



*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*

Les câbles supraconducteurs

Luc Oberli

10 avril 2008

An aerial photograph of a valley with a large lake and snow-capped mountains in the background. A red circular line is drawn over the landscape, representing the path of the LHC tunnel. The text is overlaid on the lower part of the image.

7500 km de câble supraconducteur

**utilisés pour la fabrication des aimants
principaux dipôlaire et quadripôlaire du
LHC et des aimants quadripôlaire pour
les zones d'insertion.**



Aimants et câbles supraconducteurs du LHC en quelques chiffres



1232 dipôles à deux ouvertures : 4 câbles 01 de 460 m
4 câbles 02 de 750 m

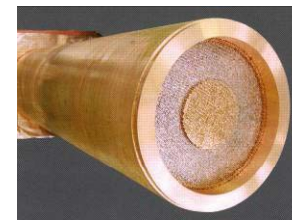
392 quadripôles à deux ouvertures : 2 câbles 03 de 660 m

104 quadripôles MQM et 31 quadripôles MQY pour les sections droites courtes dans les zones d'insertion utilisant 3 différents types de câbles (04, 05, 06, 07)

~ 13 000 longueurs unitaires de câble

240 000 km de brins

~ 6050 billettes





Plan de l'exposé



1. Conception des câbles supraconducteurs pour le LHC
2. Attribution, organisation des contrats et système d'assurance qualité
3. Résultats et performances
4. Bilan de la production des câbles LHC



Conception des câbles supraconducteurs



- **Marge en champ magnétique** $> 10\%$ au dessus de la valeur du champ nominal ce qui détermine le courant critique et finalement la section du câble selon la densité de courant critique attendue.
- **Marge en température** suffisante pour l'opération des aimants du LHC compte tenu des pertes de faisceaux.
- **Diamètre des filaments de 6 à 7 μm** pour réduire l'aimantation et limiter les distorsions du champ magnétique à l'injection.
- **Résistance de contact** inter-brins dans le câble pour limiter les distorsions du champ magnétique lors de la montée en champ.
- **Facteur de compaction** du câble à optimiser pour réduire la dégradation du courant critique des brins lors du câblage.
- **Densité de courant dans le Cu** après une transition $< 1000 \text{ A/mm}^2$ pour limiter la température du « hot spot » de la bobine.



1. Choix de l'alliage supraconducteur

Au niveau des performances, le Nb₃Sn était favori.

Matériau	Température critique	Champ critique	Densité de courant critique
NbTi	9.2 K	11 T à 4.2 K	1100 A/mm ² à 8 T, 4.2 K
Nb ₃ Sn	18 K	28 T à 4.2 K	700 -1000 A/mm ² à 10 T, 4.2 K

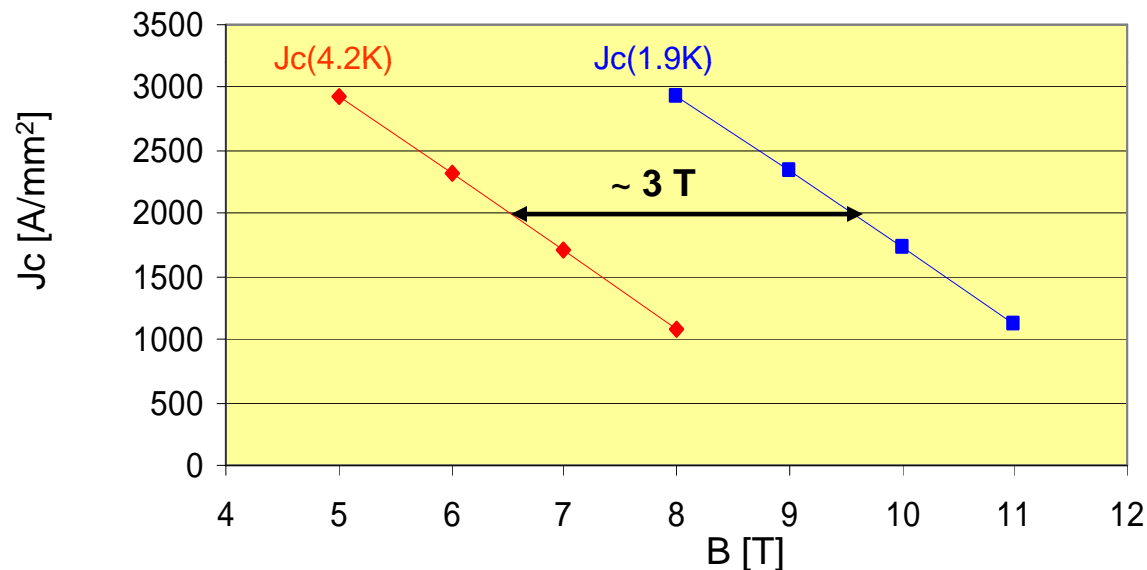
Mais la capacité de production des supraconducteurs en Nb₃Sn était loin d'égaliser celle des supraconducteurs en NbTi pour lesquels il y avait le marché de l'imagerie médicale.

Nb₃Sn battu sur le coût: ~ 6 à 10 fois plus cher que le NbTi.

Choix des supraconducteurs en NbTi refroidis à 1.9 K.

2. La densité de courant critique: le paramètre à optimiser à 1.9 K

- Nécessité d'avoir une densité de courant critique élevée pour atteindre le champ magnétique nominal de 8.33 T dans les dipôles du LHC avec une marge en champ suffisante pendant l'opération et pour minimiser le coût des aimants.



- Augmentation importante de la valeur de J_c en abaissant la température à 1.9 K.
- Déplacement de la droite $J_c(B)$ de ~ 3 T entre 4.2 K et 1.9 K.



Optimisation de la densité de courant critique



Progrès important réalisé par les fabricants de supraconducteurs pendant le programme de R&D des aimants du LHC. Ils ont accumulé une expérience importante sur la fabrication des brins LHC ce qui leur a permis d'être prêt pour répondre aux appels d'offre du CERN.

- Jc optimisée à 1.9 K (optimisation du taux de déformation après le dernier traitement thermique, $\epsilon_f > 4$)
- Jc élevée obtenue pour des brins avec des filaments de 6 à 7 μm .

	Brin 01	Brin 02
Fabricant	Jc(10T, 1.9K) [A/mm ²]	Jc(9T, 1.9K) [A/mm ²]
B	1670	2320
C	1490	2030
D	1660	2260
E	1620	2140

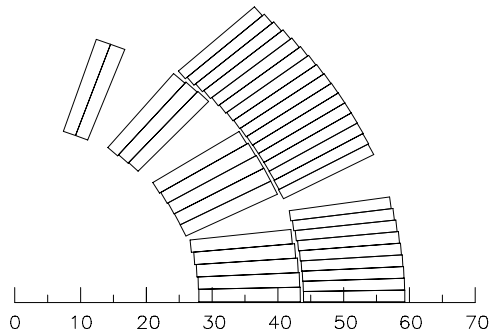
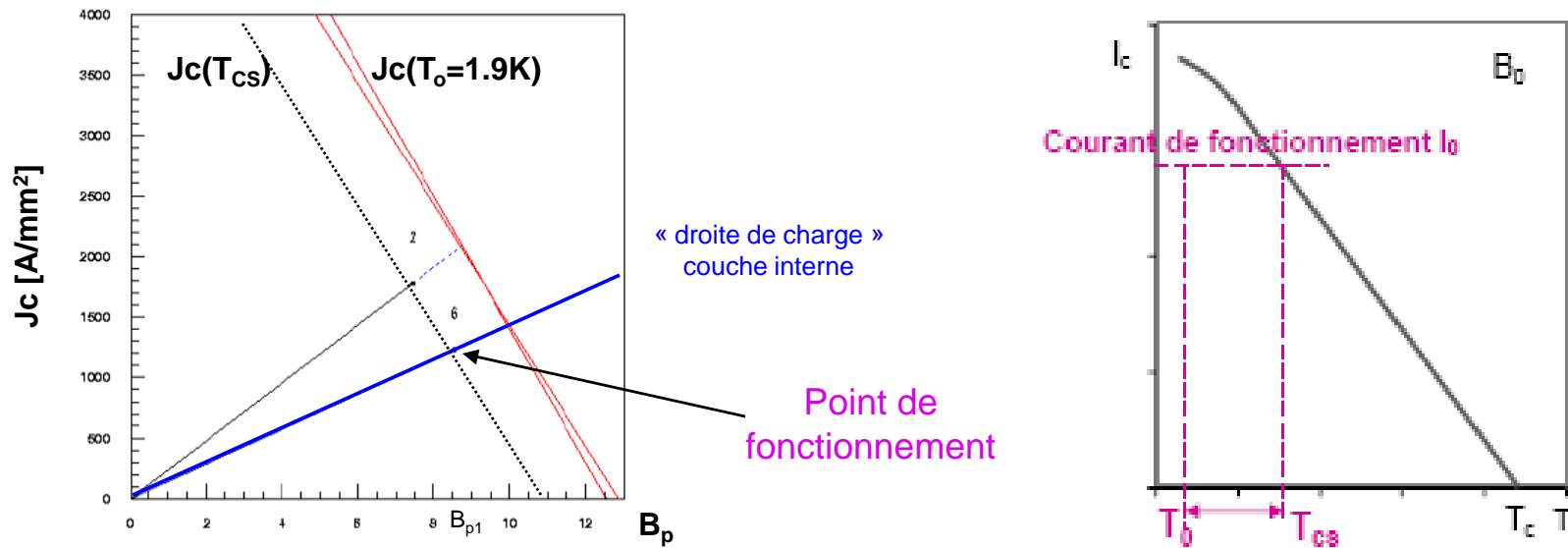
➤ Décision pour la spécification LHC:

Jc(10T, 1.9K) > 1530 A/mm² pour le brin 01

Jc (9T, 1.9K) > 2100 A/mm² pour le brin 02

3. La marge en température

Les valeurs minimum de J_c demandées dans la spécification des câbles LHC permettent d'obtenir une marge en température de 1.5 K.



