoppé si la température passe en dessous de sa valeur de consigne. Un arrêt manuel est également possible durant tout le déroulement du test.

Comme pour le test mécanique, un protocole est affiché après chaque test (*voir annexe 3*).

### 4.3. Protocole général :

Le programme de commande-acquisition permet également de collecter toutes les données obtenues pour un type de soufflet et de les afficher sur un protocole général (voir annexe 4).

## 5. Autres tests et limites d'utilisation

D'autres tests peuvent être réalisés avec cette machine et ne dépendent que de ce que l'on cherche à mesurer. Toutefois, il existe certaines limitations incontournables comme, par exemple, l'impossibilité de renvoyer dans le réseau de distribution-récupération d'hélium du laboratoire de cryogénie des pressions supérieures à 1 bar ; on ne peut se permettre de laisser l'hélium s'échapper à l'atmosphère pour des raisons économiques.

Les limites mécaniques sont les suivantes:

- Course max. du v érin :  $\pm 25$  mm
- Offset max. : 4.5 mm
- Pression max. : actuellement 22 bar (*lié au test*)
- Température max. : T ambiante ( *un échauffement supplémentaire devient dangereux pour les paliers de glissement*).

## 6. Résultats obtenus

Plusieurs types de soufflets ont été qualifiés afin de vérifier les données du constructeur.

Type de soufflet	Fabricant	Cycles mécaniques	Cycles Pression	Résultat
Ligne E	Bird	7000	1335 int, 141 ext	Conforme
Ligne H	Bird	1000	500 int	Conforme
Ligne G	Bird	1000	500 int	Conforme
Ligne C	Bird	1000	500 int	Conforme
Ligne V	Bird	1000	500 int	Conforme
Ligne V	Bird	7986 à 100 K Pinterne 8 bar	-	Rupture
Ligne V	Bird	583 à 300 K Pinterne 8 bar	-	Rupture mais test invalide
Emboîtable	Sealol	1600	2000 int	Rupture

Tableau 1 : Résultats obtenus pour les qualifications de soufflets

Les changements des paramètres du projet LHC (*lignes cryogéniques séparées*) conduisent à redéfinir les interconnexions et, en particulier, les soufflets.

Après un redimensionnement et un calcul d'optimisation théorique, une nouvelle campagne de qualification sur les prototypes de soufflets (*lignes E, H, G et V*) sera engagée en vue de la construction du String 2.

Ensuite, une nouvelle campagne démarrera, lors de la production en série des soufflets et aimants du LHC, pour la qualification finale des produits.

## **Remerciements**

Il convient de remercier L. Nikitina (*collaboration du laboratoire de Protvino- CEI*) pour l'étude de base de ce dispositif, F. Dolizy (*SGS Qualitest*) pour le démarrage des tests avant automatisation et le personnel technique du laboratoire de cryogénie pour son aide et ses conseils.

## **Références**

- [1] “LHC Design Report”, CERN/AC/95-05
  
- [2] J.C. Brunet “Gestion de l’espace aux extrémités des aimants dipôles et dans l’interconnexion”, Technical note MT-ESH/95-06
  
- [3] Minutes No. 28 of the meeting of the Co-ordination Group for LHC Dipole Design on 16.11.95
  
- [4] J.C. Brunet & M. Genet “Comments on the production of the interconnections of the SM 18 test half-cell” Technical note MT-ESH/94-19, November 1994
  
- [5] J.C. Brunet “Technical specification for the supply of a control system for welds”, CERN/MT-ESH/94-10, March 1995
  
- [6] B. Skoczen & T. Kurtyka “Strength analysis of the dished heads for the LHC dipole magnets”, Technical note EST-ESI/96-04.
  
- [7] R. Perin, private communication

## **Protocole d'essai de fatigue de soufflets LHC à basse température**

### **1. Test de fatigue mécanique sans pression**

- 1.1. Contrôle de l'étanchéité à température ambiante après un montage sans remplir le volume A d'hélium gaz.
- 1.2. Démarrage de la manipulation toutes vannes fermées.  
Mise en route de la pompe primaire.  
Ouverture de V16, V22, V23.  
Vider les volumes A, B, C.  
Ouverture de V12, V11, V9, V10.  
Fermeture de V10, V9, V11, V12.  
Arrêt de la pompe primaire.
- 1.3. Remplir le volume C d'hélium liquide.
- 1.4. Remplir le volume B d'hélium gazeux ( $p = 0,7 \text{ bar abs.}$ )  
Ouverture de V18.  
Vérification de la pression d'hélium gaz dans la bouteille  
Réglage du réducteur de la bouteille d'hélium gaz à 0,4 bar.  
Ouverture de V17.  
Contrôle de la pression sur le manuvacuomètre M3.
- 1.5. Descente en température à 4,2 K.
- 1.6. Réaliser 100 cycles mécaniques.
- 1.7. Contrôle de l'étanchéité du volume A.  
DéTECTEUR branché sur le volume A.  
Mise en route du groupe de pompage et détection de fuite.  
Ouverture de V13.  
Contrôle de l'étanchéité.  
Fermeture de V13.
- 1.8. Réchauffage de l'hélium liquide du volume C.  
Réchauffer les volumes A, B, et C.  
Contrôle de la pression.
- 1.9. Contrôle de l'étanchéité du volume A (*voir 1.7.*).
- 1.10. Contrôle de la pression dans le volume B.  
Si la pression est supérieure à 1 bar abs., ouvrir V15 et V21.  
Fermer V15 et V21.

