



*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*

Défis scientifiques et techniques du LHC

Philippe Lebrun
CERN

10 avril 2008



Plan

- Un grand instrument de la physique du 21^{ème} siècle
- Les fluides quantiques au travail
- Maîtriser l'espace et le temps
- Science, technologie et société
- Conclusion



Plan

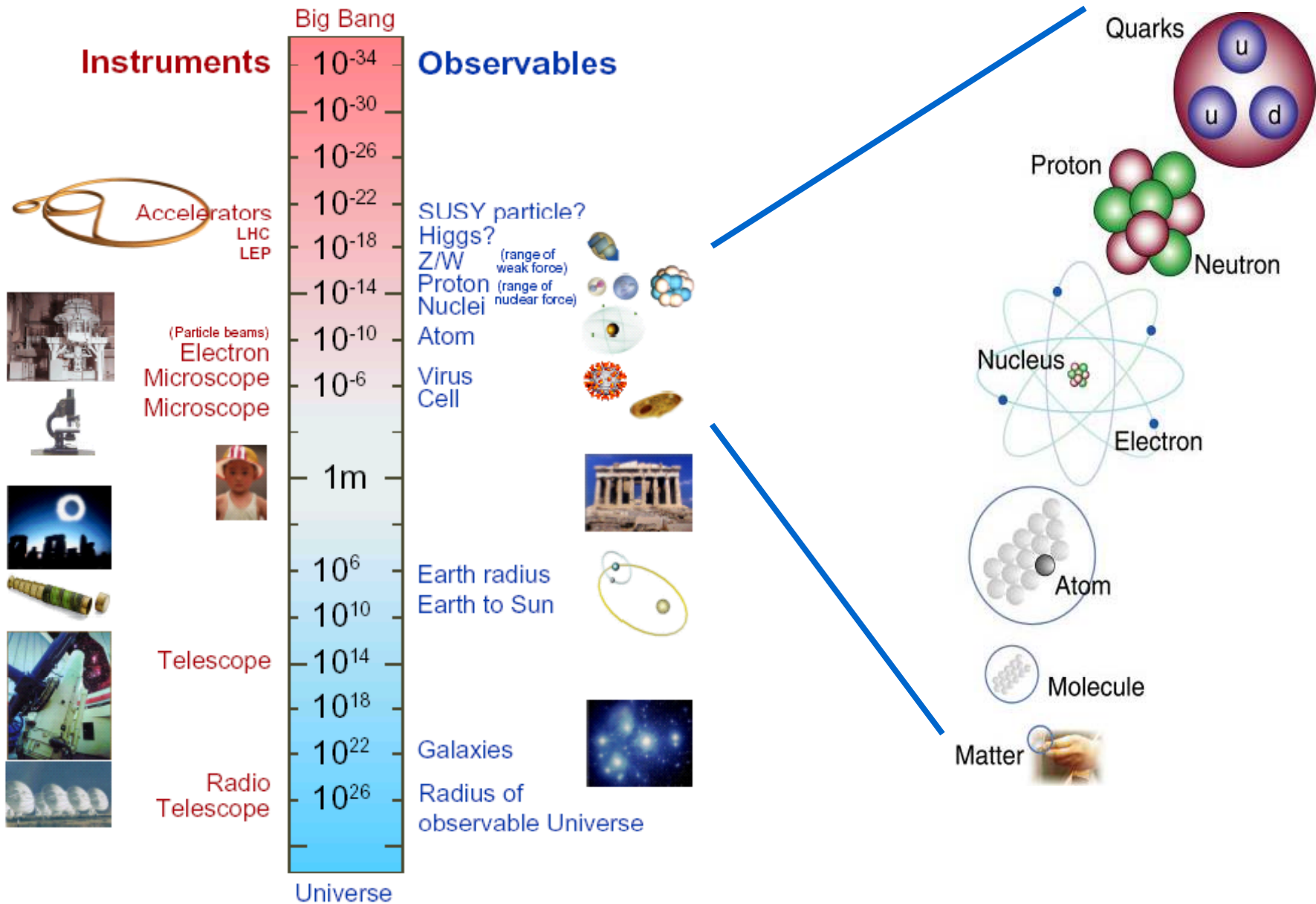
- Un grand instrument de la physique du 21^{ème} siècle



Le plus grand instrument scientifique du monde

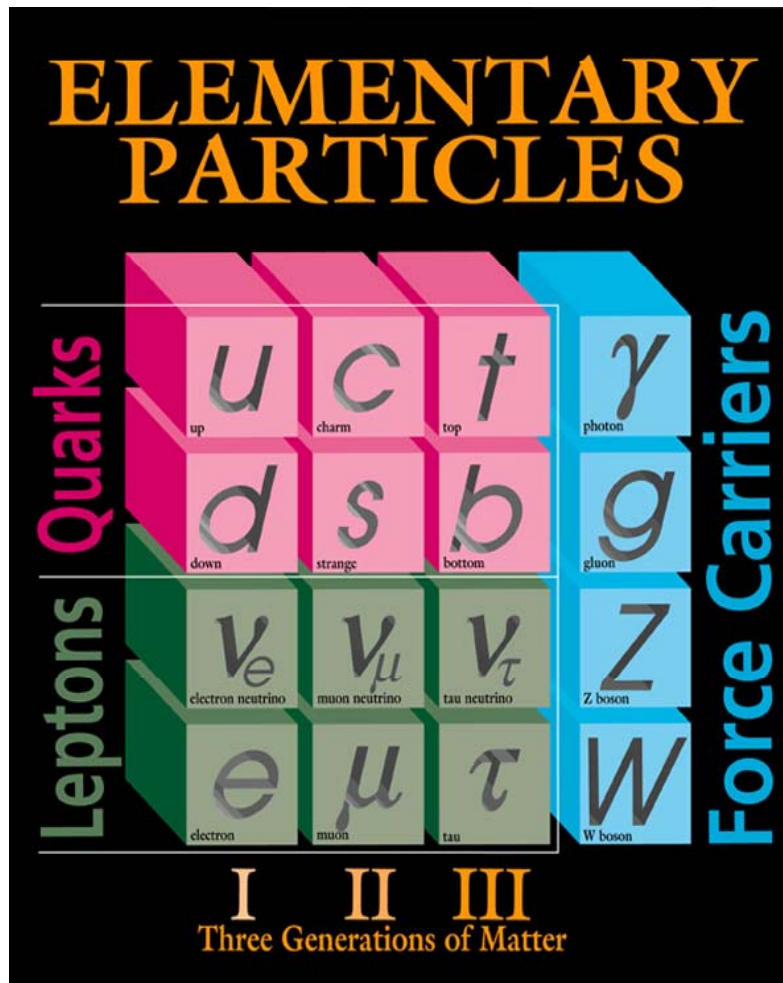


The size of things





Le Modèle Standard de la physique des particules

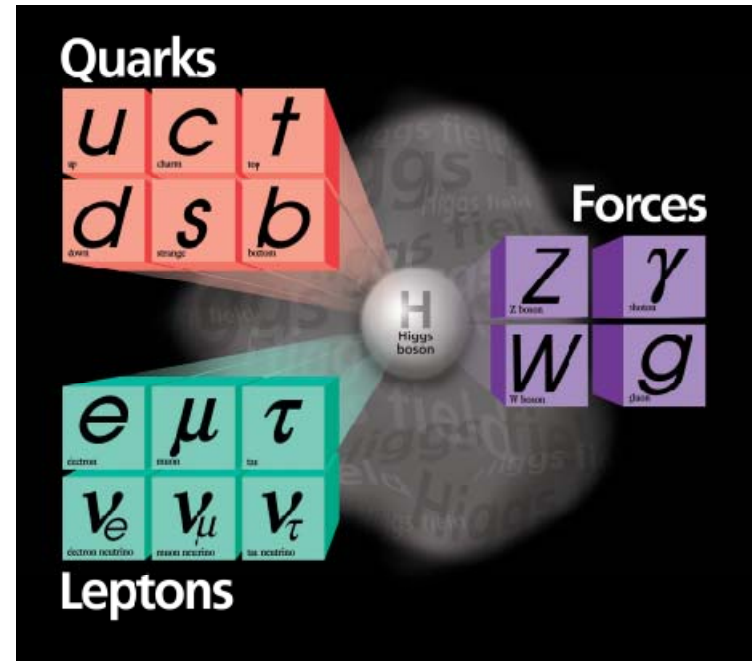
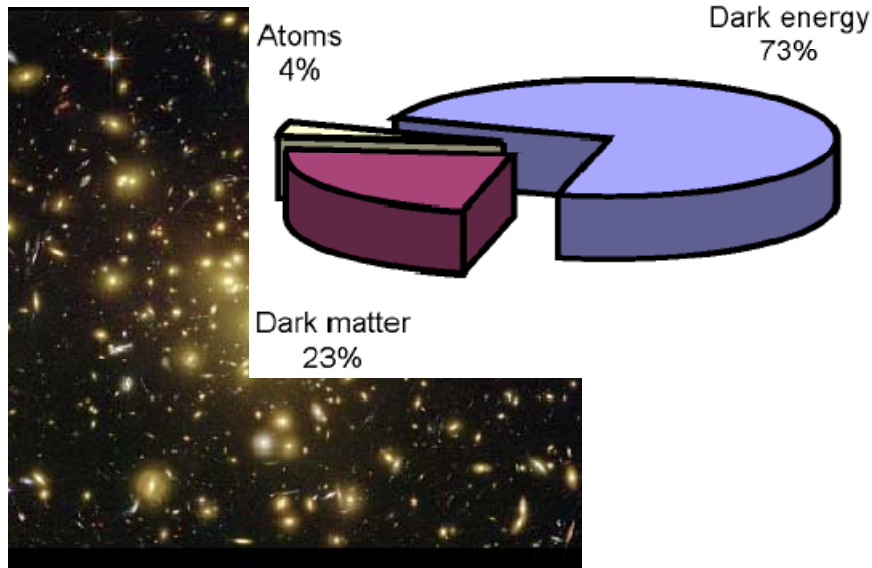


- La matière se compose de fermions (6 quarks et 6 leptons)
- Tous les fermions ont leurs antiparticules
- Trois familles de masses croissantes, la première constituant la matière « normale »
- Les forces (nucléaire forte, électromagnétique, nucléaire faible) s'exercent par échange de bosons (gluons, photons, bosons « faibles »)
- Succès et précision du modèle



Les questions du Modèle Standard

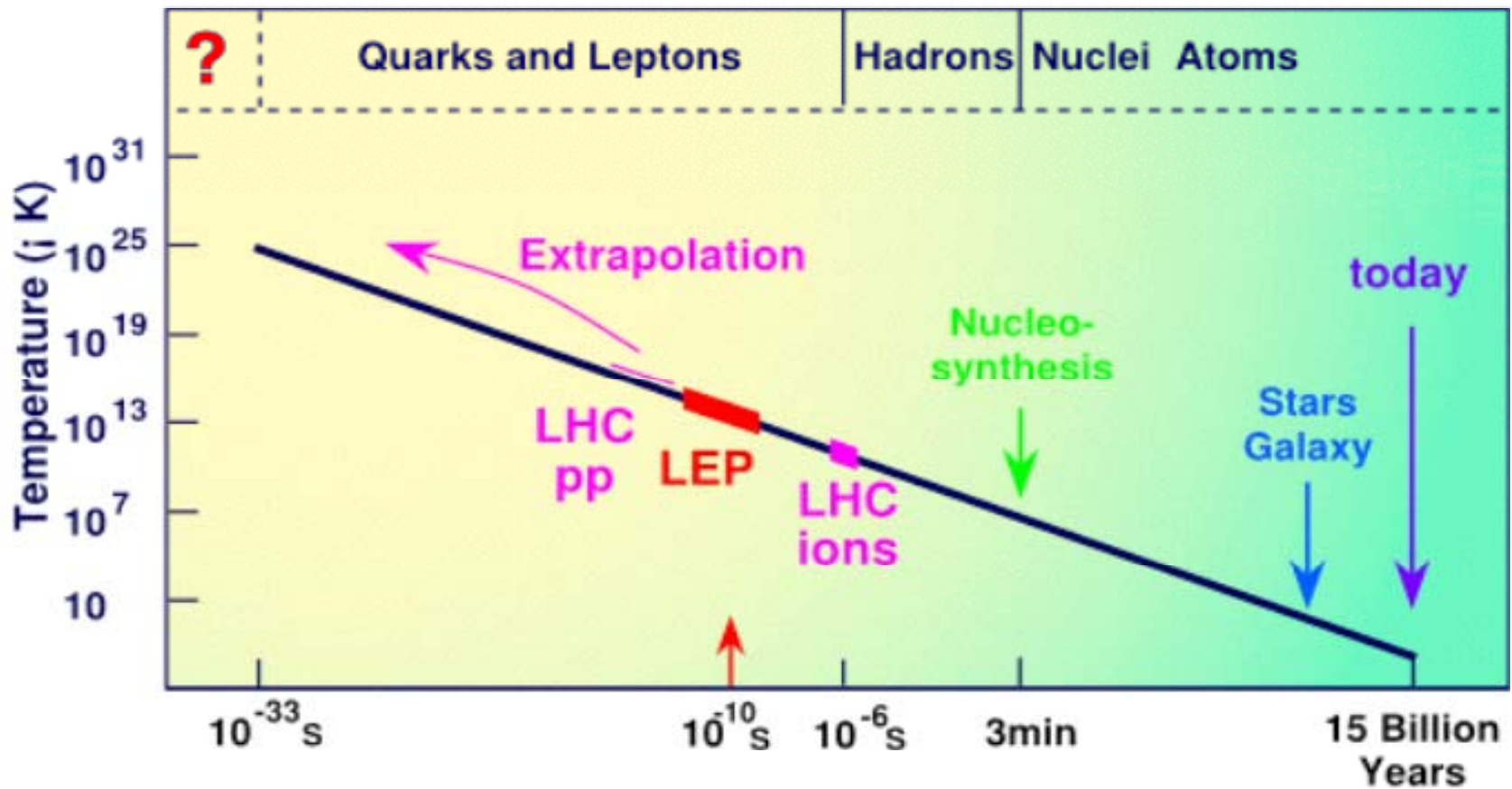
- D'où vient la masse des particules? De leur couplage avec le champ de Higgs?
⇒ Bosons de Higgs?
- La gravité n'y est pas!
- La « supersymétrie » bosons/fermions?
- Le paradigme de l'unification?



- Origine de l'asymétrie matière-antimatière dans l'univers?
- Qu'est-ce que la matière noire?
- Qu'est-ce que l'énergie noire?