La valeur de la marge en température permet d'évaluer le niveau de stabilité de l'aimant.

Une grande partie de la marge servira à absorber l'énergie perdue par le faisceau.



L'aimantation et la qualité de champ à l'injection



Dans un aimant supraconducteur, toute variation du champ magnétique induit dans les bobines des courants persistants dans les filaments de NbTi.
Le champ créé par les courants persistants est opposée au champ appliqué.

$$\mu_0 M \propto J_c d$$

Les courants persistants circulant dans les filaments de NbTi donnent des déformations multipolaires du champ magnétique désiré.

Dans un dipôle :

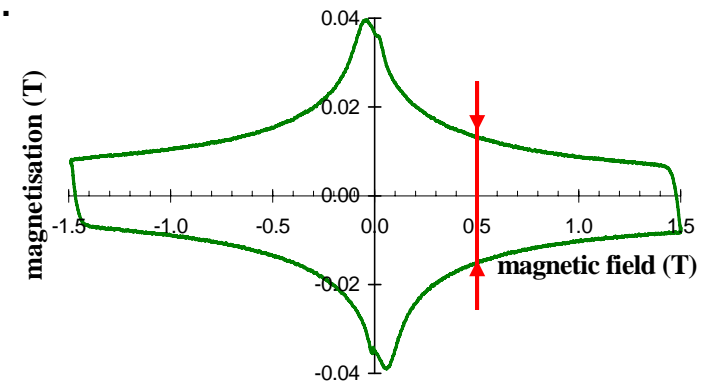
- b_3 erreur de champ la plus importante provenant pour 70% de la couche externe du bobinage.
- b_5 et b_7 provenant de la couche interne.

Pour contrôler l'effet des courants persistants, une mesure de l'aimantation des brins a été demandée dans la spécification LHC.

Largeur de la boucle d'aimantation à 0.5 T:

$2 \mu_0 M < 30 \text{ mT}$ pour le brin interne (01)

$2 \mu_0 M < 23 \text{ mT}$ pour le brin externe (02)



4. Topologie des câbles

Dimensionnement des câbles LHC pour optimiser la quantité d'He à l'intérieur du câble.

Etudes de fils extraits de différents câbles compactés entre 92.5 % et 90 %.

Modélisation des fils extraits.

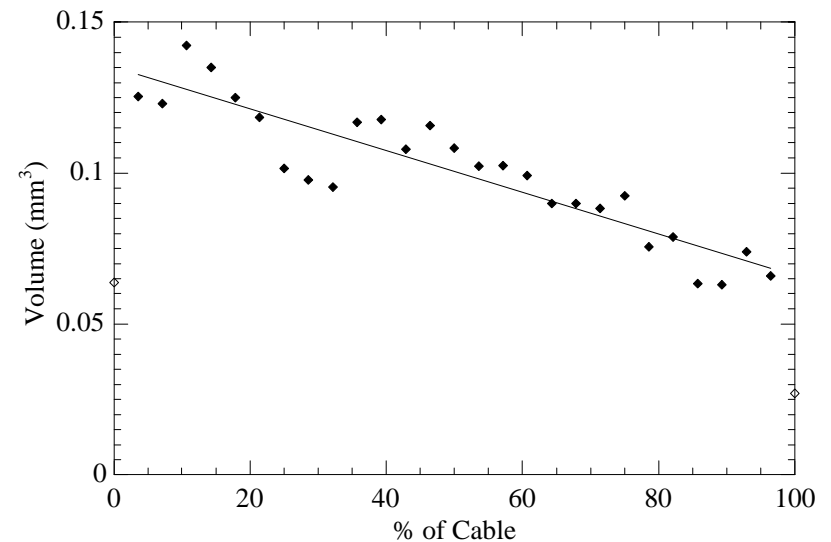
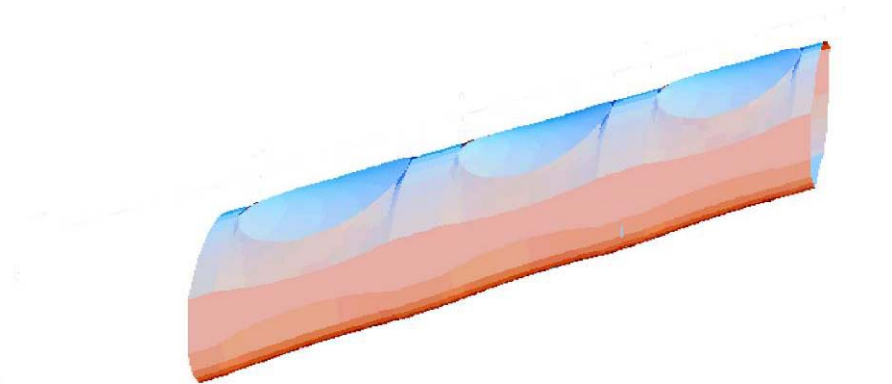
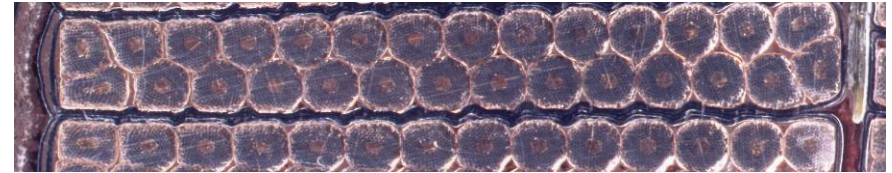
Calcul de la surface d'échange du câble en contact avec l'He et du volume interne d'He.

Choix d'un taux de compaction de 90 %.

Volume interne He / volume brins > 5 %

Surface interne d'échange / surface totale brins > 20 %

-> réserve enthalpique (1.9 K-3.4 K) due à l'He liquide dans le câble $\sim 40 \text{ mJ/cm}^3$

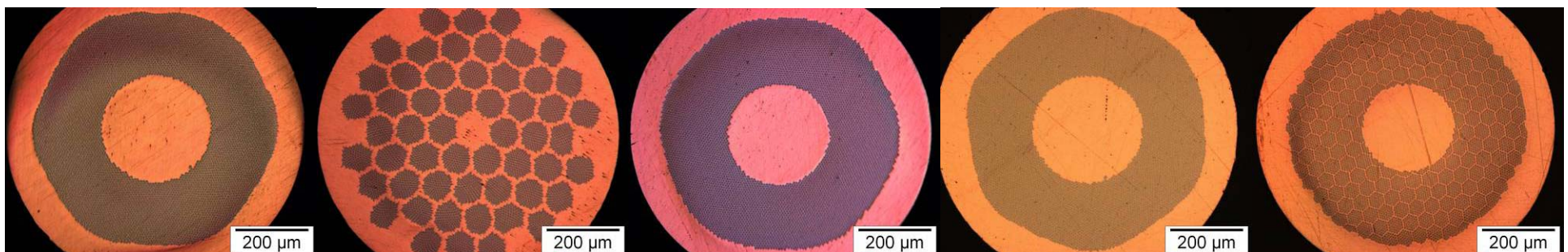
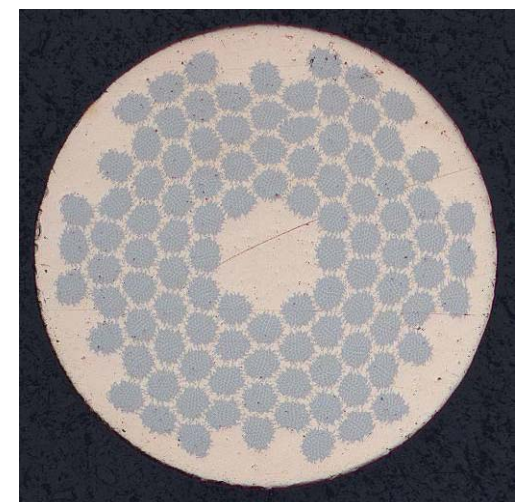
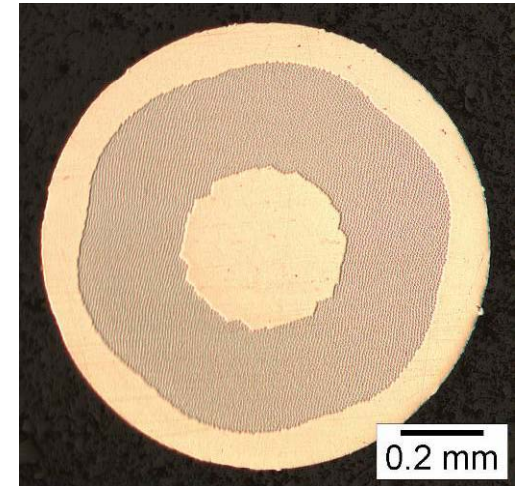