## 2. Test en pression intérieure

### 2.1. Remplissage du volume A d'azote gaz ( $p = 20 \text{ bar}$ )

Ouverture de V20.

Vérifier la pression du gaz dans la bouteille.

Ouverture de V19, V14.

Réglage du manodétendeur de la bouteille d'azote à 20 bar.

Monter progressivement à 20 bar.

Contrôle de la pression sur le manomètre M2.

Fermeture de V19.

Réglage du manodétendeur de la bouteille d'azote à 2 bar.

Fermeture de V20.

Descente de la pression :

- Ouverture de V21.

- Fermeture de V21.

- Fermeture de V14.

Mise en route de la pompe primaire.

Vider le volume A :

- Ouverture de V12, V11.

- Fermeture de V12, V11.

Arrêt de la pompe primaire.

Contrôle de l'étanchéité du volume A (voir 1.7.) et remplir le volume B d'hélium gaz ( $p = 0,1 \text{ bar}$ ).

## 3. Test en pression extérieure

### 3.1. Remplissage du volume B d'azote gaz.

Ouverture de V20.

Vérification de la pression de gaz dans la bouteille d'azote.

Réglage du manodétendeur de la bouteille d'azote à 20 bar.

Fermeture de V16.

Ouverture de V24.

Ouverture de V19, V15.

Monter progressivement à 20 bar.

Contrôle de la pression sur le manomètre M4.

Fermeture de V19.

Réglage du manodétendeur de la bouteille d'azote à 20 bar.

Fermeture de V20.

Baisse de pression :

- Ouverture de V21.

- Fermeture de V21.

Mise en route de la pompe primaire.

Front Panel

<b>PROTOCOLE DE TEST DE FATIGUE DE SOUFFLET LHC</b>	
<b>CYCLAGE MECANIQUE</b>	
<b>CERN MT/ESH</b>	<b>Nom du fichier</b> 12695M
<b>RUPTURE:</b> NON	
<b>Nombre de cycles realises auparavant</b> 500	
<b>Nombre de cycles pour ce test:</b> 500	
<b>Nombre de cycles total:</b> 1000	
<b>Commentaires:</b> Ce document est un exemple	
<b>Test execute par</b> A. Jacquemod	<b>Signature:</b>
<b>DATE:</b> 12/06/95	
<b>DONNES DU TEST:</b>	
<b>COURSE:</b>	
Superieur 25.00 [mm]	
Inferieur 25.00 [mm]	
<b>OFFSET</b> 4.50 [mm]	
<b>Temperature</b> 4.20 [K]	
<b>Nombre de cycles programmes</b> 500	
<b>DONNES SOUFFLETS TESTES:</b>	
<b>TYPE:</b> V	
<b>No DE DESSIN:</b> 06LHCQAVAA...	
<b>FABRICANT:</b> BIRD	

Front Panel

<b>PROTOCOLE DE TEST DE FATIGUE DE SOUFFLET LHC</b>	
<b>CERN MT/ESH</b>	<b>CYCLAGE EN PRESSION INTERIEURE</b>
Type de Soufflet	<b>V</b>
Nombre de cycles realises auparavant:	<b>250</b>
Nombre de cycles realises pour ce test	<b>250</b>
Nombre de cycles total:	<b>500</b>
Nombre de cycles programmes	<b>250</b>
Nom du fichier	<b>12695P</b>
RUPTURE:	<b>NON</b>
No DESSIN	<b>06LHCQAFAA....</b>
Fabricant	<b>BIRD</b>
Pression de test	<b>20.0 [bar]</b>
Temperature:	<b>100.0 [K]</b>
DATE:	<b>12/06/95</b>
Test execute par	<b>A. Jacquemod</b>
Signature	

## TEST DE FATIGUE DE SOUFFLETS LHC RESULTATS DU TEST N° 5

Nom des fichiers concernés: **12695M1, 2, 3, 4** et **12695P1 et 2**

Données sur soufflets :	
Type de soufflets :	V
Fabricant :	Bird
N° du dessin :	06LHCQAFAA.....

Test de fatigue mécanique		
Course supérieure :	25	[mm]
Course inférieure :	25	[mm]
Offset :	4.5	[mm]
Température :	4.2	[K]

Résultats		
Nombre de cycles programmés :	1000	
Nombre de cycles réalisés :	1000	

Test de pression intérieure		
Pression de test :	20	[Bar]
Température :	100	[K]

Résultats		
Nombre de cycles programmés :	500	
Nombre de cycles réalisés :	500	

Rupture de soufflet par cyclage mécanique : NON

Rupture de soufflet par cyclage pression : NON

Commentaires : Document exemple
------------------------------------

Opérateur : A. Jacquemod

Date : 12/06/95