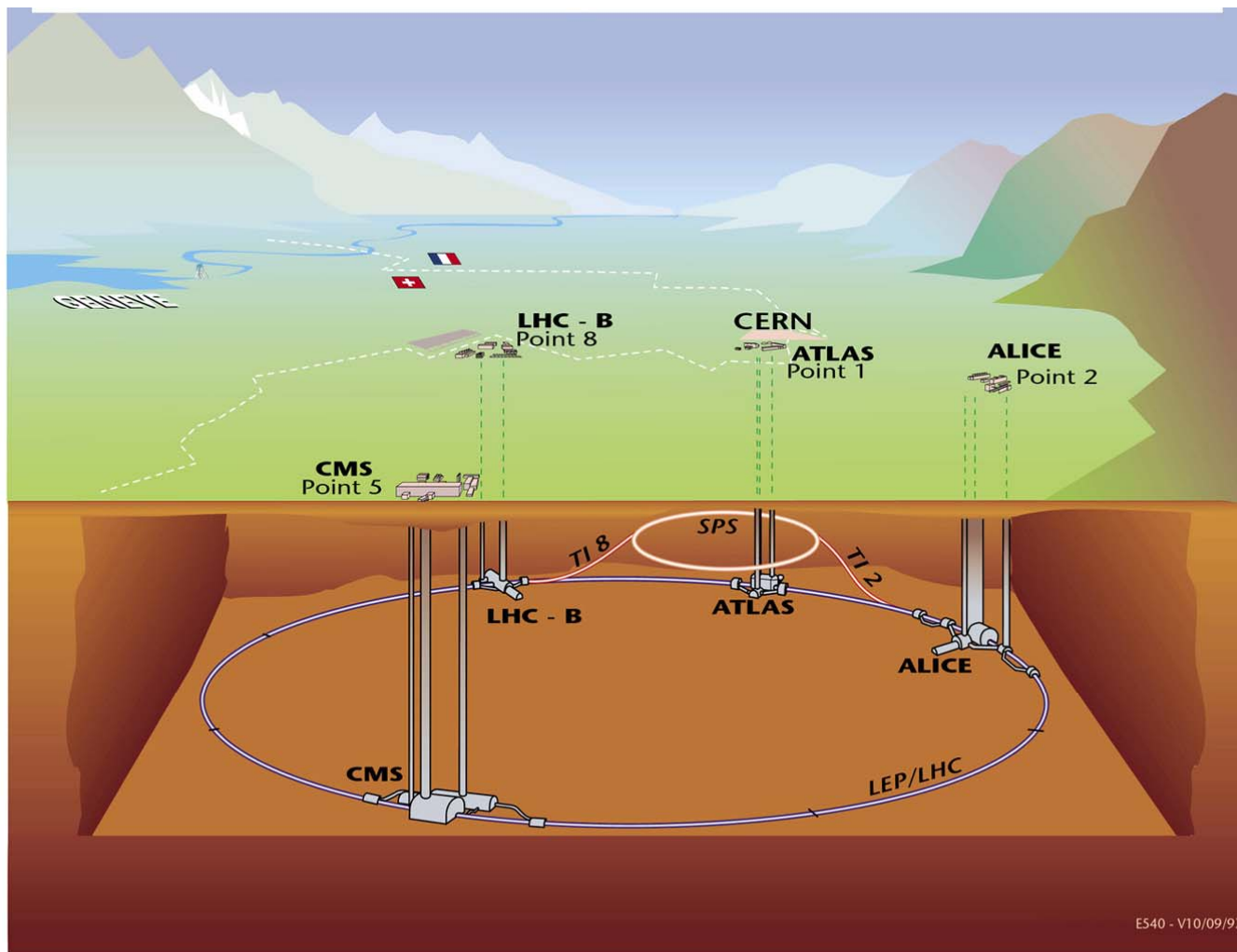


Une machine à remonter le temps



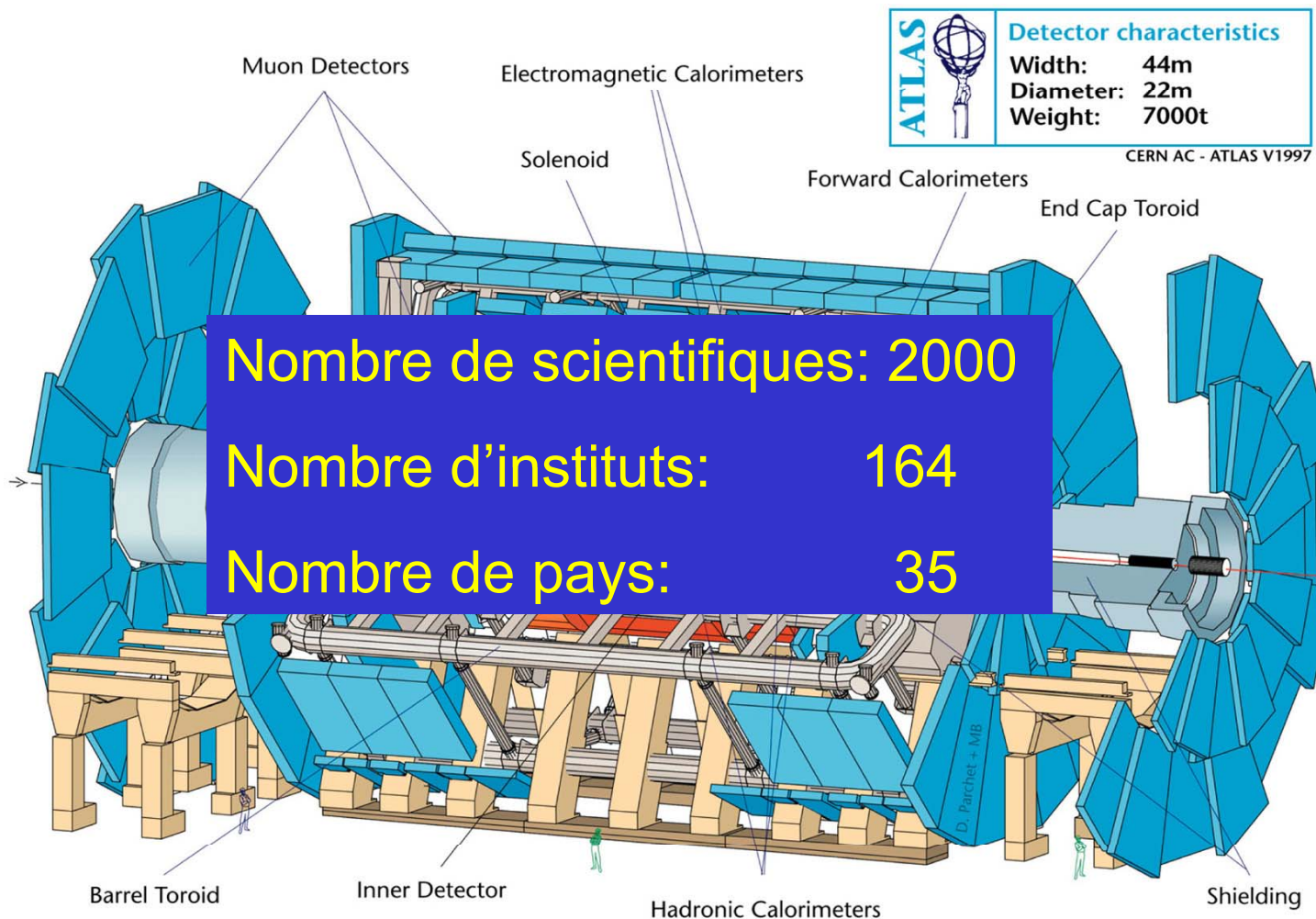


Implantation du LHC et de ses détecteurs



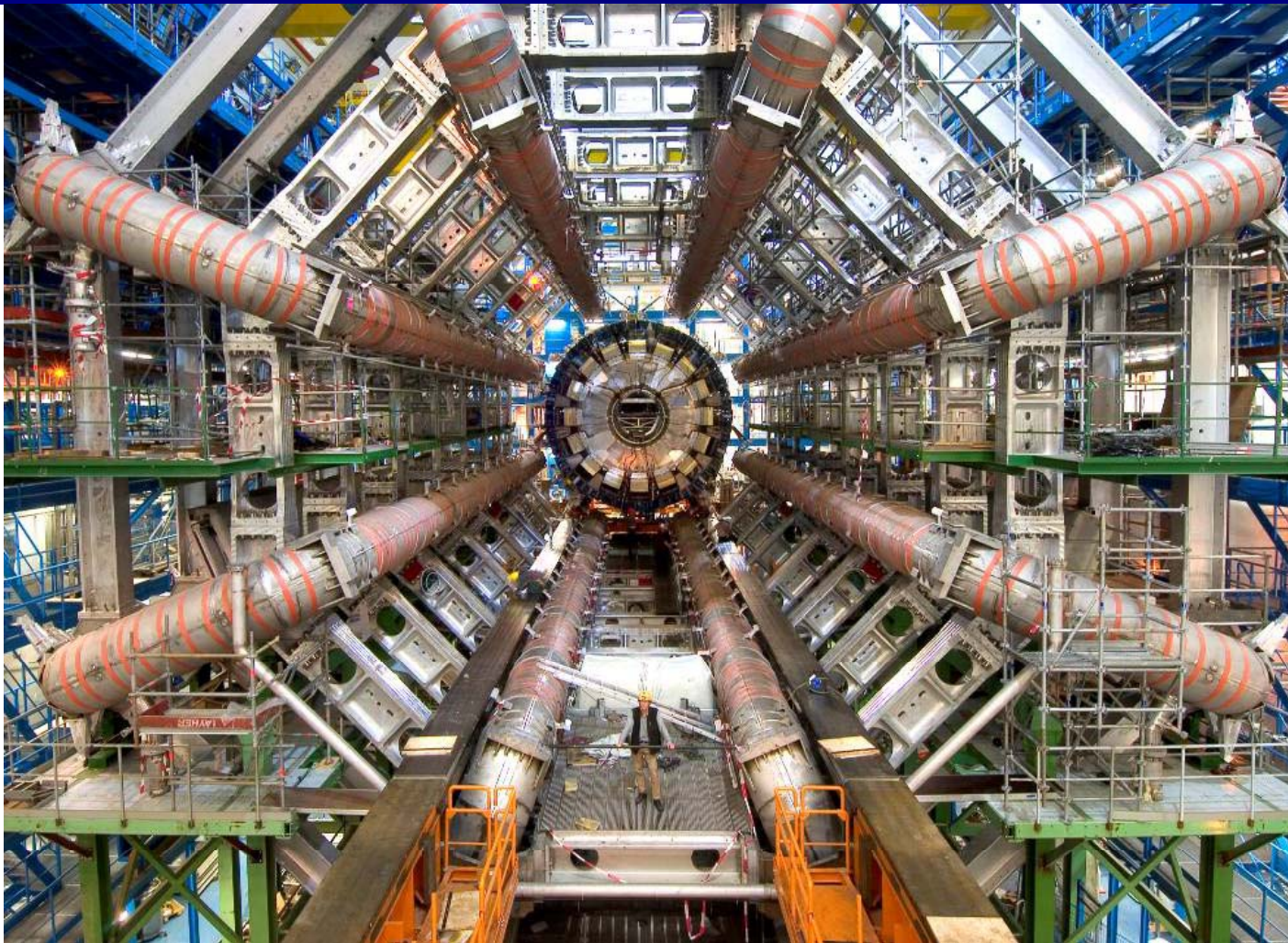


Le détecteur ATLAS





Le toroïde central d'ATLAS



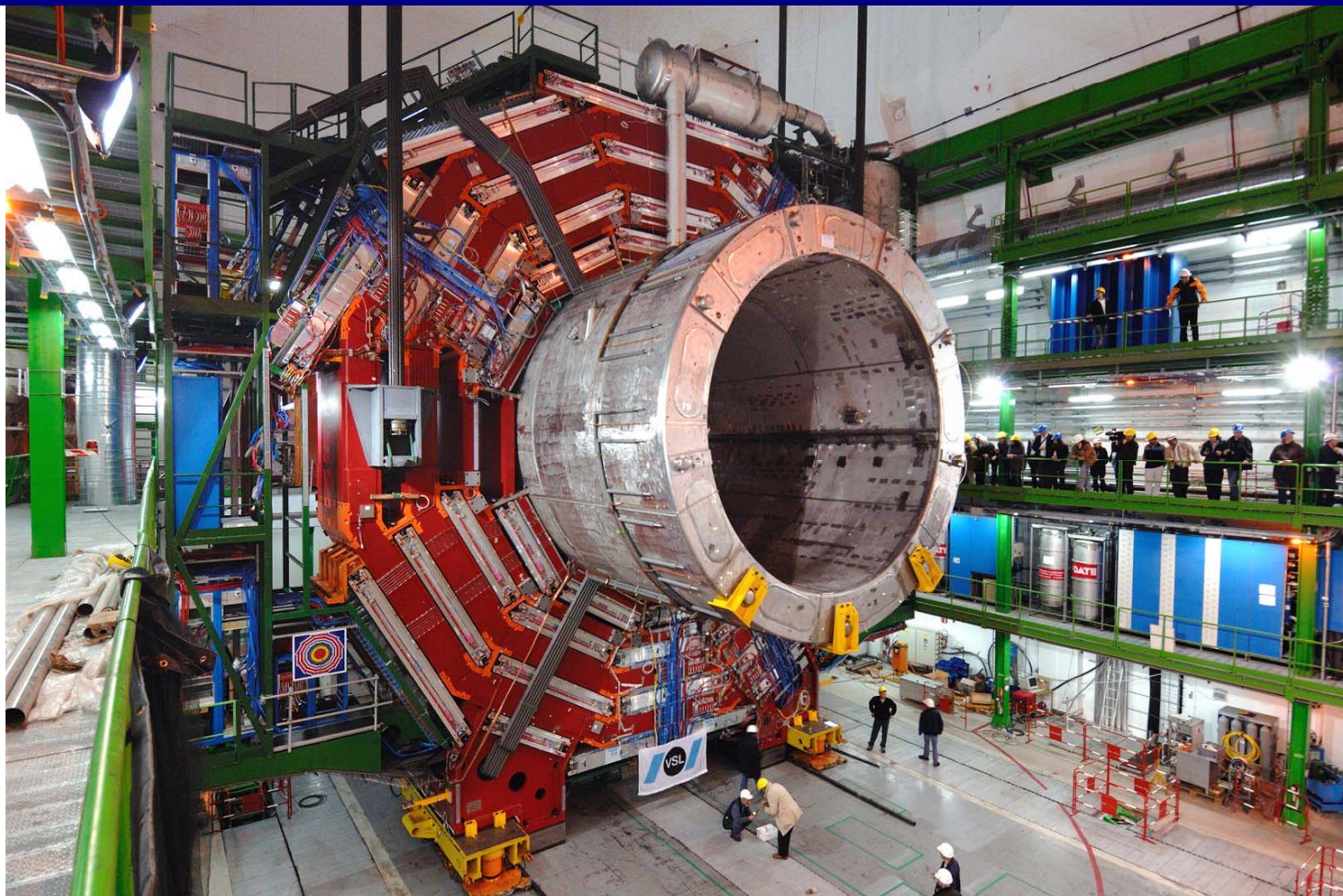


Le détecteur CMS



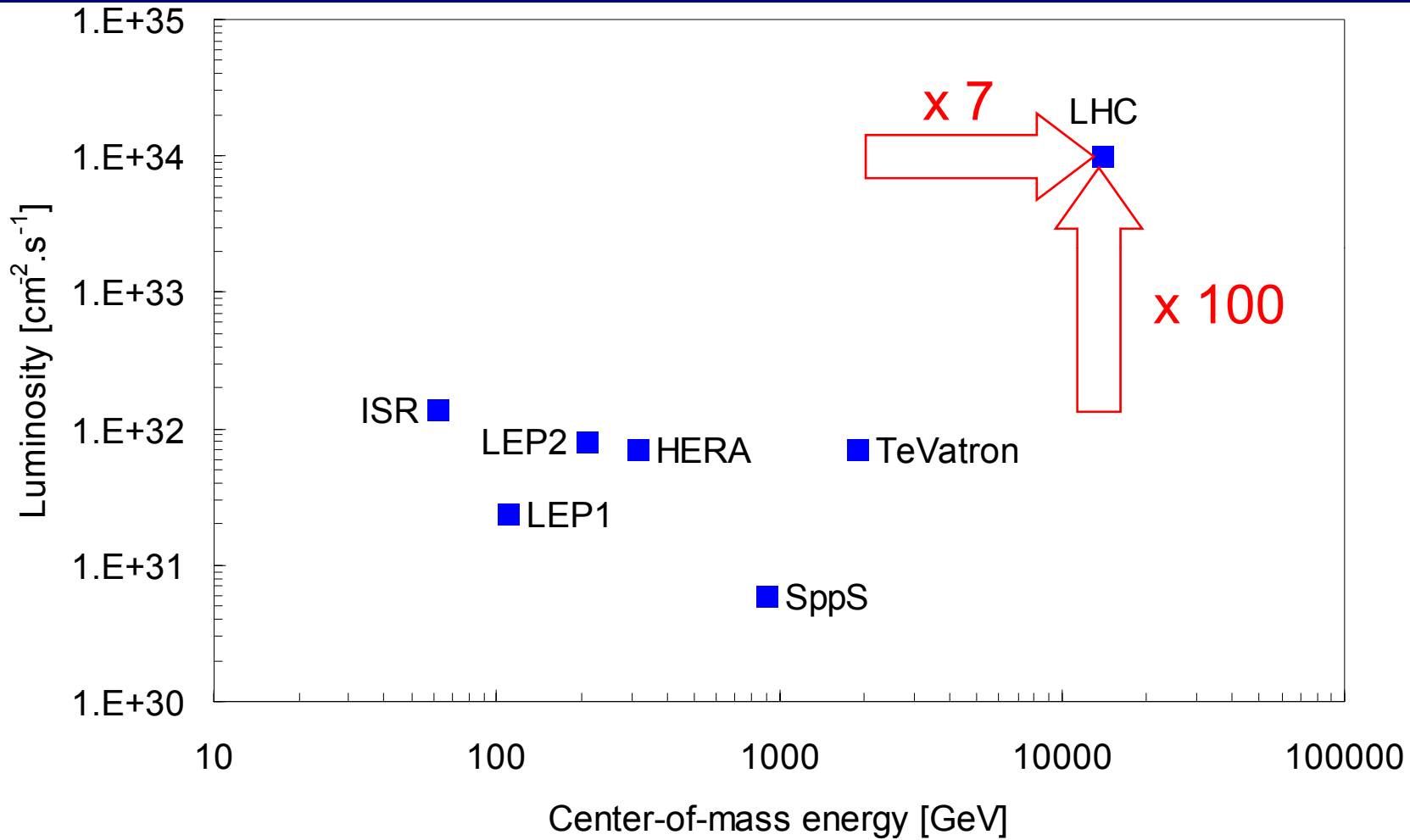


Le solénoïde supraconducteur de CMS





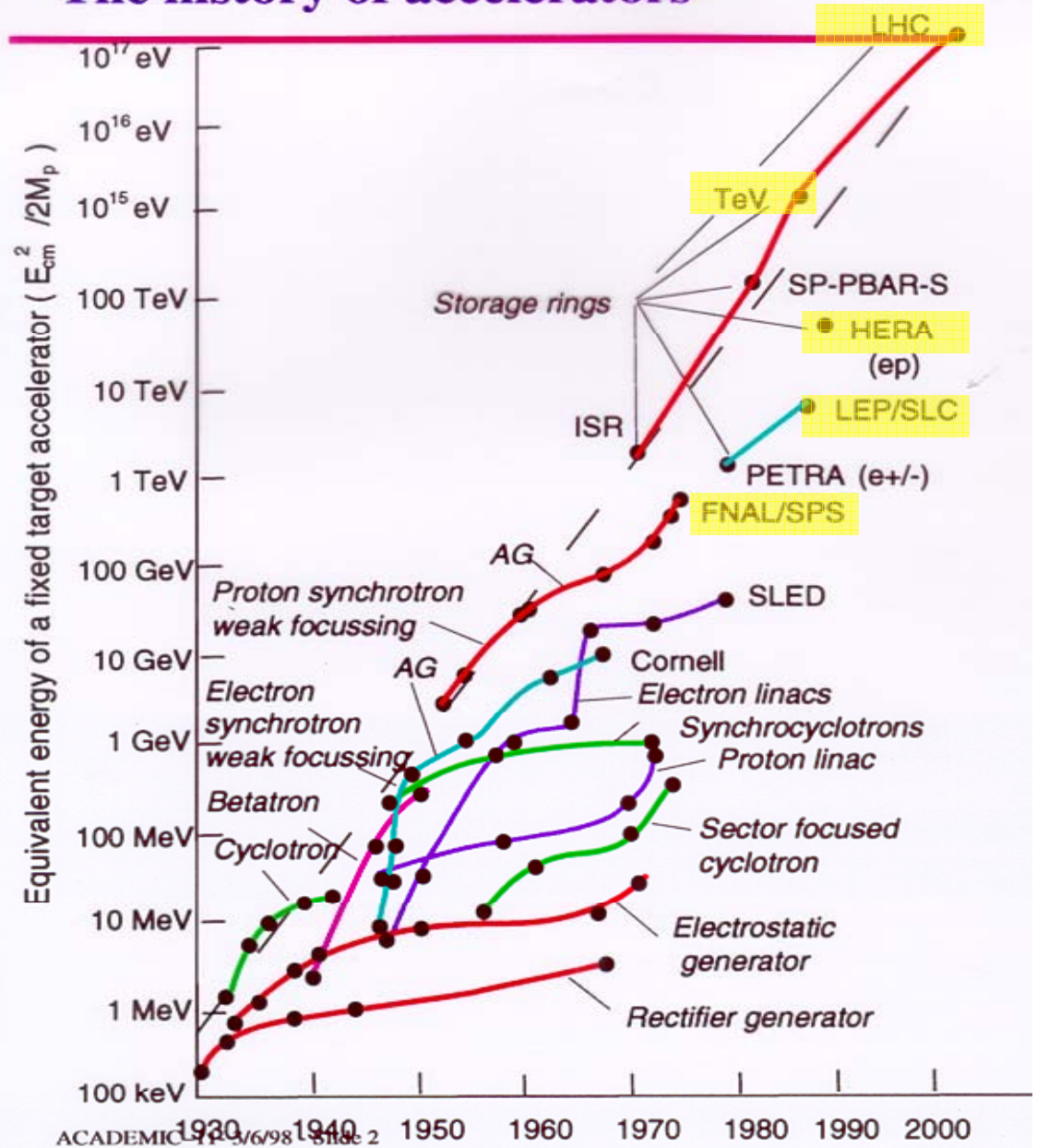
Energie et luminosité des collisionneurs de particules





- un développement exponentiel soutenu sur plus de 70 ans
- des ruptures techniques épousant les technologies émergentes
- la **supraconductivité**, technologie-clé des accélérateurs de haute énergie depuis les années 1980

The history of accelerators





Supraconductivité & accélérateurs circulaires