Spécification des brins

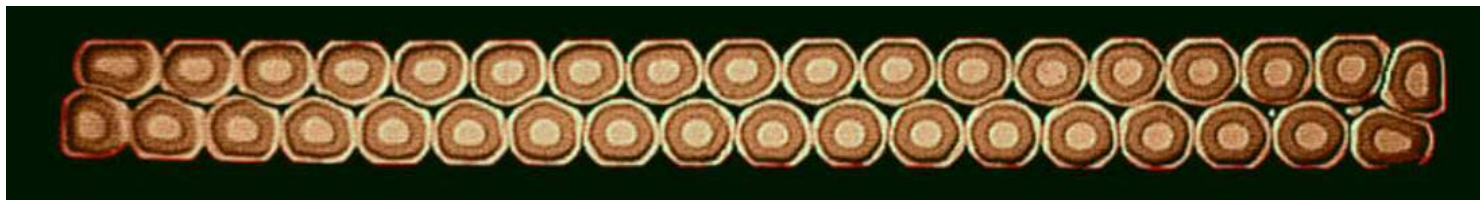


Type de brin	Brin 01	Brin 02
Diamètre étamé D [mm]	1.065	0.825
Cu/Sc	1.6 - 1.7	1.9 - 2.0
Cu/Sc Limites de contrôle	+/- 0.03	+/- 0.03
Diamètre filaments [μm]	7	6
Pas de torsadage [mm]	18 +/- 1.5	15 +/- 1.5
Nombre de filaments	8800	6400
Type d'étamage	SnAg _{5%w}	SnAg _{5%w}
Courant critique I_c [A]	515 @ 1.9 k, 10 T	380 @ 1.9 k, 9 T
J_c [A/mm^2]	1530 @ 1.9 k, 10 T	2100 @ 1.9 k, 9 T
I_c Limites de contrôle [%]	+/- 4	+/- 4
$\mu_0 \Delta M$ (0.5 T, 1.9 K) [mT]	30	23
$\mu_0 \Delta M$ Limites de contrôle [%]	+/- 4.5	+/- 4.5



Spécification des câbles

Câbles	Type 01	Types 02 et 03
Nombre de brins	28	36
Diamètre des brins [mm]	1.065	0.825
Largeur [mm]	15.10 + 0.00/ - 0.02	15.10 + 0.00/ - 0.02
Épaisseur à mi-hauteur (50 MPa) [mm]	1.900 +/- 0.006	1.480 +/- 0.006
Angle de Keystone [deg]	1.25 +/- 0.05	0.90 +/- 0.05
Pas de transposition [mm]	115	100
Courant critique	13750 A @ 1.9K, 10T	12960 A @ 1.9K, 9T
Dégradation [%]	< 5	< 5
Résistance de contact inter-brins [$\mu\Omega$]	> 15	> 40
RRR avant traitement thermique	> 70	> 70





7 fournisseurs pour 1300 tonnes de câble LHC



	Câble 01	Câbles 02/03	Câbles 04/05/06/07
ALSTOM	5 octants 1550 km	3 octants 1854 km	-
EM	-	2 octants 1050 km	-
EAS	3 octants 890 km	-	437 km
OUTOKUMPU	-	1 octant 568 km	-
FURUKAWA	-	1 octant 602 km	-
IGC	-	1 octant 610 km	-
Wah Chang	450 t de NbTi et 26 t de feuilles de Nb		



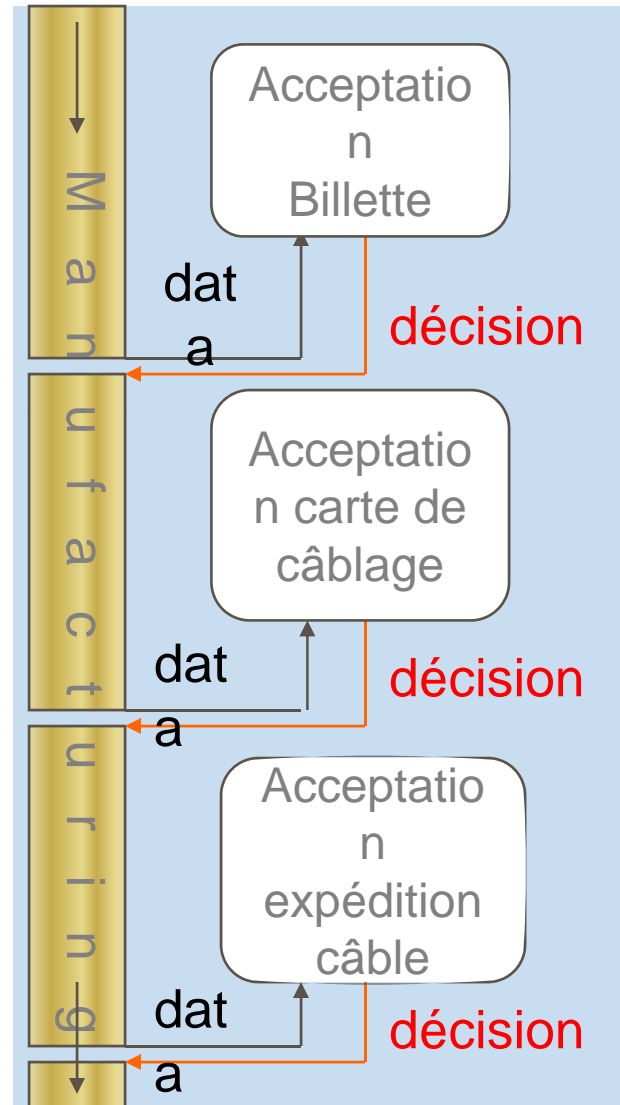
Organisation des contrats



Relation avec les fabricants

- Contrôles de qualité systématiques imposés aux fabricants sur des échantillons de brins et de câbles prélevés de la production.
- Introduction de **points d'arrêts** à différents stades du cycle de fabrication pour s'assurer de la qualité des câbles livrés.
- Envoi au CERN des résultats des mesures de qualification des billettes et des câbles et aussi d'échantillons de brins et de câbles coupés de chaque longueur continue.

Acceptation des billettes et des câbles sur une base documentaire et sur la base de contre-mesures effectuées par le CERN





Organisation pour suivre la production des câbles.



Pour garantir la performance des brins et des câbles, le CERN a effectué des tests **systematiques** d'échantillons de brins et de câbles.