- L'énergie de faisceau, l'induction magnétique et le rayon des accélérateurs circulaires sont reliés par:

$$E_{\text{faisceau}} = 0.3 \mathbf{B} r$$

[GeV] [T] [m]

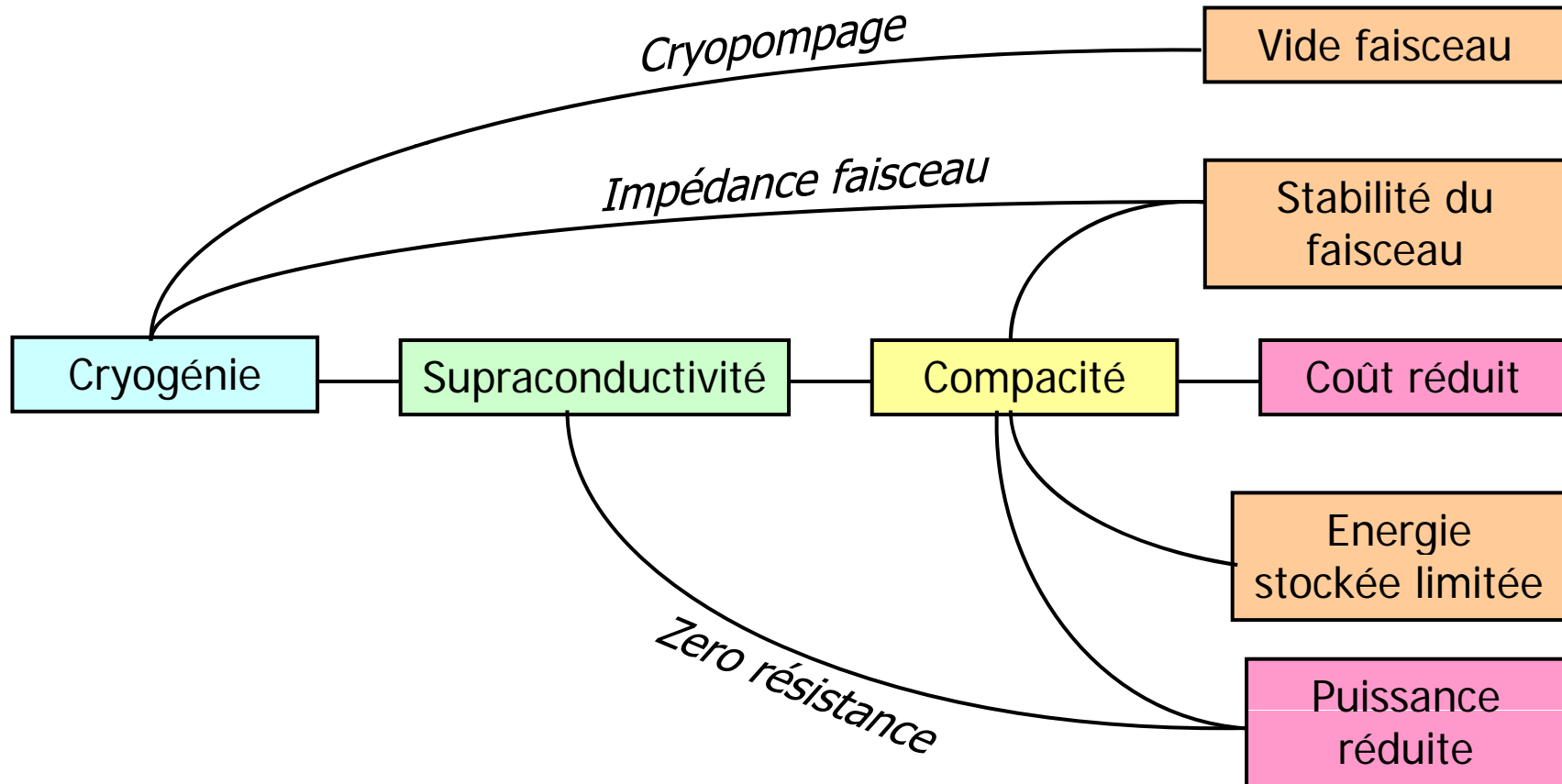
Au LHC ($r = 2.8 \text{ km}$), il faut $\mathbf{B} = 8.33 \text{ T}$ pour atteindre $E_{\text{faisceau}} = 7 \text{ TeV}$

- La supraconductivité permet d'atteindre des inductions élevées et donc de limiter dimension et consommation électrique des machines

	Résistif	Supraconducteur (LHC)
Induction magnétique	1.8 T (saturation du fer)	8.3 T (surface critique NbTi)
Géométrie du champ	Définie par le circuit magnétique	Définie par les bobines
Densité de courant dans les bobines	10 A/mm ²	400 A/mm ²
Force électromagnétique	20 kN/m	3400 kN/m
Consommation électrique	10 kW/m	2 kW/m