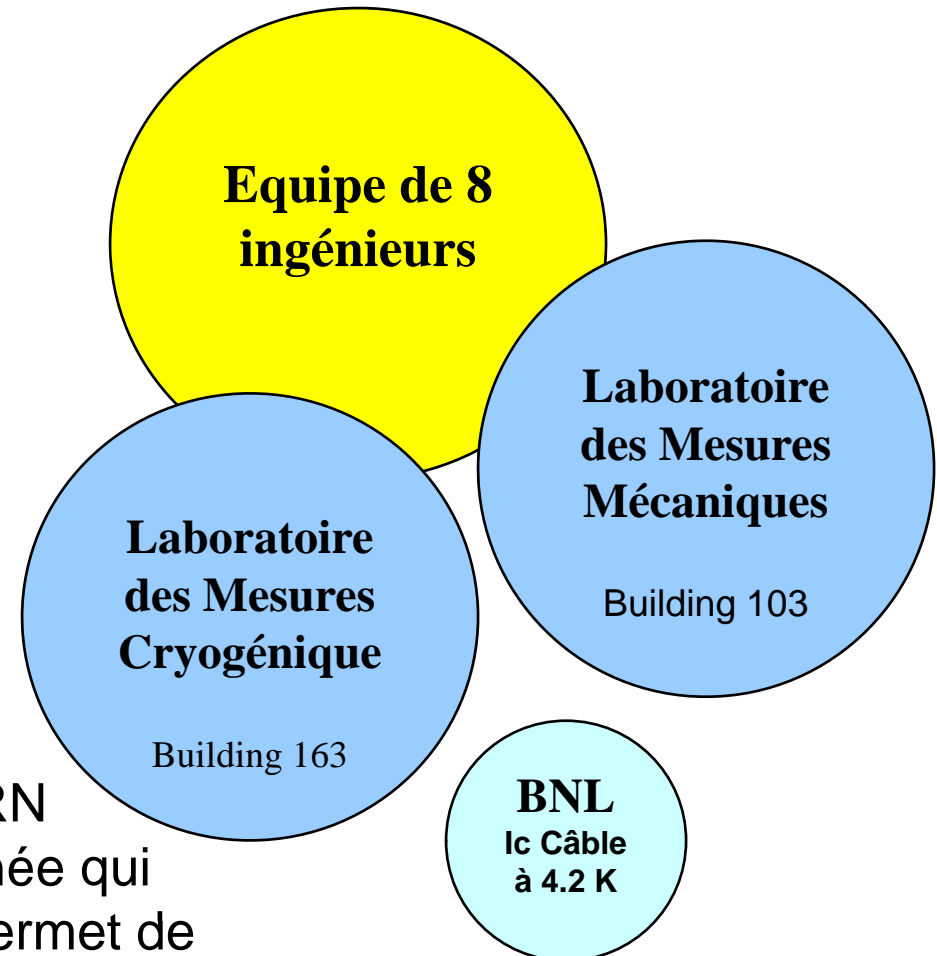
16 CERN staff
20 personnes en appui industriel

+

2 inspecteurs dans les
centres de câblage

L'inspecteur s'assure que les
procédures pour les contrôles
qualités sont appliquées et il
fait un rapport hebdomadaire

Système Assurance Qualité au CERN
organisé autour d'une base de donnée qui
collecte toutes les données et qui permet de
suivre l'avancement des contrats.





Qualification des billettes



Qualification de chaque billette par des mesures de :

- I_c à 4.2K et à 1.9K (CERN)
- RRR : R(293K/R10K)
- Aimantation $\mu_0 M$ à 4.2K et à 1.9K entre 0 et 0.8 T (CERN)
- Rapport Cu/Sc
- Diamètre des brins
- Pas de torsadage
- Epaisseur du revêtement SnAg

Nombre de mesures effectuées au CERN

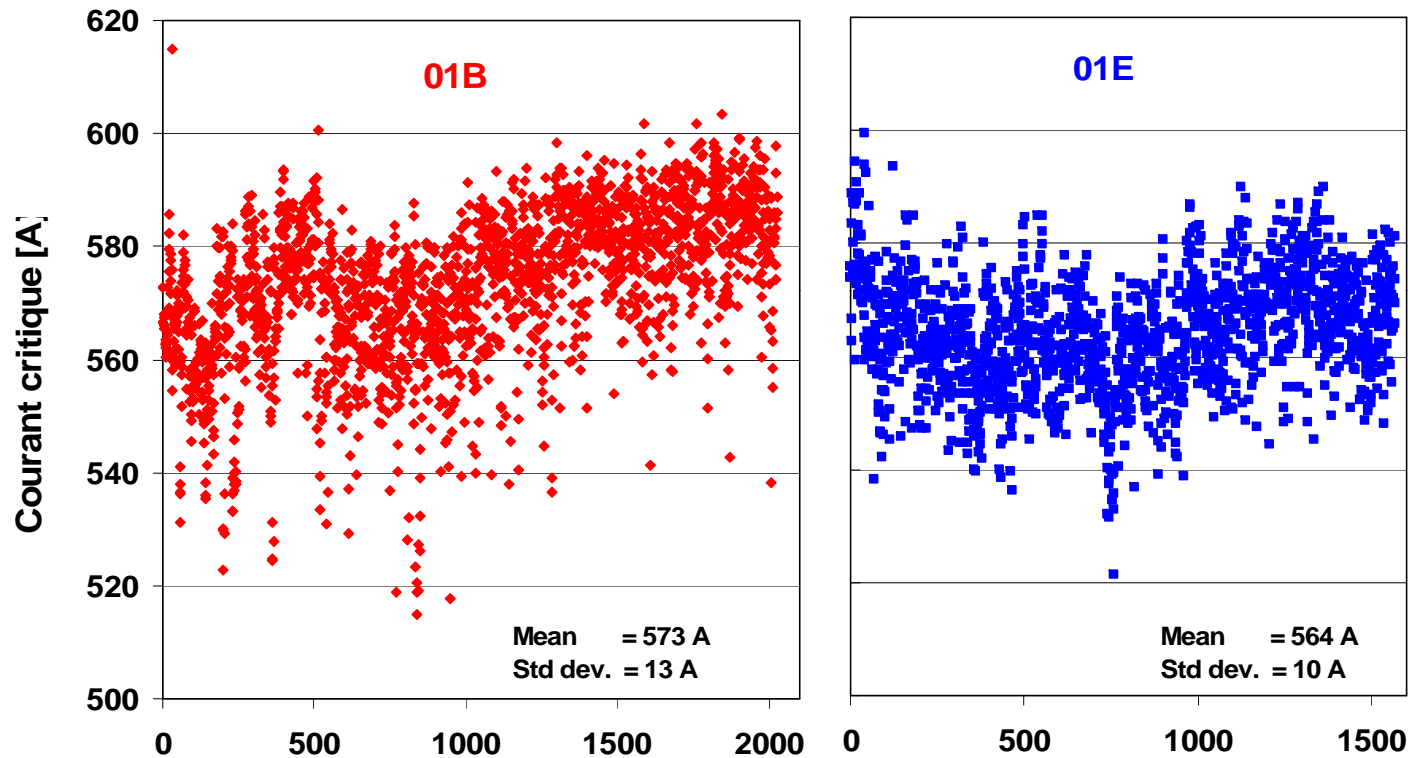
Type de test	Fils vierges	Fils extraits des câbles
Courant critique	11 500	15 000
RRR	13 000	12 800
Aimantation	5 800	-
Cu/Sc	43 000	-



Mesures de courant critique pour la qualification des billettes



Ic mesuré au CERN, brins du câble interne, 1.9 K et 10 T



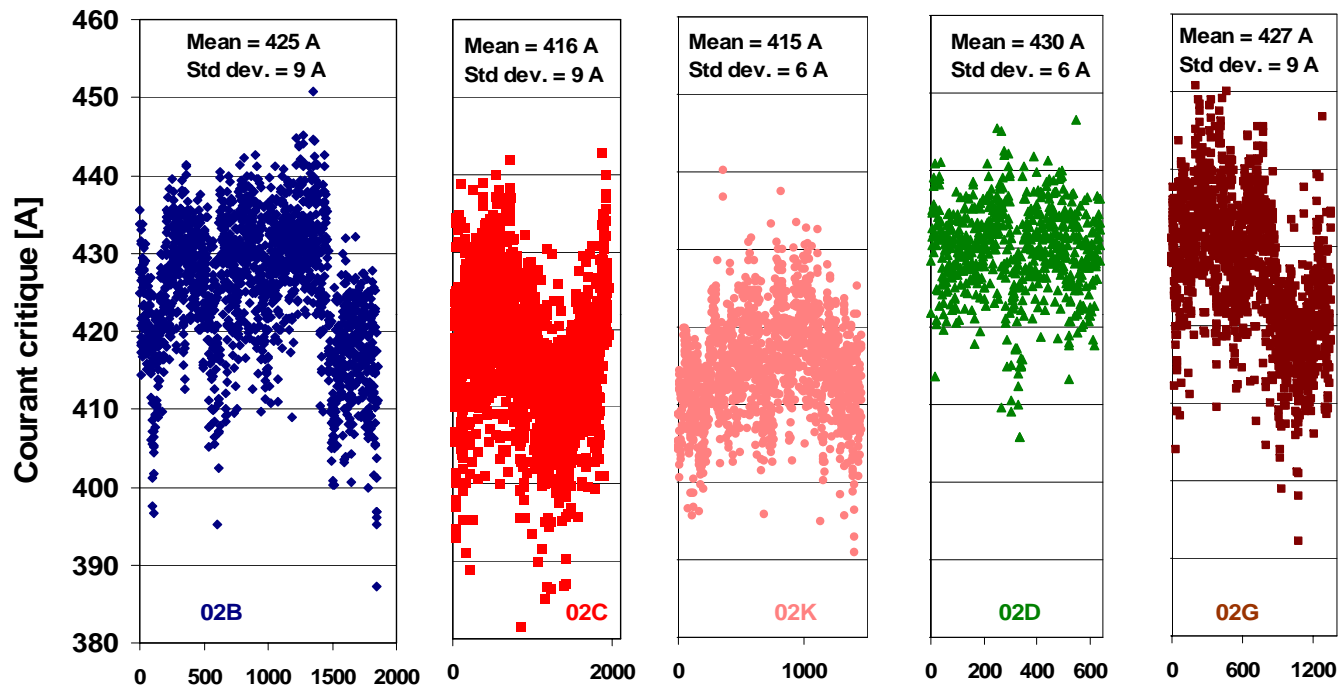
- Valeur moyenne du Ic ~ 10% au dessus de la valeur minimum de 515 A
- Jc(10T, 1.9K) moyen: **1704 A/mm² (01B)** et **1684 A/mm² (01E)**



Mesures de courant critique pour la qualification des billettes



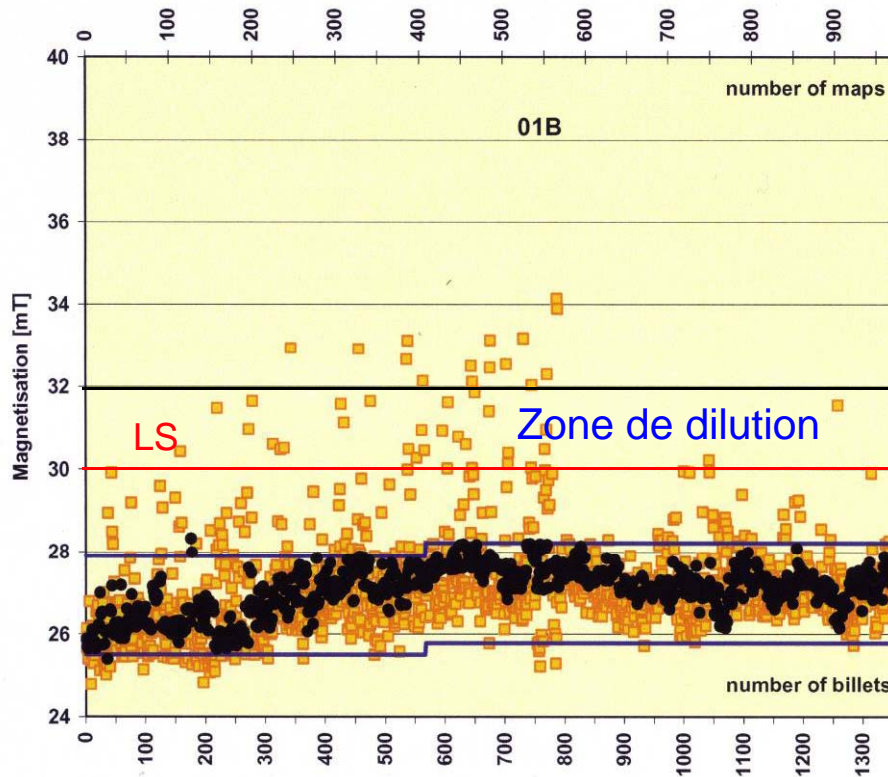
Ic mesuré au CERN, brins du câble externe, 1.9 K et 9 T



- Valeur moyenne du Ic ~ 9% à 12 % au dessus de la valeur minimum de 380 A
- Jc(9T, 1.9K) moyen: **2353 A/mm² (02B)**, **2293 A/mm² (02C)**, **2376 A/mm² (02D)**
2361 A/mm² (02G), **2276 A/mm² (02K)**



Mesures d'aimantation des billettes 01B



Valeur moyenne de $2\mu_0M = 27.1 \text{ mT}$

Sigma = 1.2 mT

30 billettes dans la zone de dilution

Contrôle de l'aimantation en effectuant une mesure par billette.

Dérive de l'aimantation en dehors des limites de contrôle indiquant des problèmes de fabrication.

Long temps de réaction pour toute action corrective : 6 à 9 mois pour fabriquer une billette → 200 à 300 billettes

Plusieurs actions prises par le CERN pour garder l'aimantation des câbles dans les limites de contrôle de +/- 4.5% :

- Cartes de câblage acceptées si et seulement si l'aimantation est dans les limites de contrôle (en contre partie)
- Acceptation des billettes hors spécification ($30 \text{ mT} < 2\mu_0M < 32 \text{ mT}$) à la condition de les diluer dans les cartes de câblage à raison de 2 positions par carte.

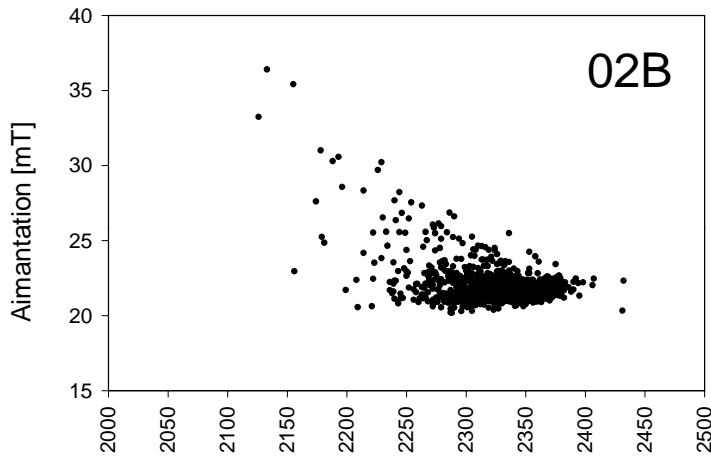


Aimantation des billettes de type 01 et 02

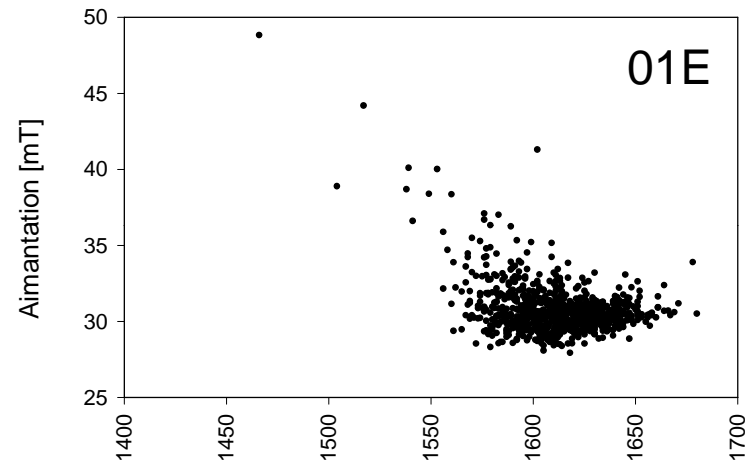


Mauvais contrôle de la température d'extrusion des billettes à l'origine des valeurs d'aimantation excessives.

Déformations importantes des filaments sans avoir un effet significatif sur la valeur de J_c .



Critical current density [A/mm²] by FIRM T = 4.222 K and B = 6 T



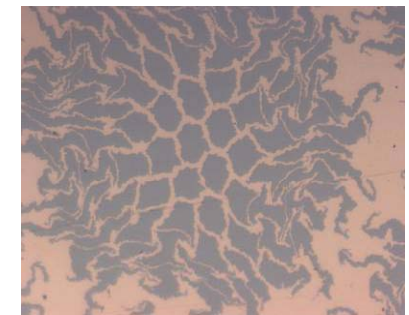
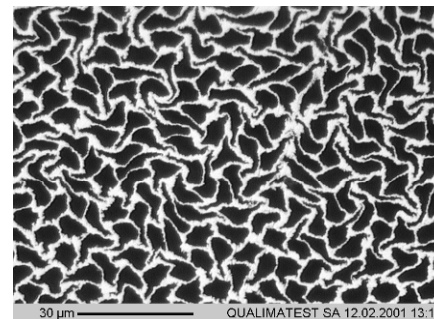
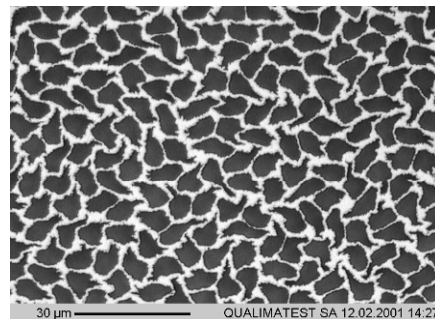
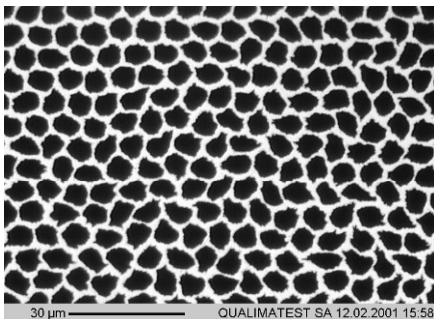
Critical current density [A/mm²] by FIRM T = 4.222 K and B = 7 T