Les bénéfices de la supraconductivité et de la cryogénie au LHC





Plan

- Les fluides quantiques au travail

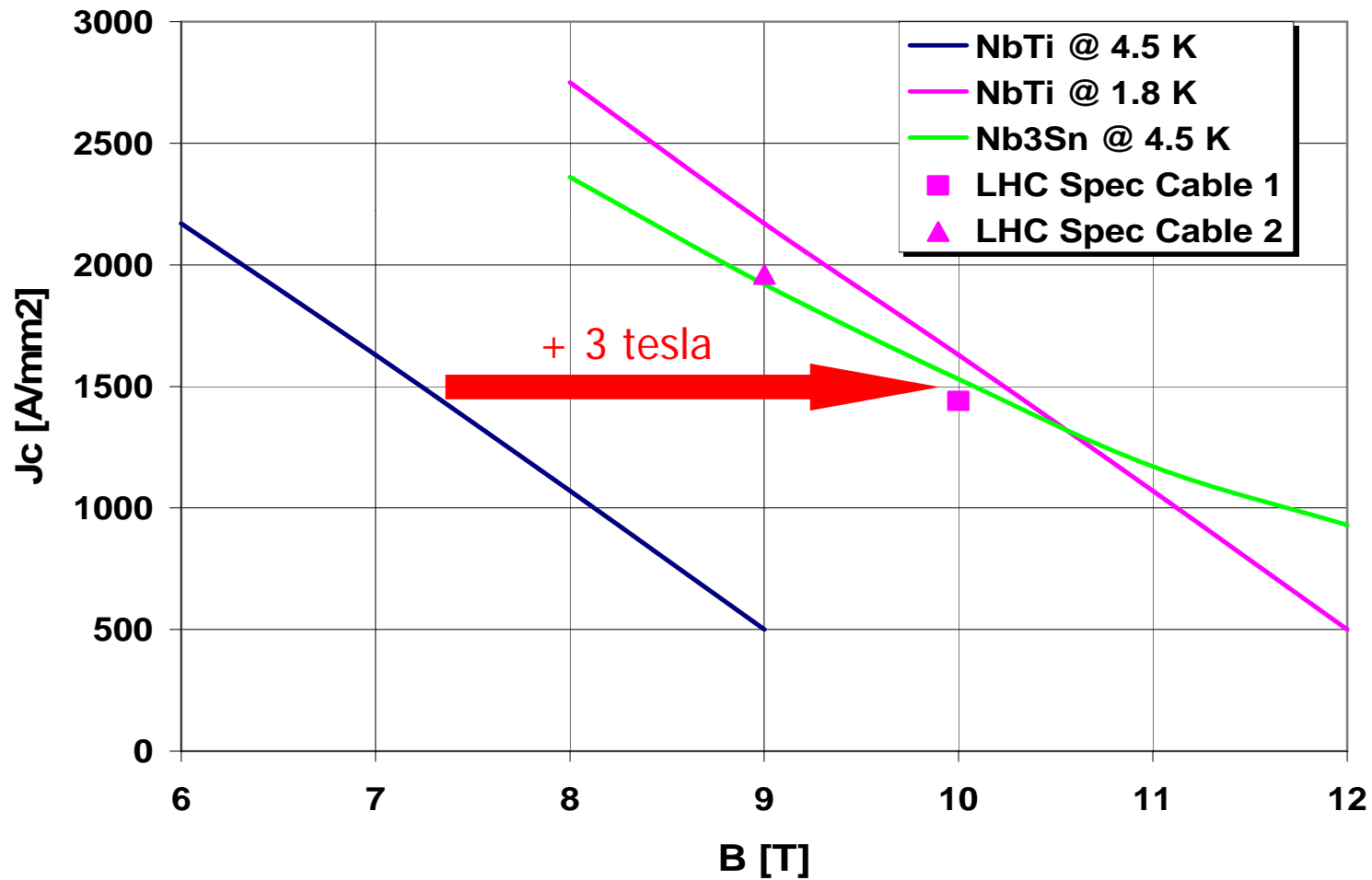


23 km d'aimants supraconducteurs 1232 dipôles, 474 quadripôles, 7612 correcteurs



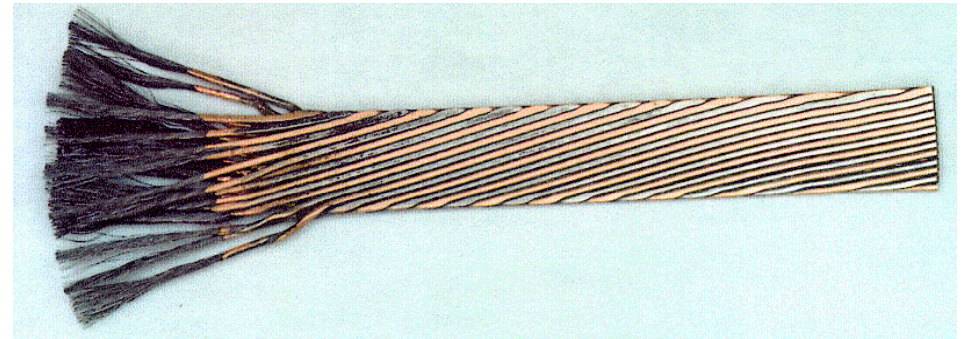


Densité de courant critique des supraconducteurs

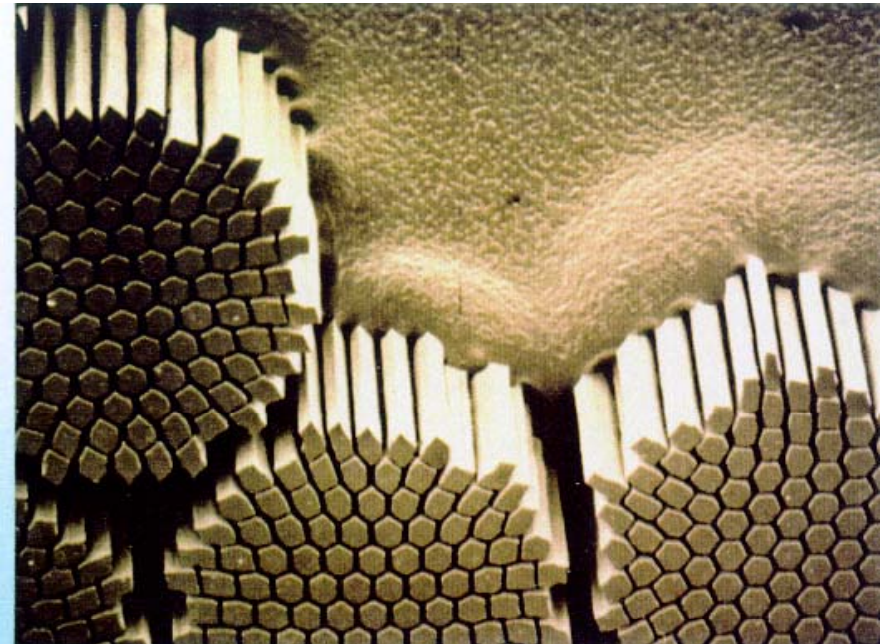




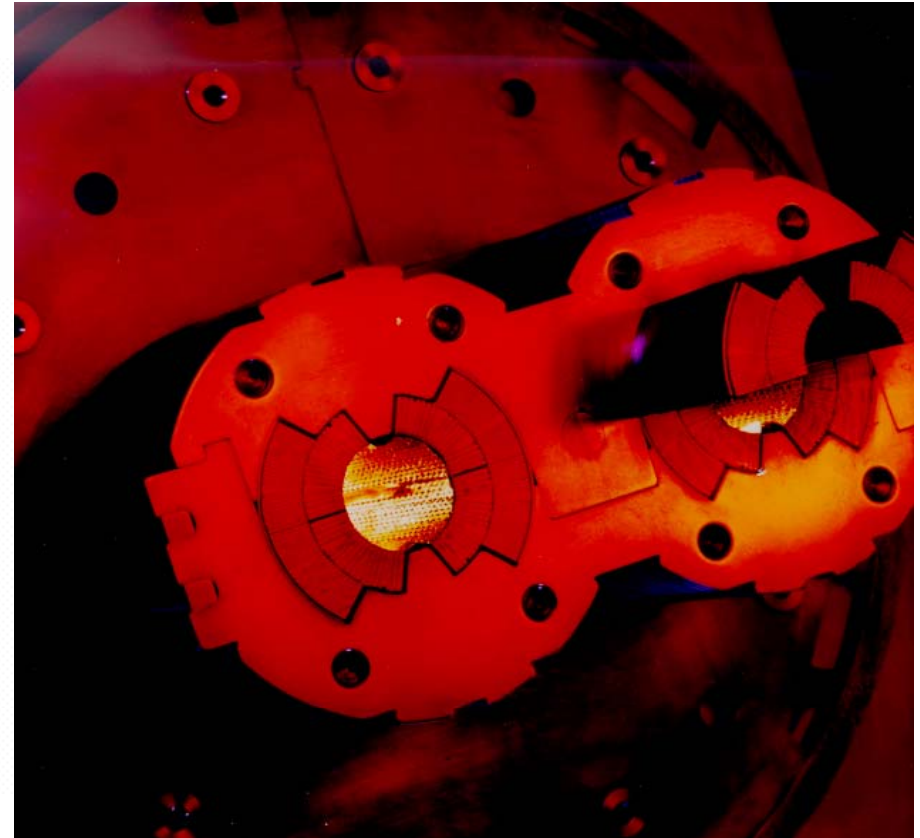
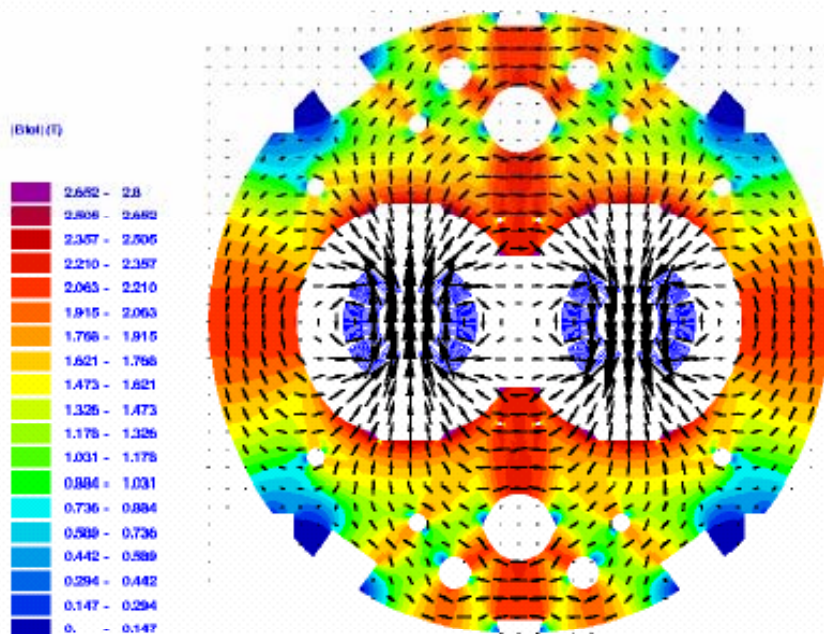
7000 km de câbles supraconducteurs



	Inner Cable	Outer Cable
Number of strands	28	36
Strand diameter	1.065 mm	0.825 mm
Filament diameter	7 μm	6 μm
Number of filaments	~ 8900	~ 6520
Cable width	15.1 mm	15.1 mm
Mid-thickness	1.900 mm	1.480 mm
Keystone angle	1.25 °	0.90 °
Transposition length	115 mm	100 mm
Ratio Cu/Sc	≥ 1.6	≥ 1.9



Précision et production industrielle



Précision du champ $\sim 10^{-3}$

Homogénéité du champ $\sim 10^{-4}$

⇒ Précision du bobinage < 0.05 mm

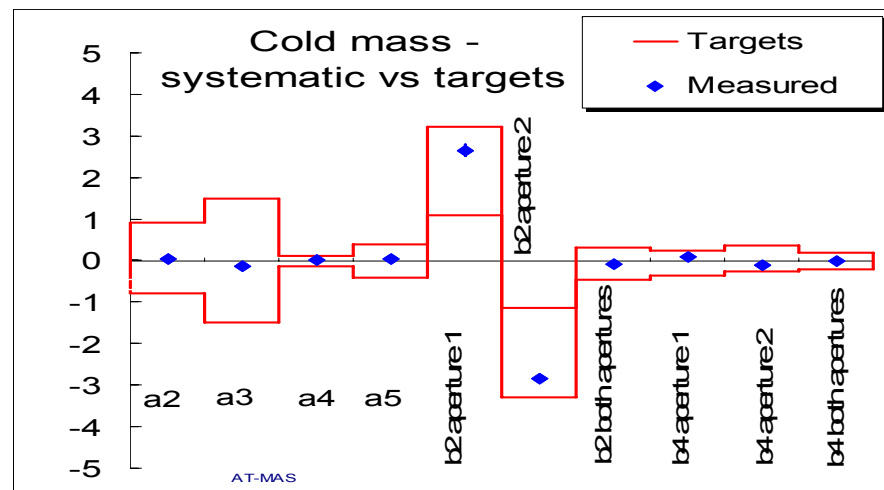
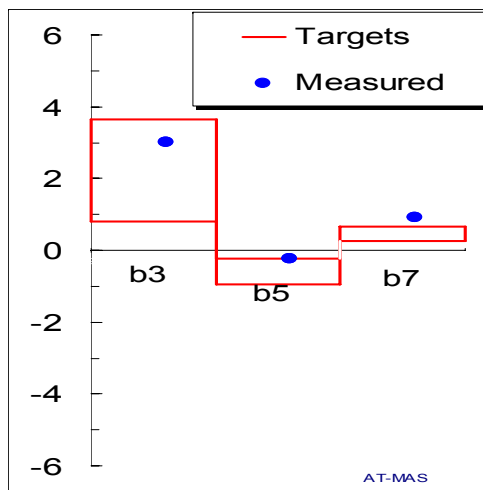
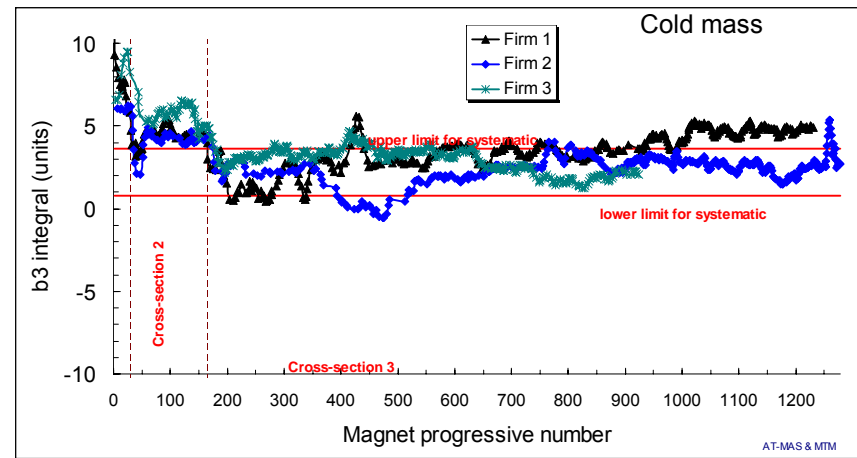
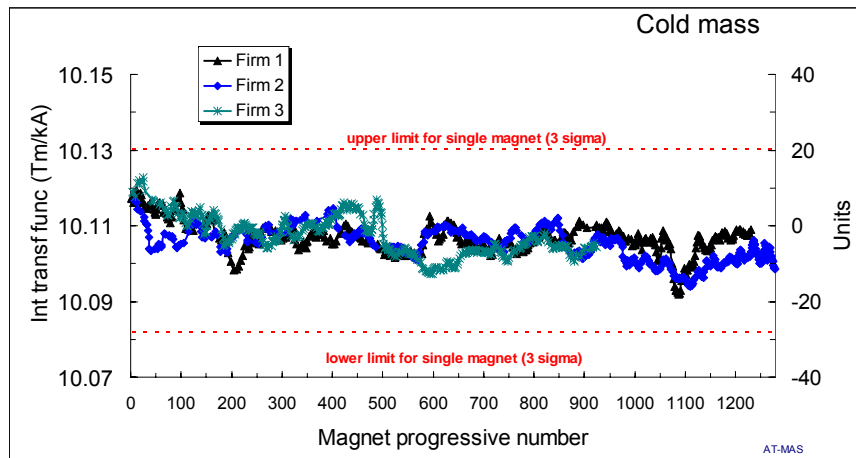