$2\mu_0 M = 20.6$ mT,
 $J_c = 2221$ A/mm² 4.2 K

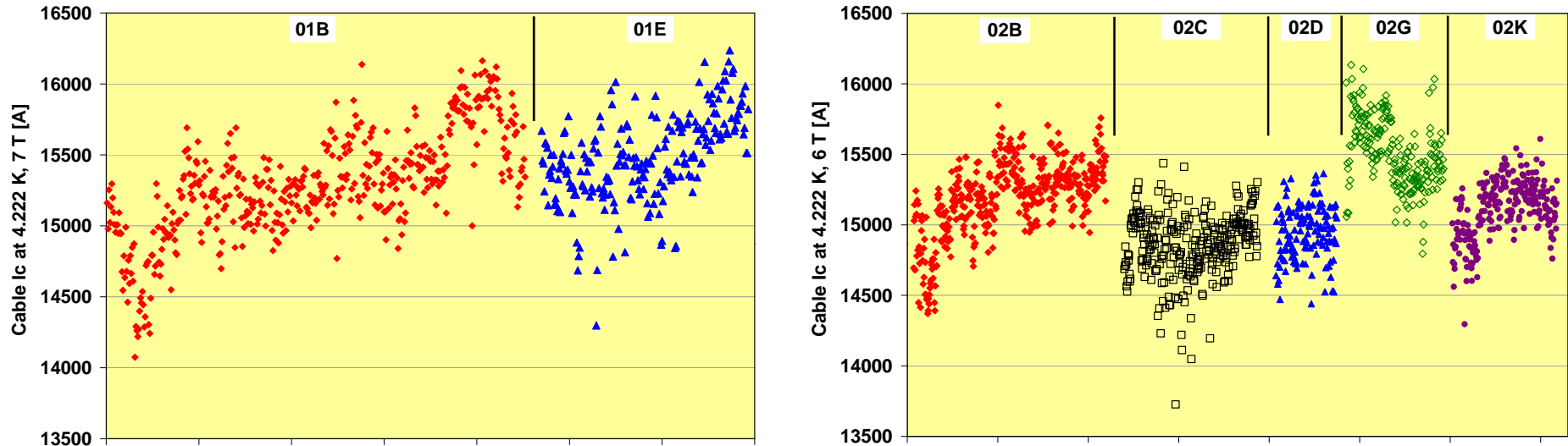
$2\mu_0 M = 25.2$ mT,
 $J_c = 2179$ A/mm² 4.2K

$2\mu_0 M = 31.0$ mT,
 $J_c = 2178$ A/mm² 4.2 K

$2\mu_0 M = 60$ mT,
 $J_c = 1510$ A/mm² 4.2K



1. Mesure à 4.2 K du courant critique des câbles à BNL



Valeur moyenne du courant critique des

câbles 01 : ~ 9 % au dessus de la spécification (14140 A à 7T)

câbles 02 : 11 à 17 % au dessus de la spécification (13236 A à 6T).

Amélioration sensible du Ic des câbles 01B au cours de la production

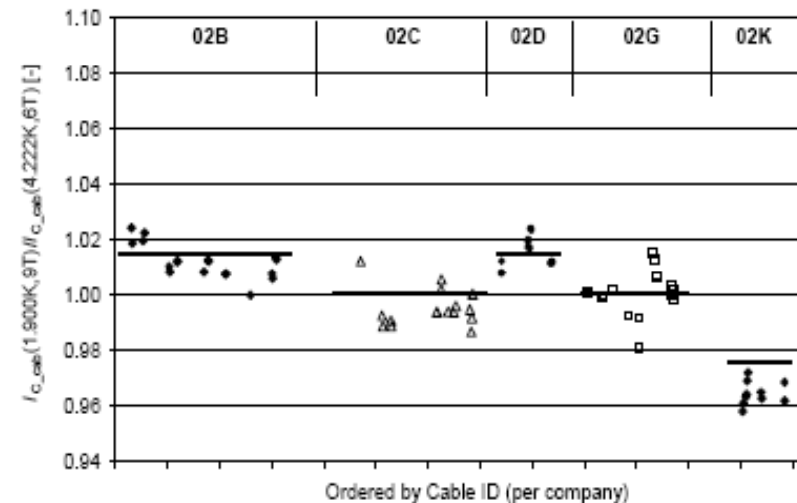
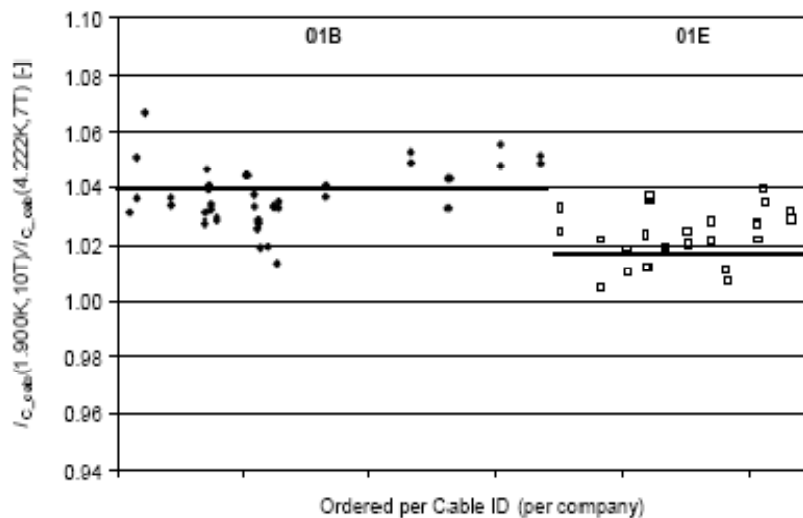


Qualification des câbles LHC



2. Mesure à 1.9 K du courant critique des câbles au CERN et corrélation avec les mesures à 4.2 K.

~ 550 câbles mesurés à 1.9 K au CERN

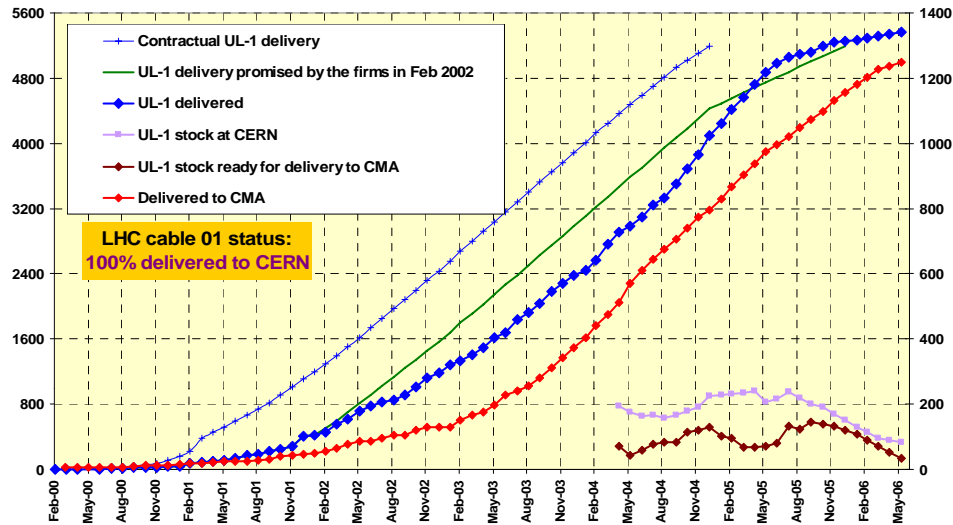


Bonne corrélation entre le rapport des mesures I_c des câbles à 4.2 K et à 1.9 K et le même rapport entre les mesures I_c des fils vierges.

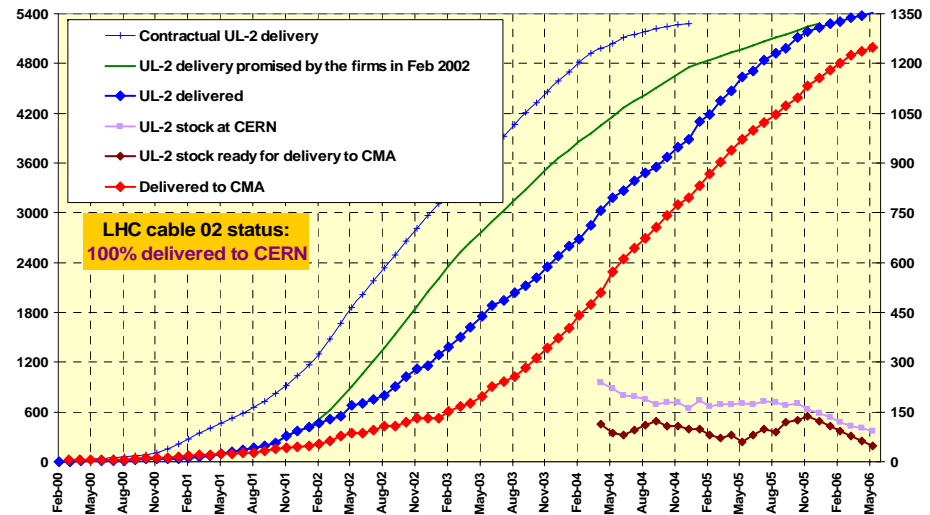
- > pas de changement du rapport par le câblage.