Mesures de série des aimants à froid



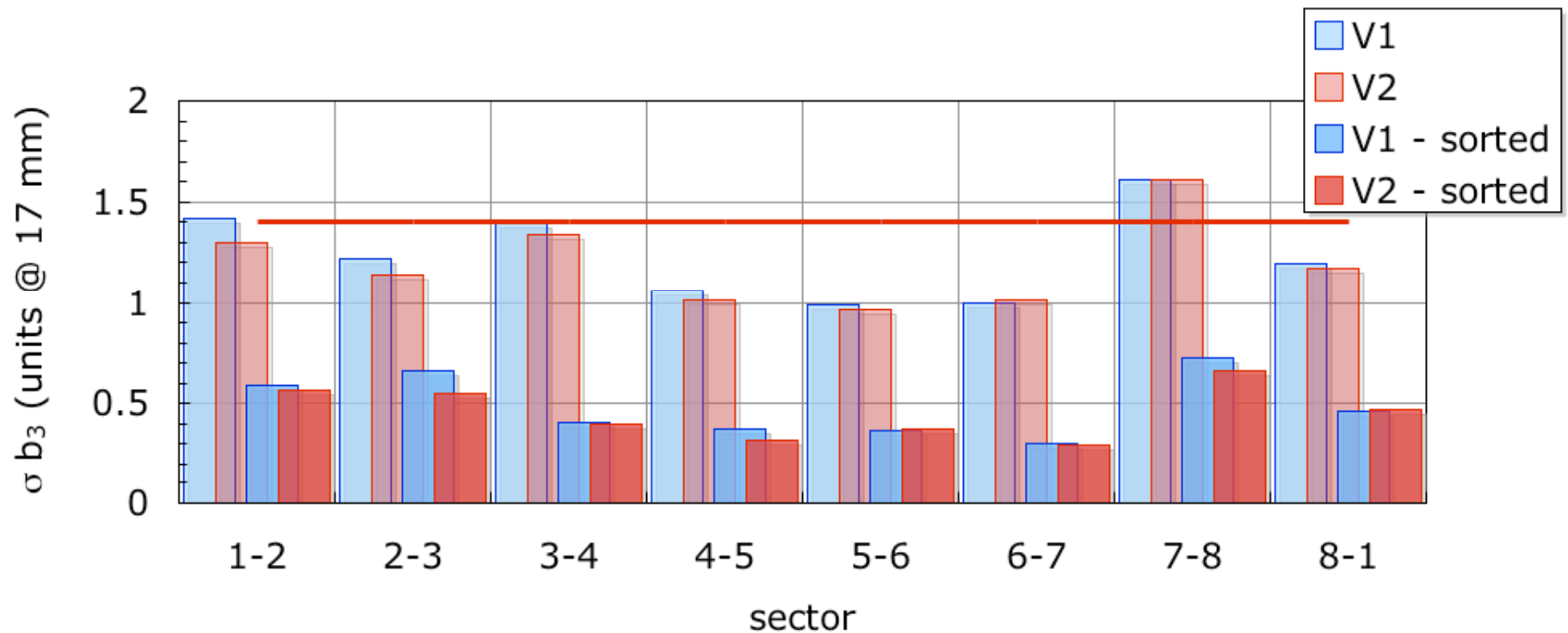


Contrôle de qualité de la production de série





Réduction de dispersion par tri avant installation



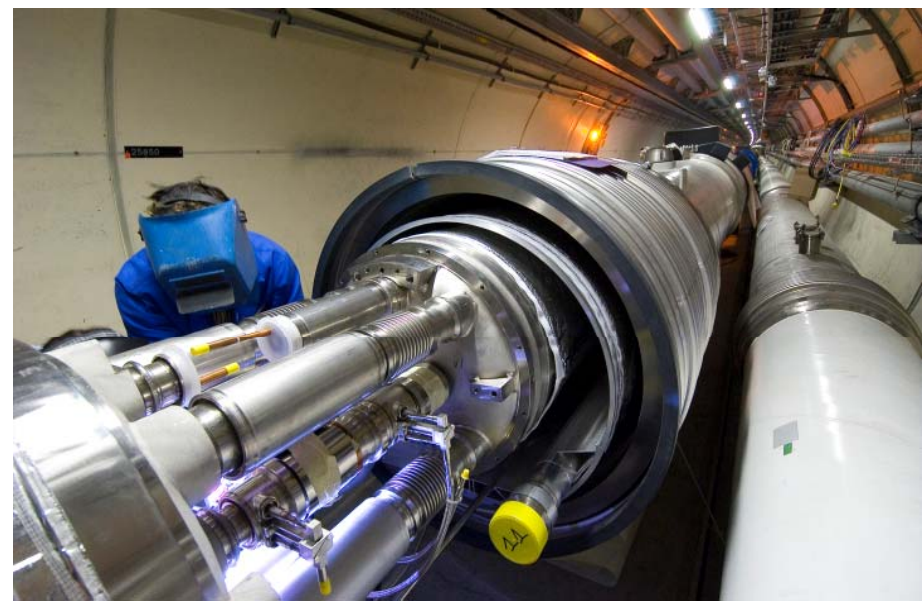


Les interconnexions dans le tunnel: cadences, logistique, qualité

65'000 jonctions électriques

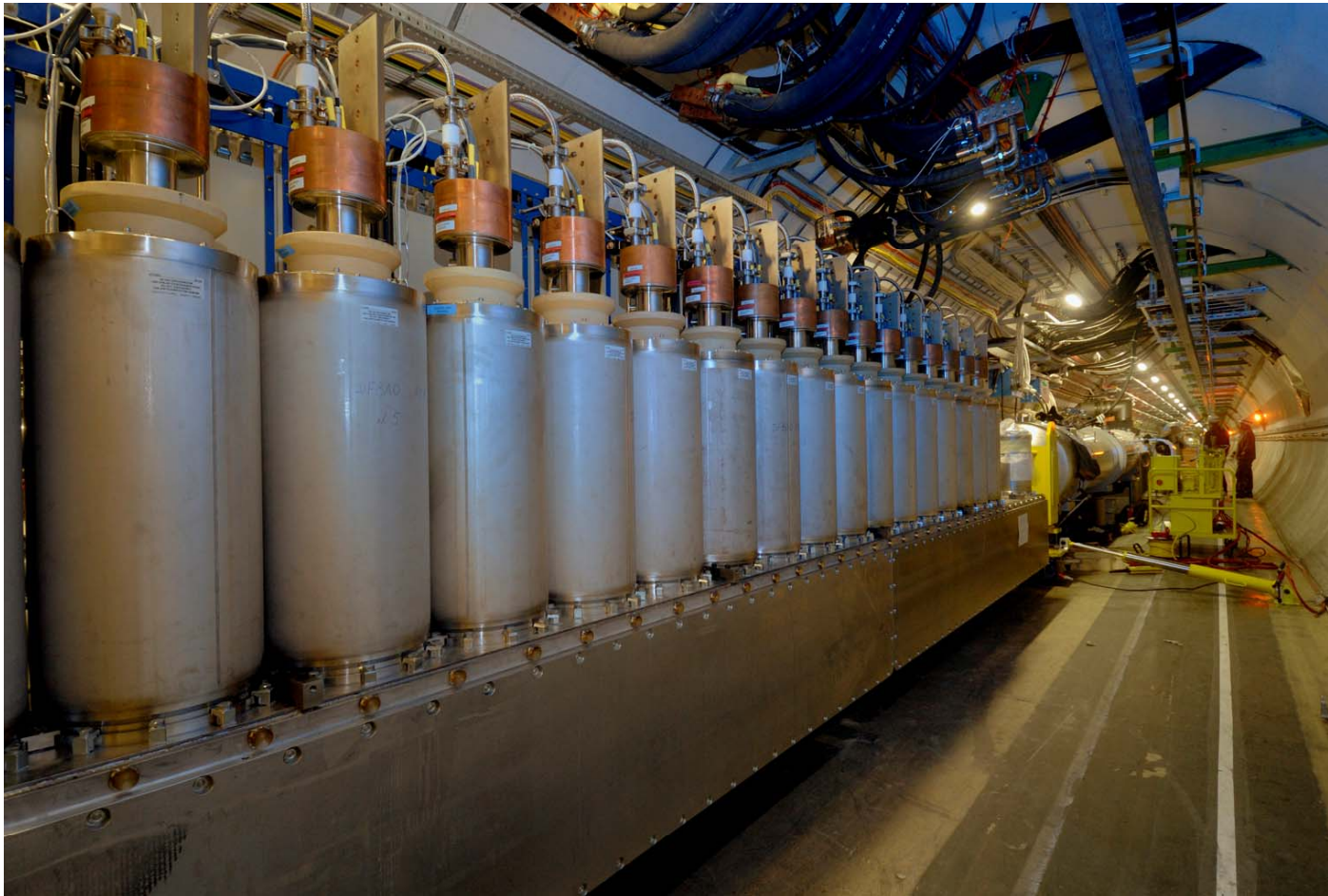


40'000 jonctions cryogéniques



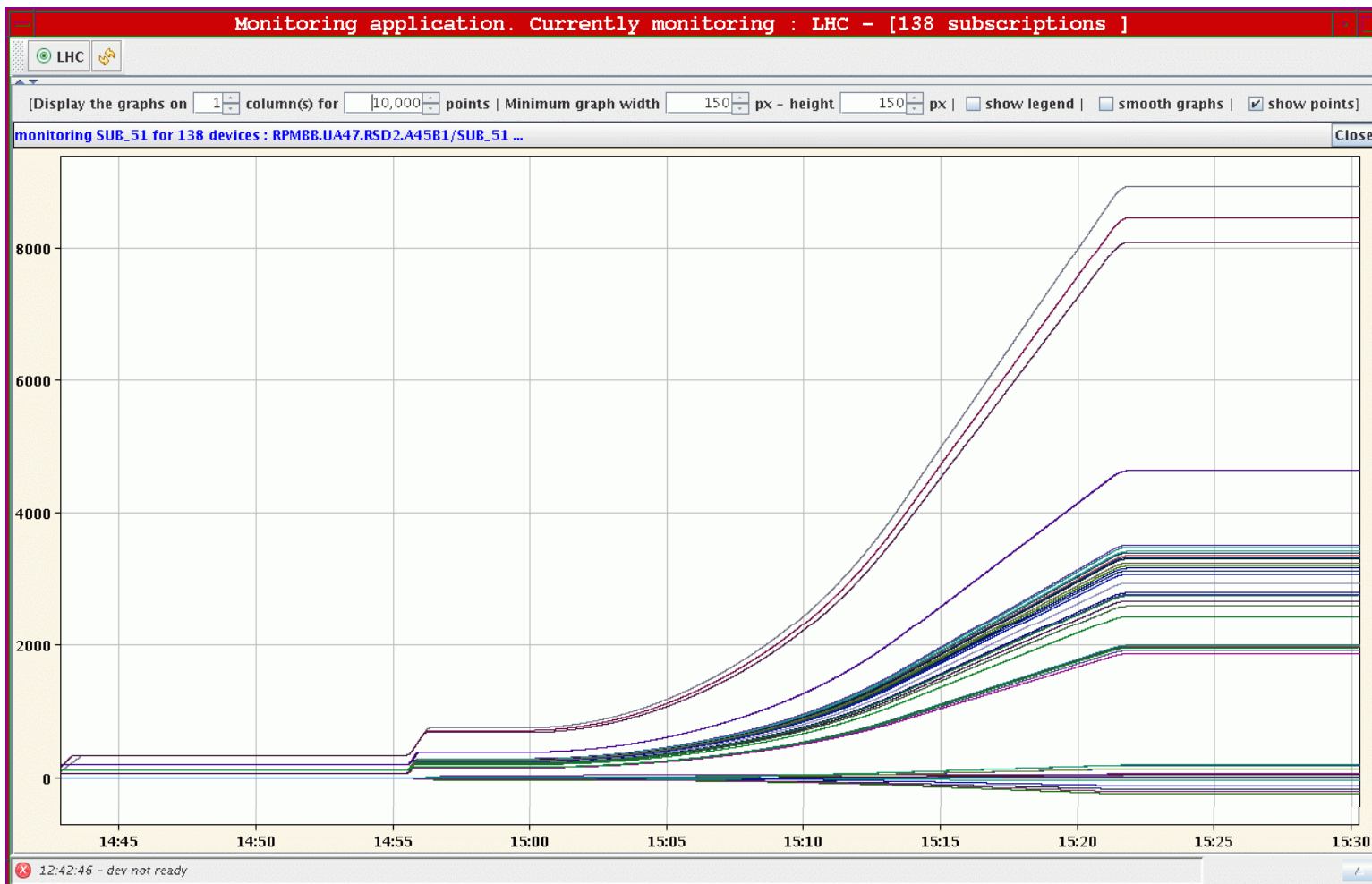


**1200 amenées de courant du LHC (600 A à 12 kA)
utilisant des supraconducteurs à « haute » température**



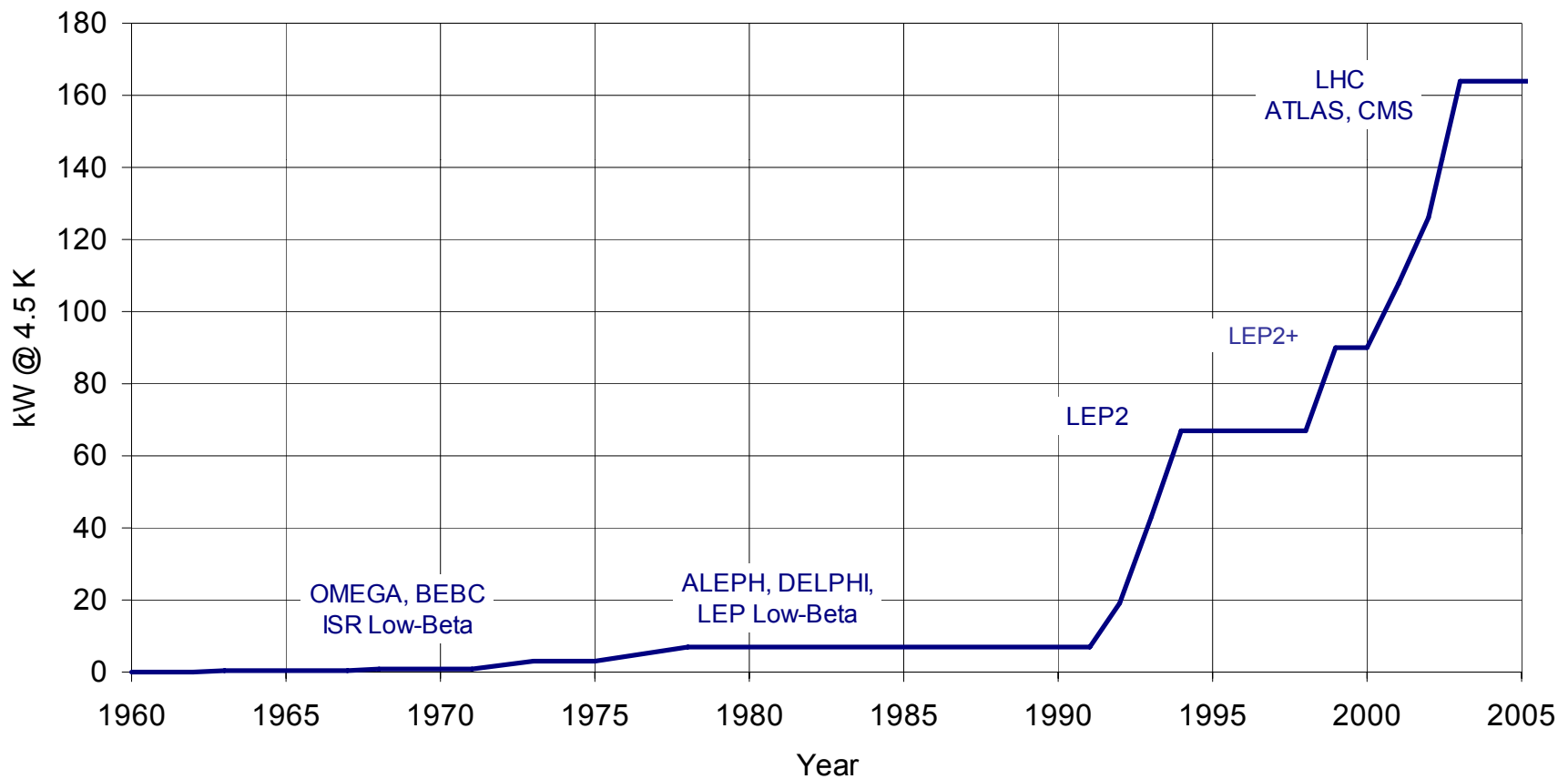


Rampe de courant simultanée des aimants à 5,3 TeV





Puissance cryogénique installée au CERN





8 réfrigérateurs d'hélium 18 kW @ 4.5 K

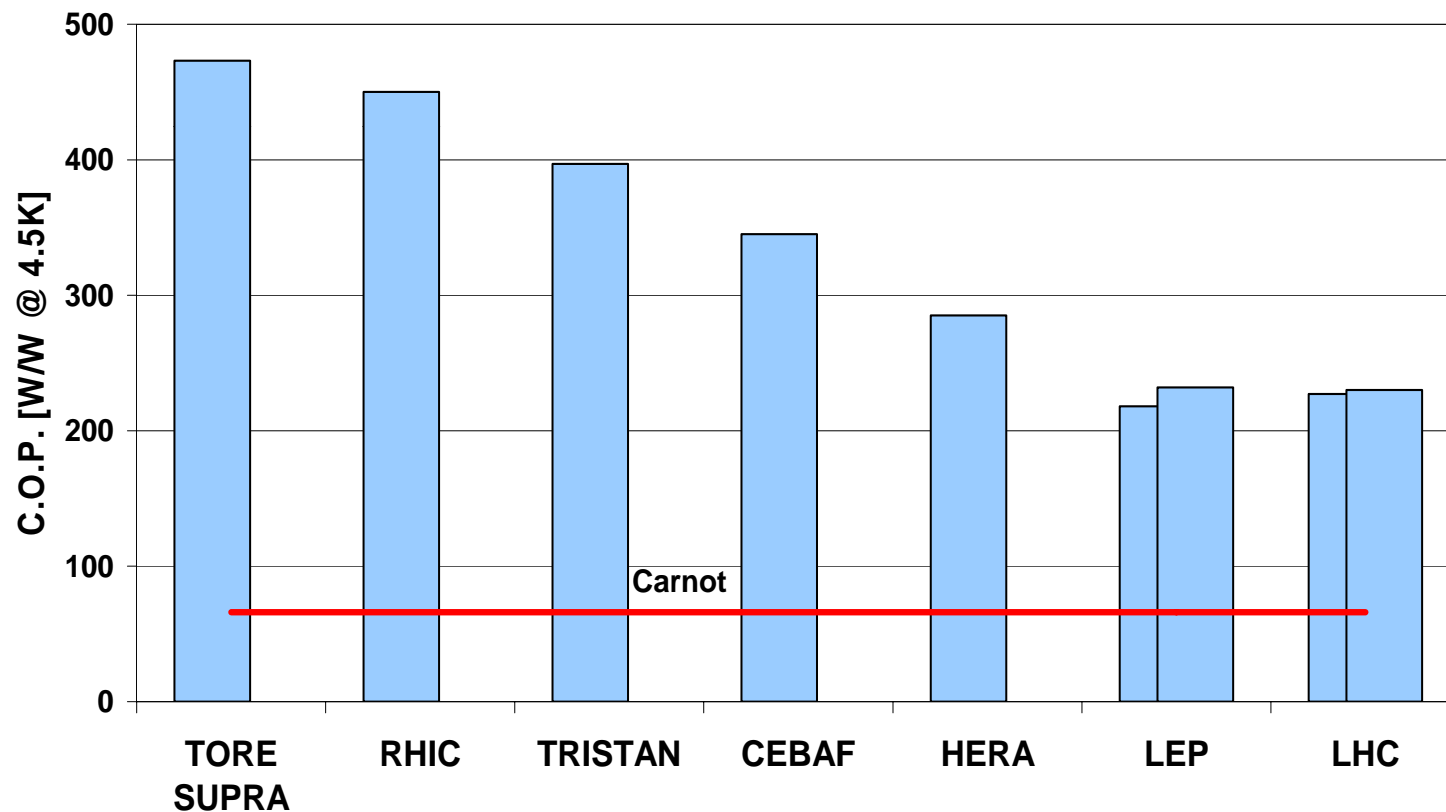


33 kW @ 50 K to 75 K
23 kW @ 4.6 K to 20 K
41 g/s liquefaction



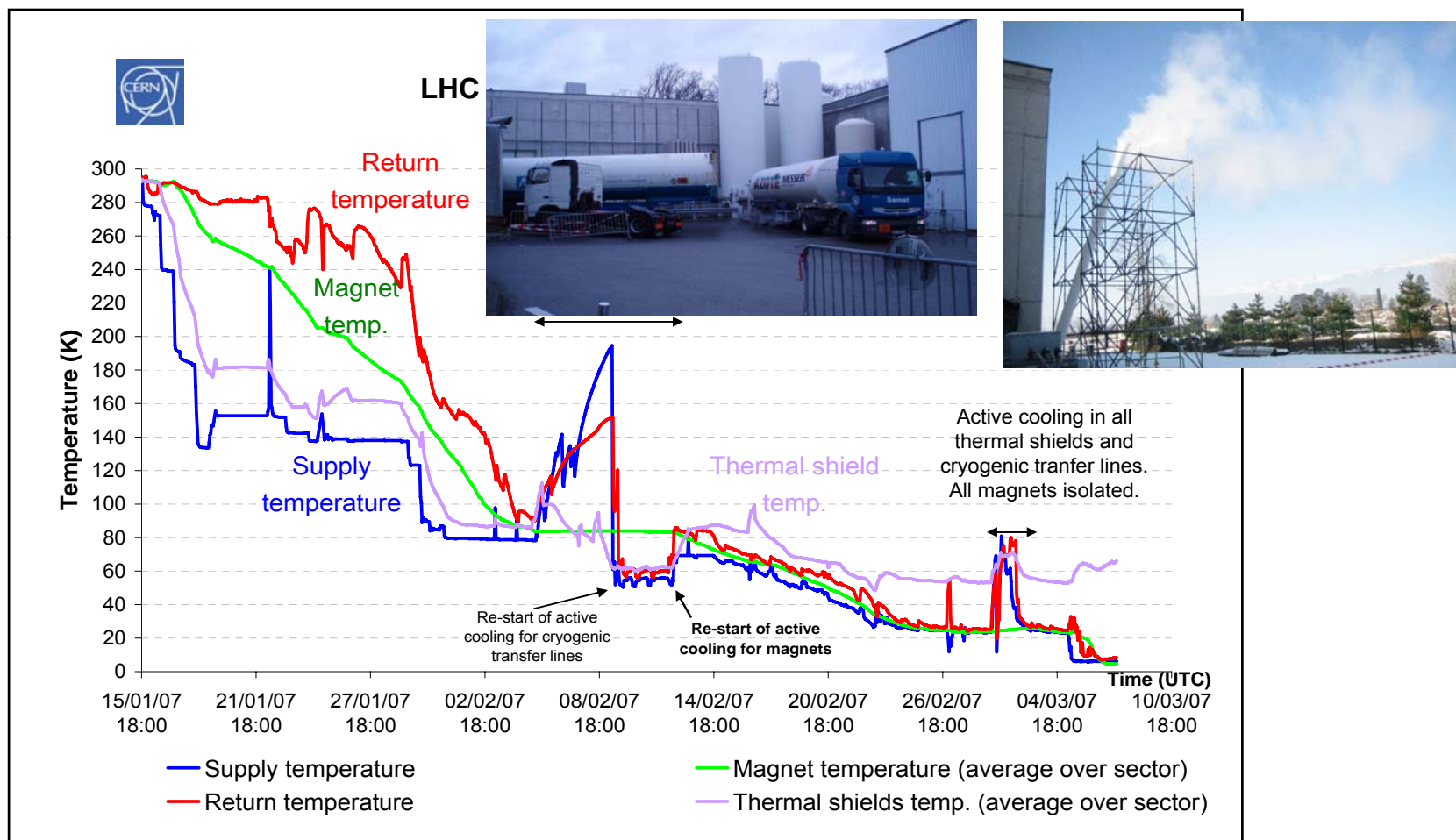


Consommation spécifique des grands réfrigérateurs cryogéniques à 4,5 K



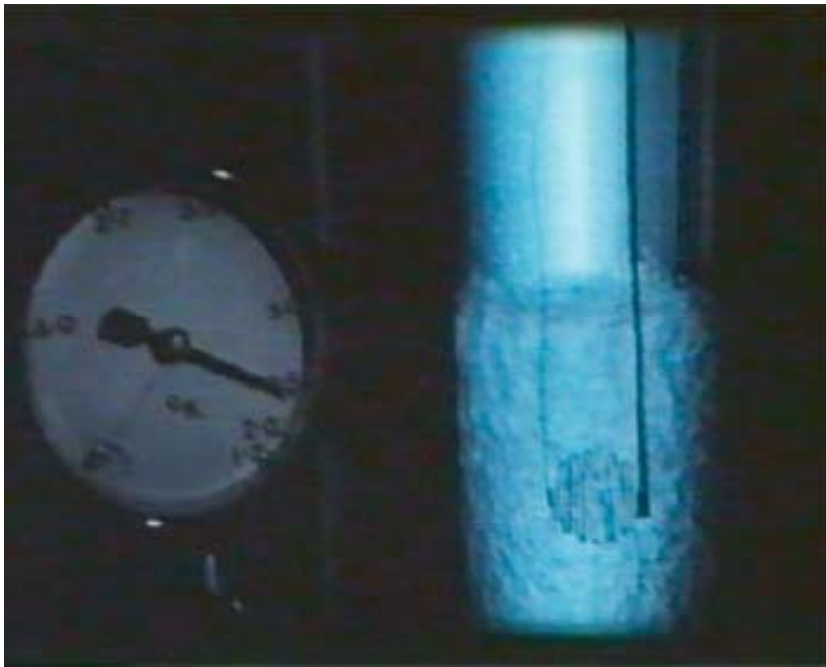


Mise en froid d'un secteur du LHC (4625 t; 3,3 km)

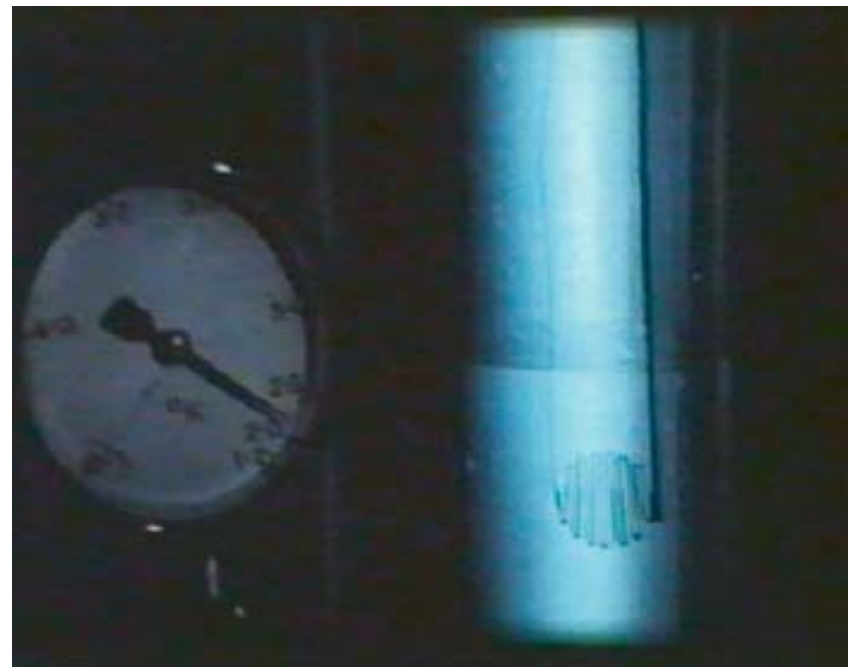




L'hélium superfluide, un caloporteur de choix



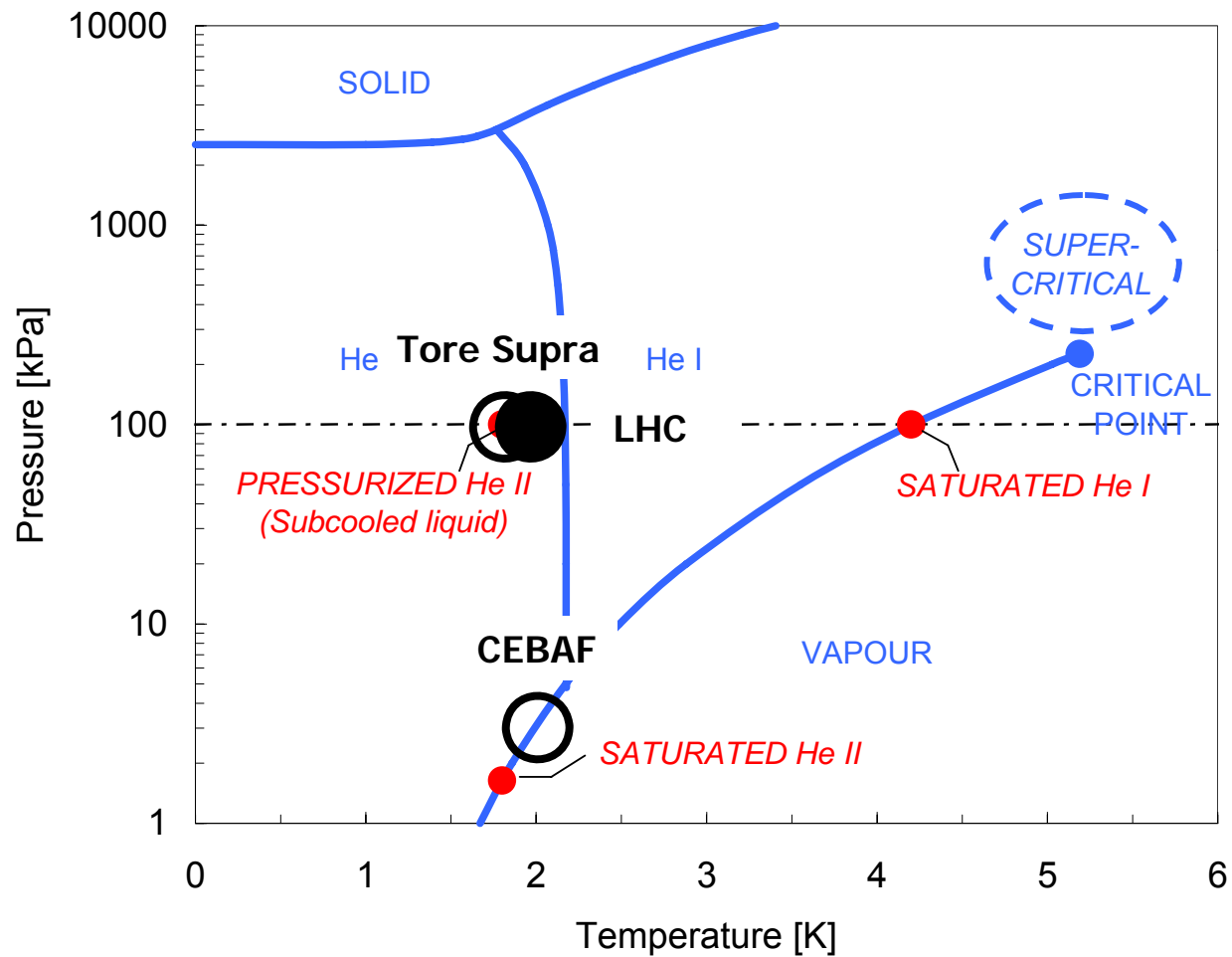
He I (T=2,4 K)



He II (T=2,1 K)



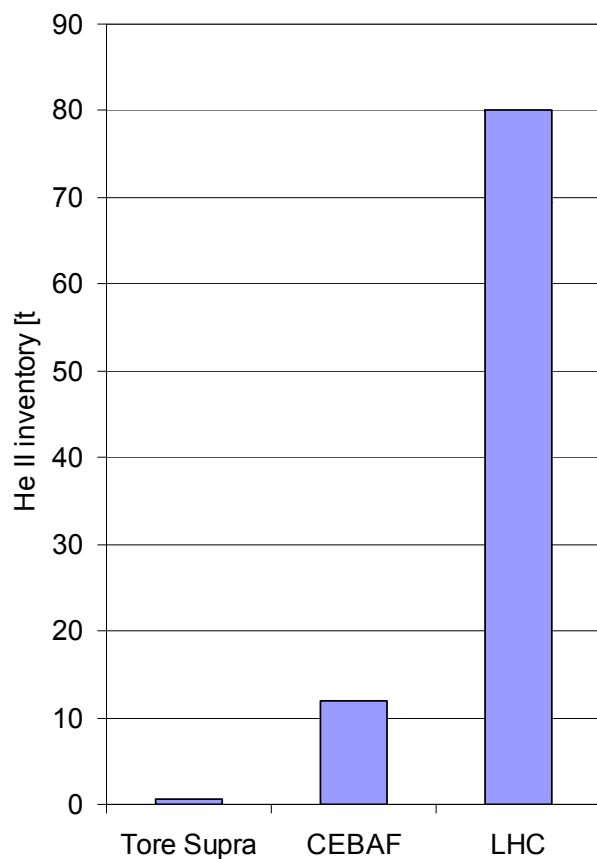
Principes de refroidissement à l'hélium II