Livraison des câbles pour les dipôles



Difficultés rencontrées par les fabricants pour monter en cadence et atteindre le plateau de production.





Contrôle dimensionnel des câbles au CERN



Mesure de la dimension des câbles par 3 lignes de contrôle installées au 103.



Objectif

Contrôler au CERN
25% de la production
des câbles

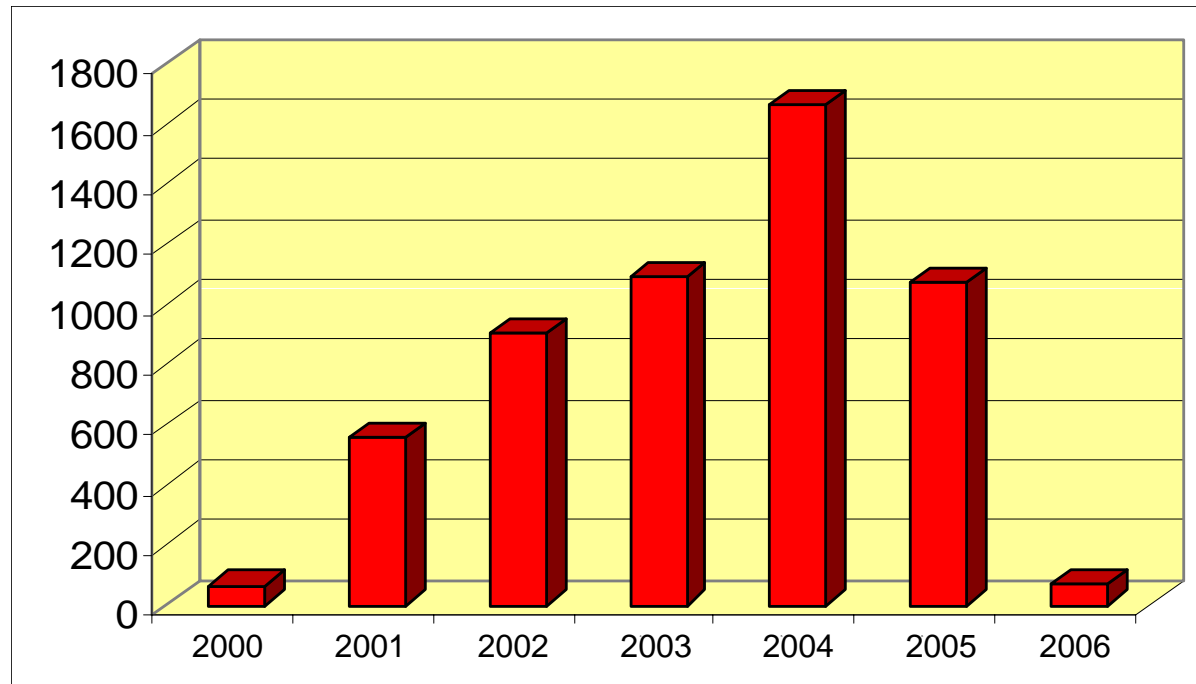
Quelle a été la quantité de câble contrôlée pendant les 6 ans de production ?



Quantité de câbles mesurés au CERN



Contrôle dimensionnel de 45 % de la production soit ~ 5400 câbles



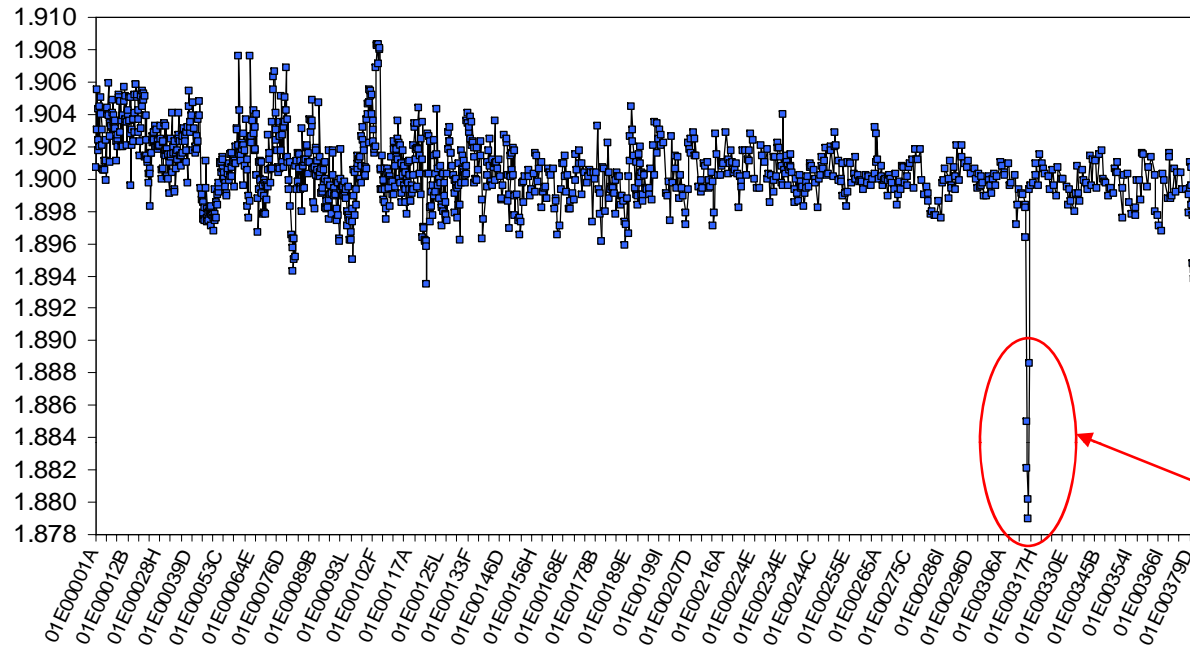
En 2000 et 2001, contrôle de 74 % de la production

En 2002, contrôle de 50 % de la production

Fréquence d'échantillonnage différente selon les fabricants. Par exemple : échantillonnage de la production d'ALSTOM à 34 % et celle d' EAS à 63 % !

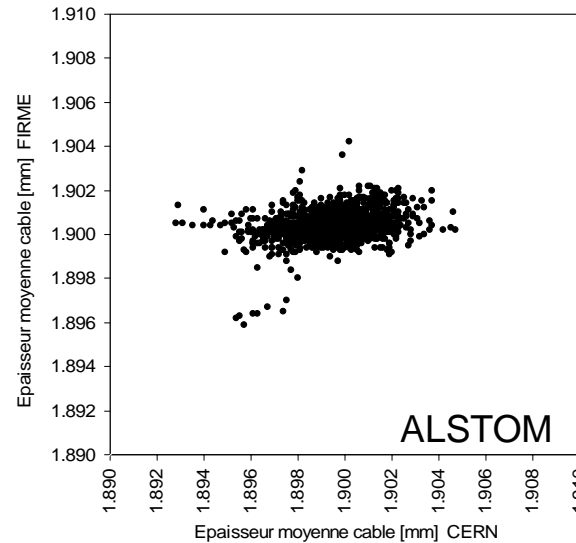
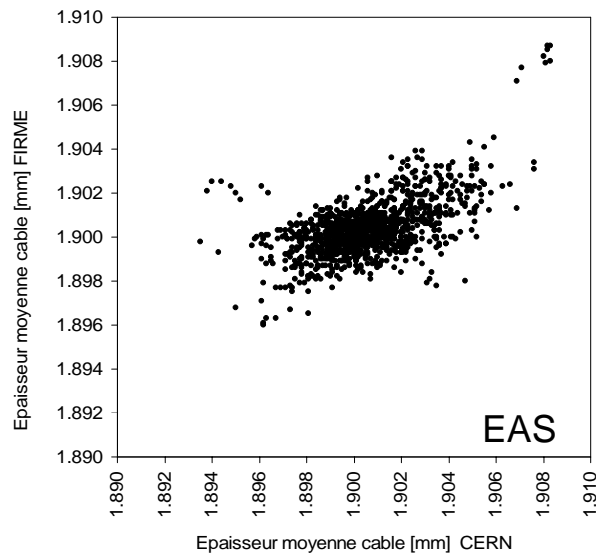