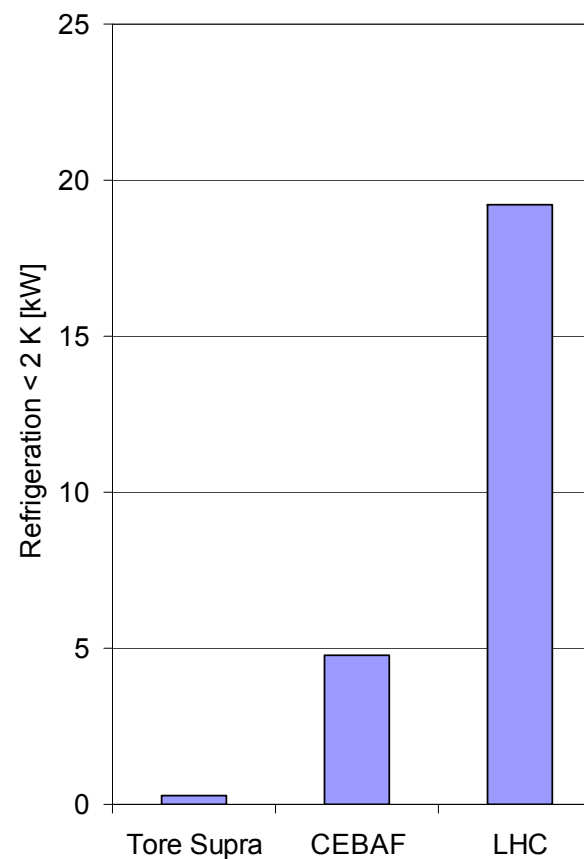


L'hélium II à grande échelle

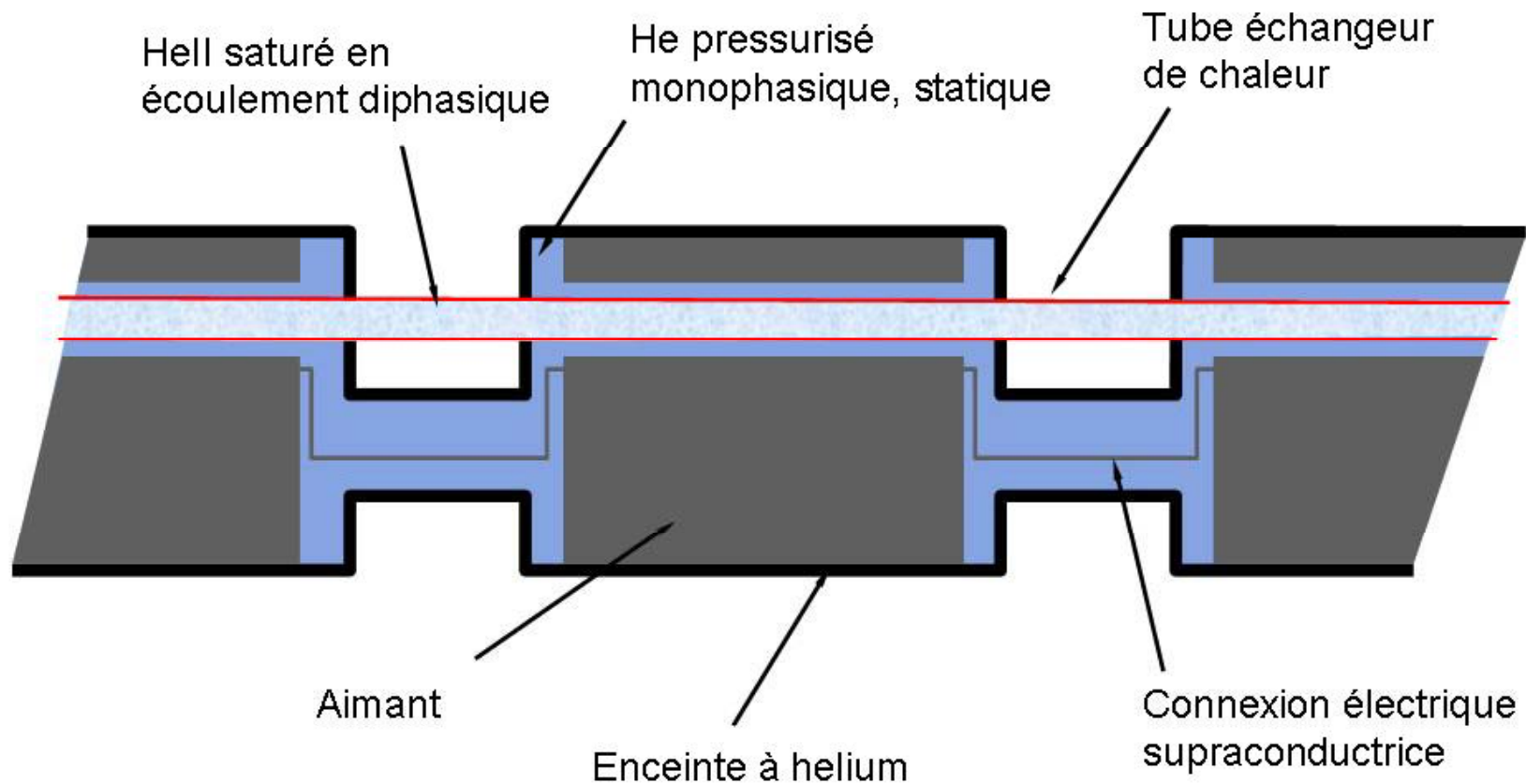
Masse d'He II



Puissance de réfrigération

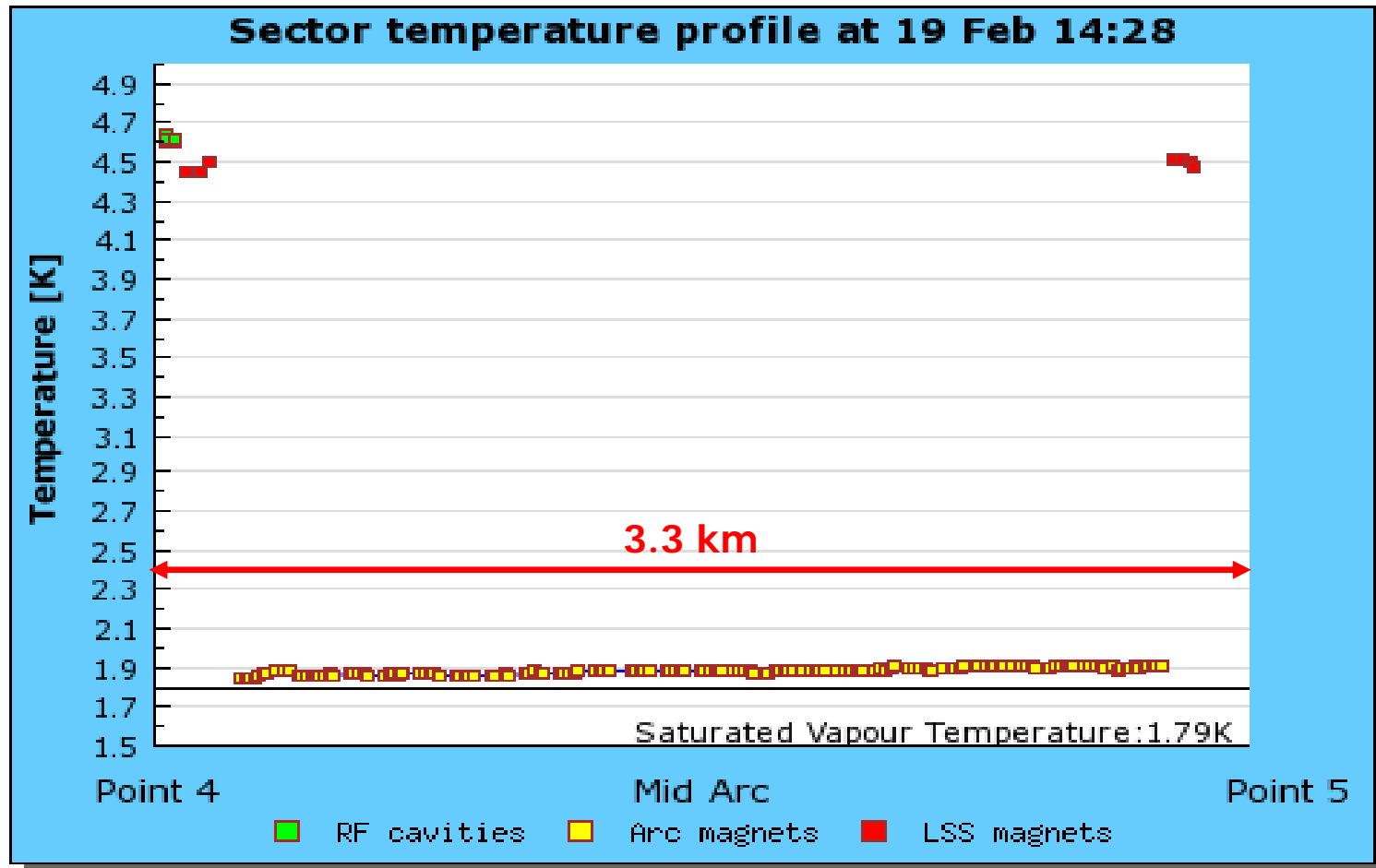


Principe de refroidissement à l'hélium II des aimants du LHC

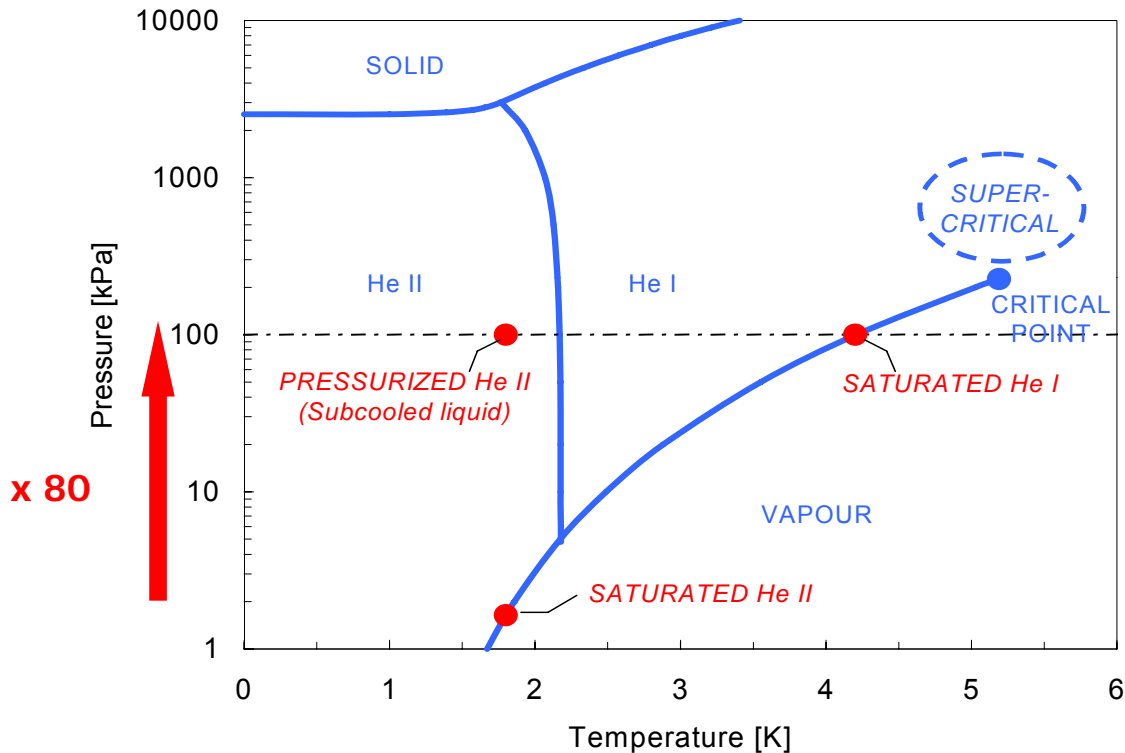




Profil thermique d'un secteur du LHC (3,3 km)



Défis de la réfrigération de puissance à 1,8 K



- Compression de grands débits à basse pression \Rightarrow compresseurs « froids »
- Machinerie à froid, non-lubrifiée et sans contact \Rightarrow compresseurs hydrodynamiques
- Chaleur de compression rejetée à basse température \Rightarrow requiert bon rendement thermodynamique