Mesure de l'épaisseur à mi-hauteur des câbles



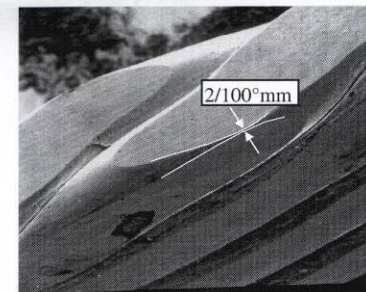
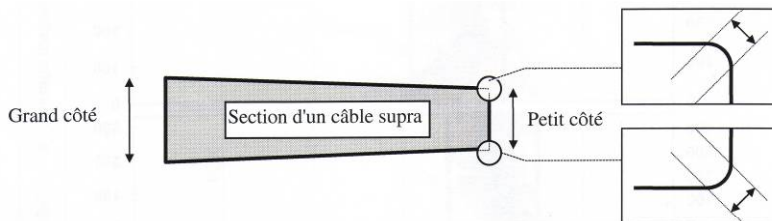
Mesure au
CERN de
1242 câbles
livrés par EAS
(63 %)

Câbles
refusés

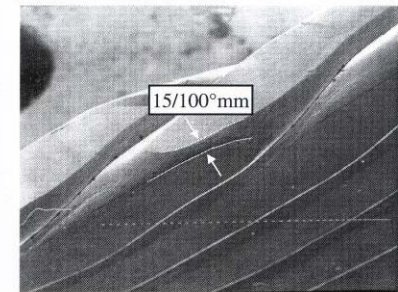


Très bonne
corrélation entre
les mesures des
firmes et du
CERN

Une des difficultés rencontrée pendant la production: Obtention de câbles sans angles vifs.



Non acceptable



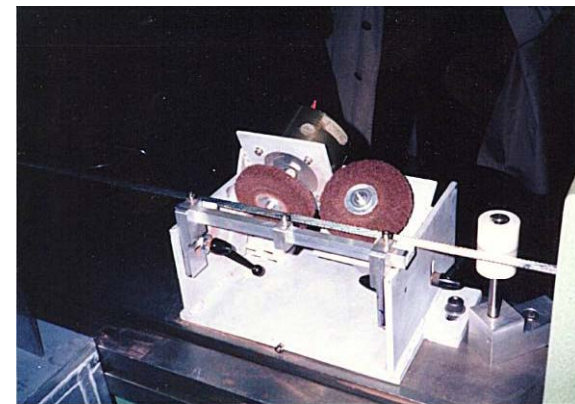
Acceptable

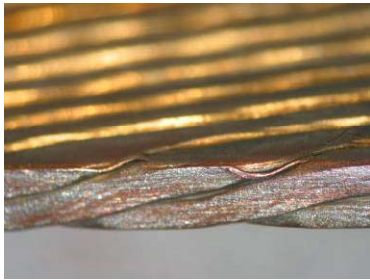
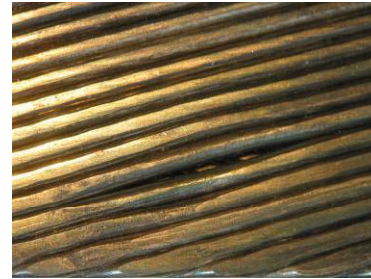
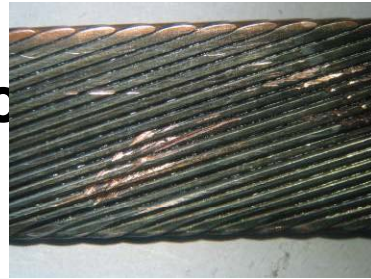
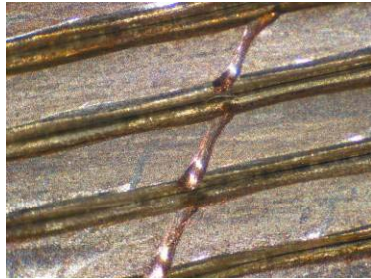
Qualité des bords acceptable si Largeur de l'arrondi $> 0.1 \text{ mm}$

Tous les fabricants ont dû faire face à des problèmes de bords coupants !

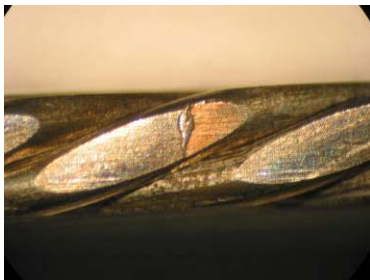
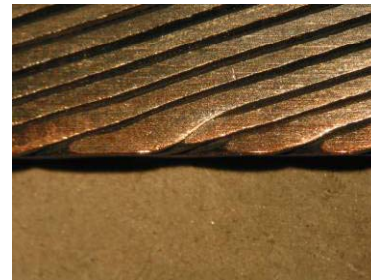
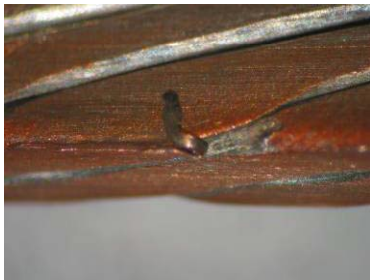
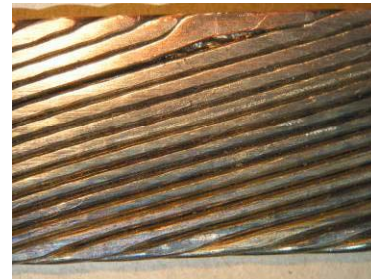
Problèmes de bords coupants concernant principalement les câbles de type 02/03

Brossage de $\sim 90 \%$ des câbles 02D





- Nombreux problèmes avec la qualité de surface des câbles.
- **Principaux défauts:** Bavures, Chevauchements Rayures, Copeaux
- Installation d'une ligne de contrôle additionnelle
- Câbles fabriqués par 2 centres de câblage avec une qualité de surface inacceptable → 61 %



% des câbles contrôlés pour l'état de surface

% des câbles défectueux

01E

54 %

18%

02C0

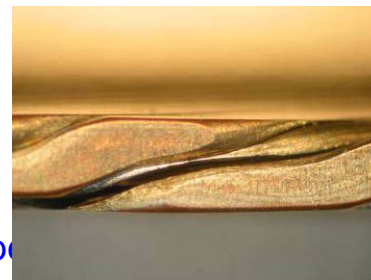
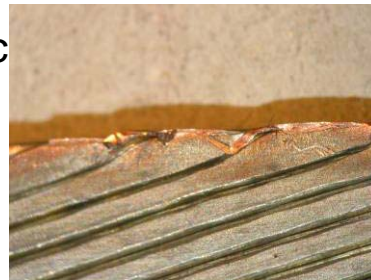
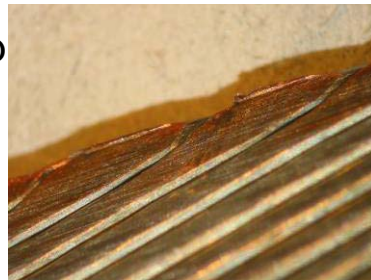
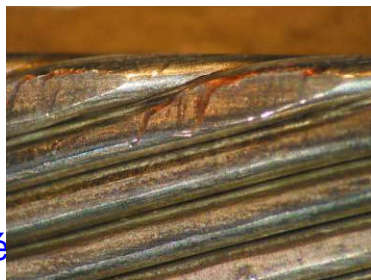
90 %

26%

02D

40 %

12%





Bilan de la production des câbles LHC



Succès de la production mesuré par un faible taux de rejet:

Billetes refusées par le CERN: 0.4 % (aimantation)

Assez grand nombre de billetes rejetées directement par les fabricants
(le pourcentage est estimé entre 0.2 et 4 % selon les contrats)

Câbles renvoyés pour réparation (qualité de surface): ~ 2 %

Câbles refusés et déclassifiés: < 1 % (câbles 02 déclassifiés en câbles 03)

et par des performances excellentes:

10 des câbles 10 % en moyenne au dessus de la spécification

Dimension des câbles dans les spécifications

Aimantation des câbles dans les limites de contrôles



Conclusion



Le système d'assurance qualité mis en place a été déterminant pour garantir les performances.

(Important d'avoir les moyens de faire des contre-mesures pour s'assurer de la qualité, une bonne corrélation entre les mesures du CERN et des fabricants a été obtenue avant de monter en production)

La production des câbles supraconducteurs du LHC a été un grand défi industriel.

(~ 100 billettes produites pendant la phase de R&D
et 6050 billettes à produire pour le LHC)

MERCI à toutes les personnes qui ont contribué à ce succès.