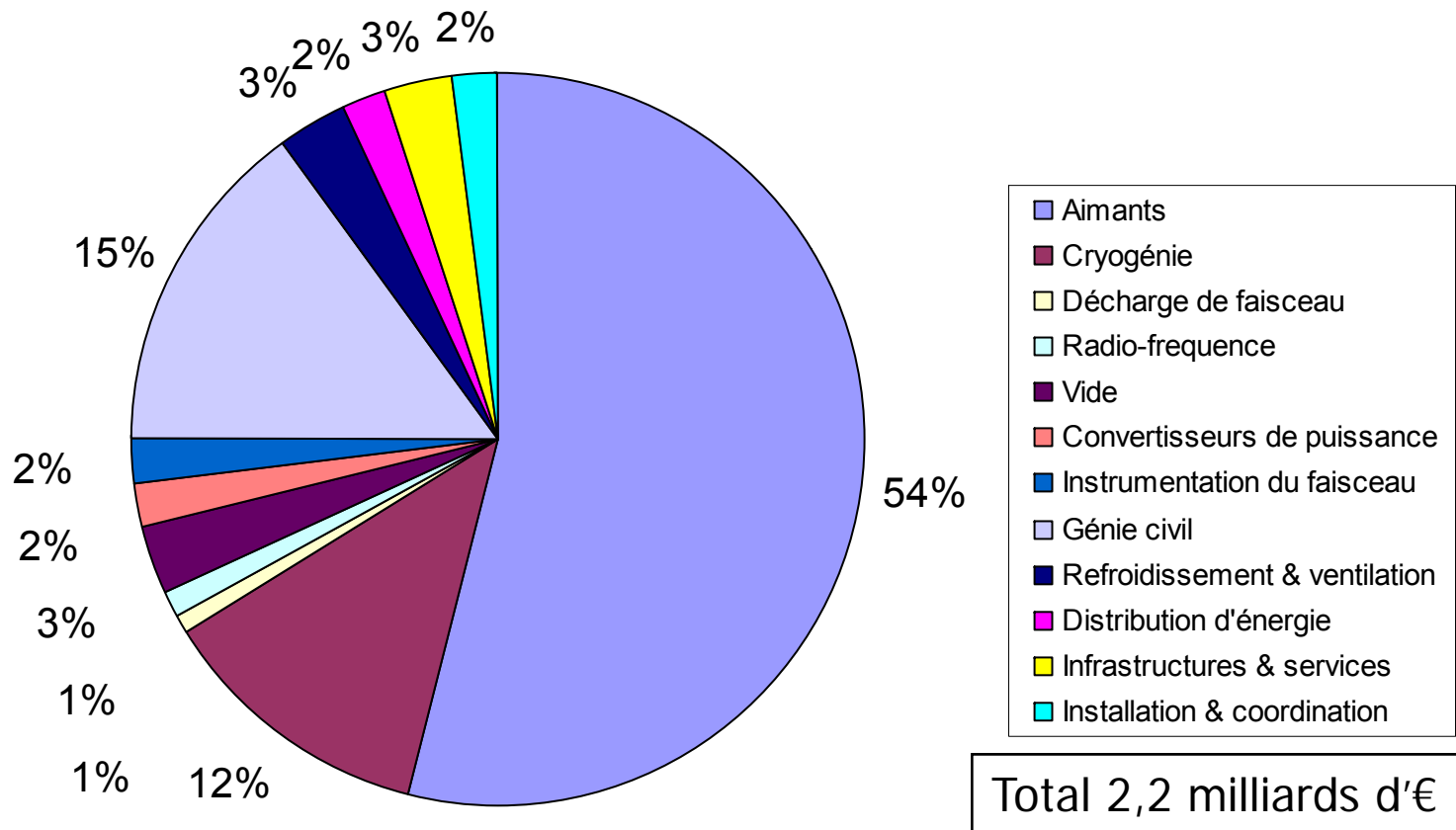


Plan

- Maîtriser l'espace et le temps



Répartition des coûts de l'accélérateur LHC





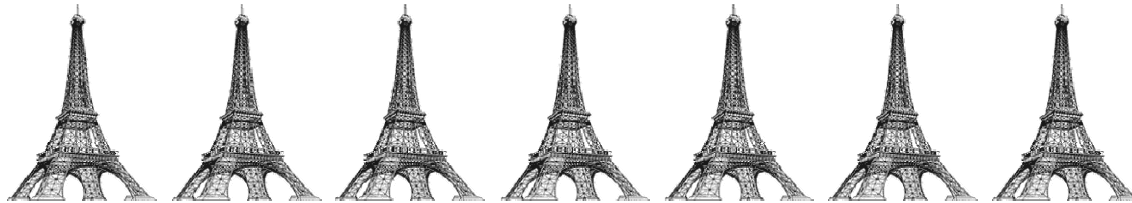
Une centaine de contrats industriels



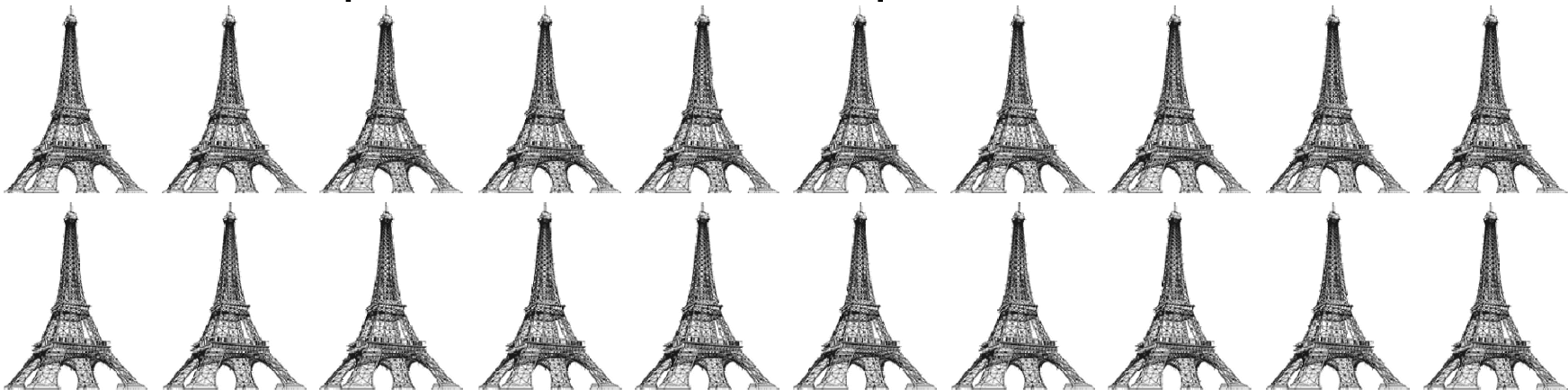


Organisation et logistique

Installé dans le tunnel: 50 000 t

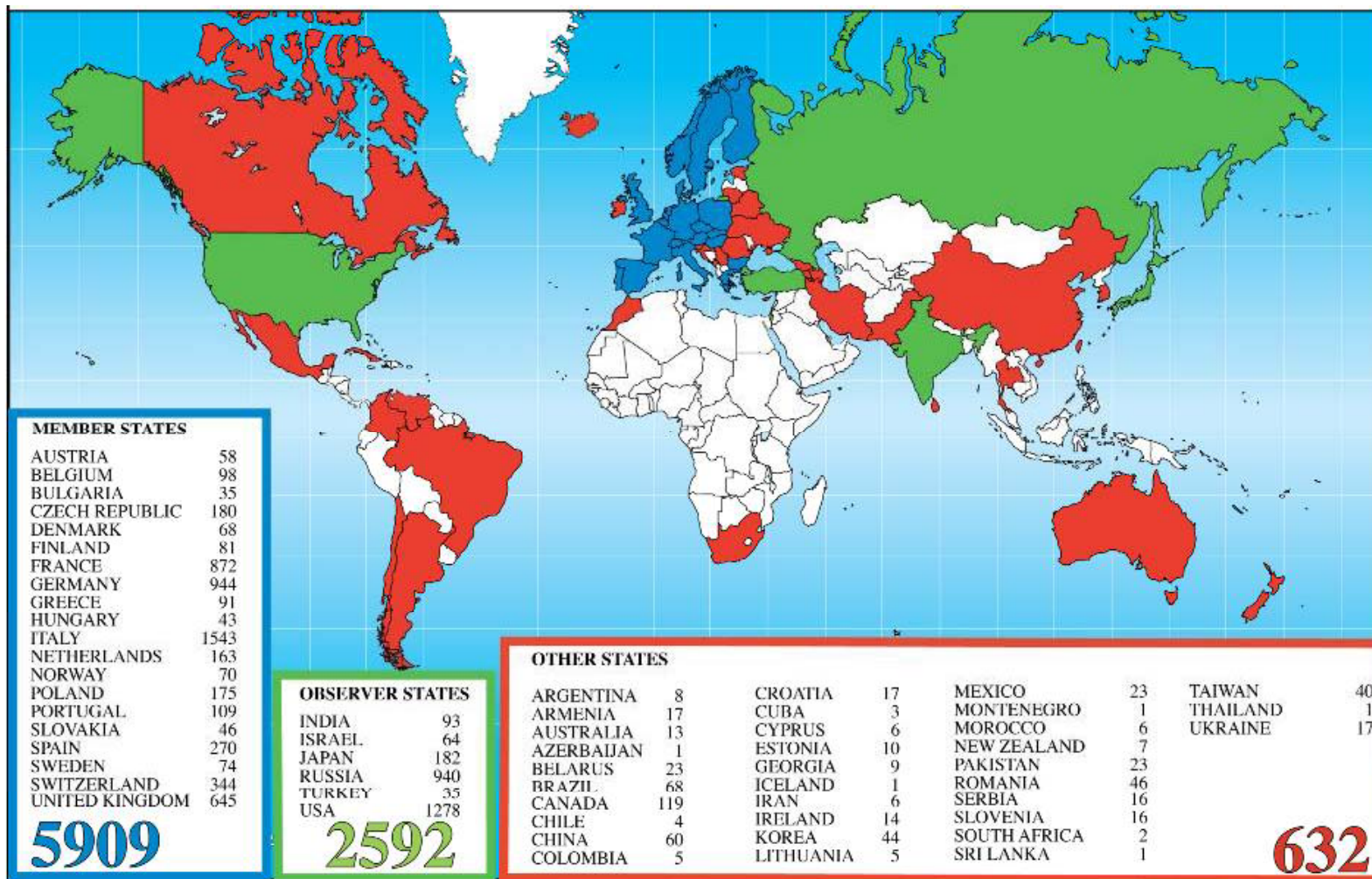


Transporté à travers l'Europe: ~150 000 t



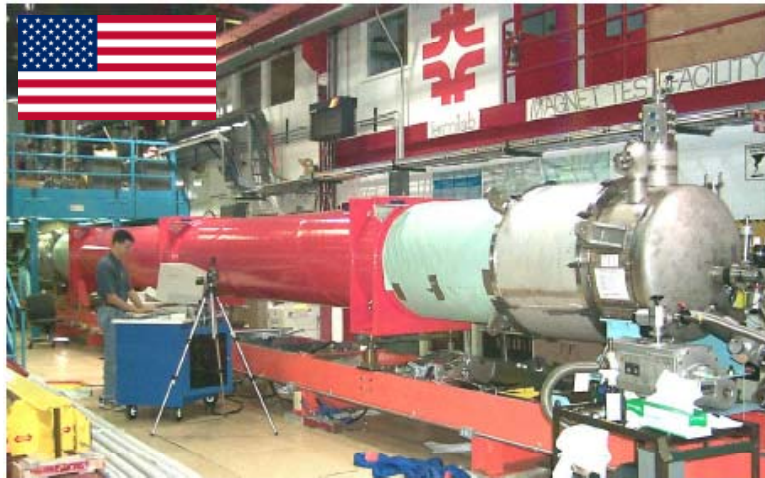
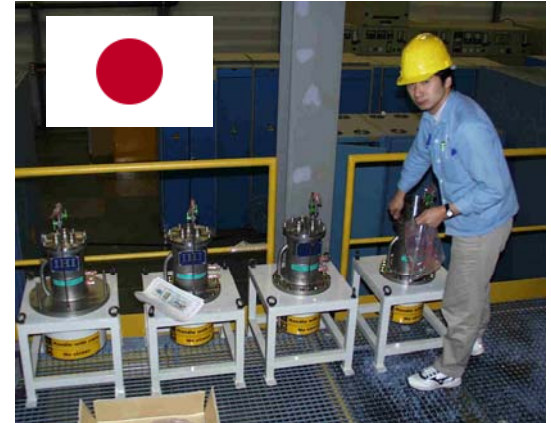


Le CERN sert la communauté mondiale des physiciens





Un projet global





Le travail d'un demi-siècle

- Etudes conceptuelles préliminaires 1984
- Premiers modèles d'aimants (faisabilité) 1988
- Programme structuré de R&D 1990
- Approbation par le Conseil du CERN 1994
- Industrialisation des productions de série 1996-1999
- DUP & début du génie civil 1998
- Passation des principaux marchés 1998-2001
- Début de l'installation dans le tunnel 2003
- Installation des aimants dans le tunnel 2005-2007
- Test fonctionnel du premier secteur 2007
- Exploitation pour la physique 2008-2030



Gestion de projet informatisée et documentation accessible par le WWW, toujours et partout

The screenshot displays the EDMS Web Navigator interface in Microsoft Internet Explorer. The main window shows a tree view of the 'LHC Hardware Baseline' project, with 'Cryo Magnets in Common Arc Cryostats' selected. A secondary window shows 'Drawing Information' for a specific drawing, including a technical drawing of a magnet assembly and a table of dimensions.

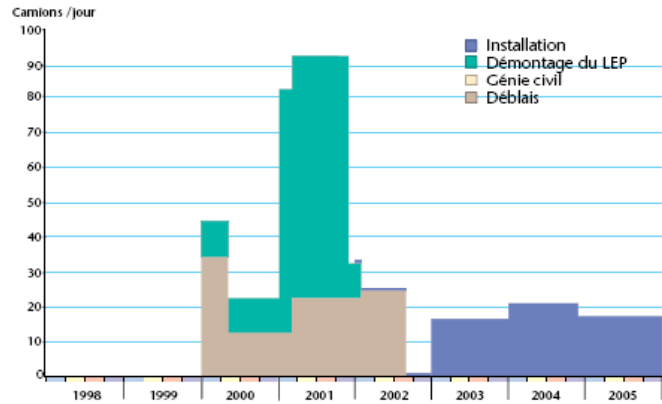
DIMENSIONS (mm)				
NO	BY	PL	RS	RL
1	AF	RS	RS	RS
2	AF	RS	RS	RS
3	AF	RS	RS	RS
4	AF	RS	RS	RS



Plan

- Science, technologie et société

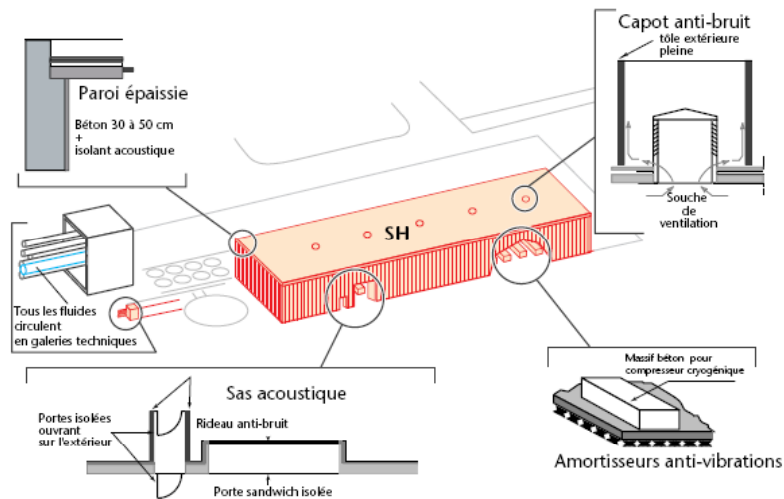
Préserver l'environnement et le voisinage



Trafic LHC sur la RD 984 entre le rond-point et la route VC 5 de Prévessin



Vue du Point 5 côté village : de la phase 1 ...



e 8.7

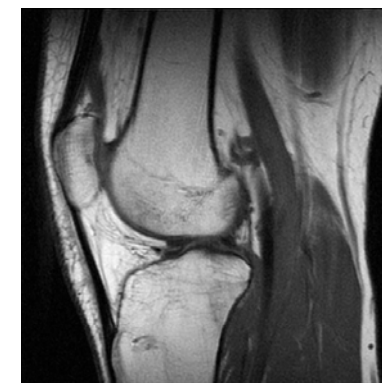
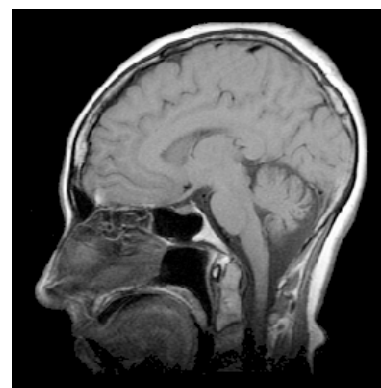
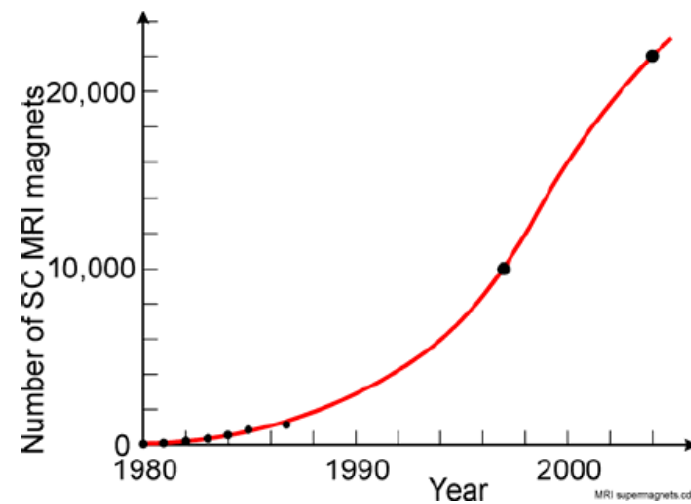
Isolation phonique des bâtiments de type SH

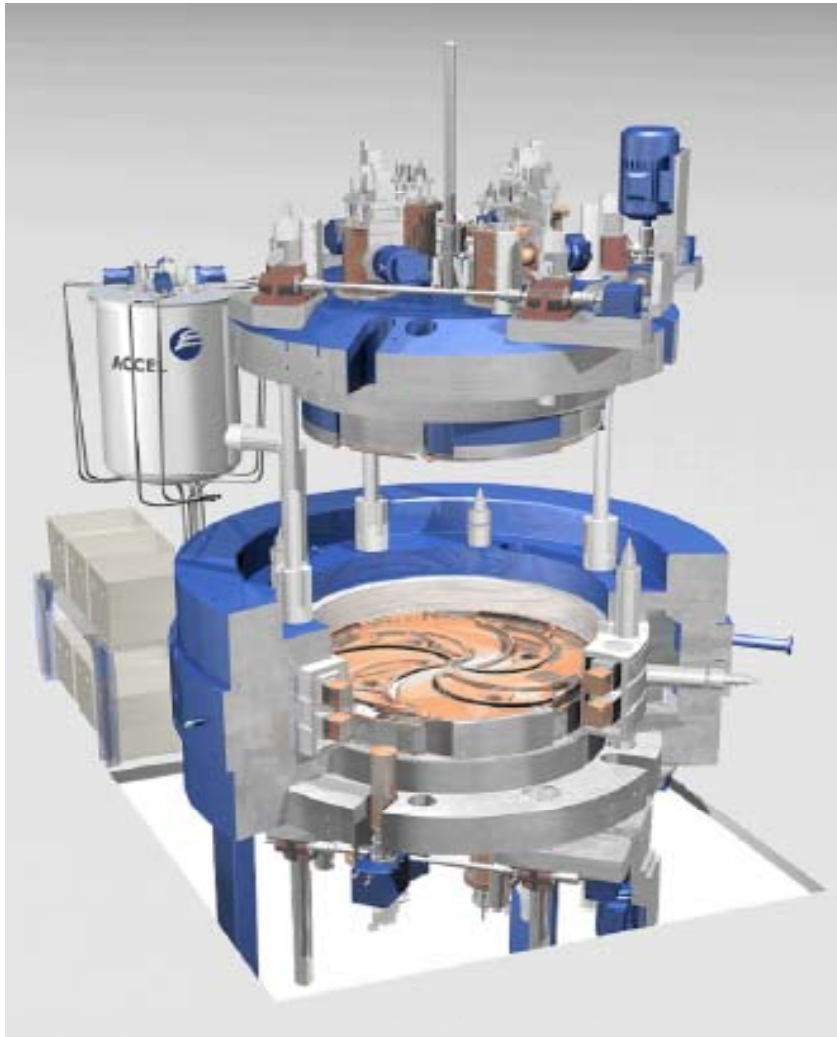


Vue du Point 5 côté village : ... à la phase 2



L'IRM, la supraconductivité au service de la santé

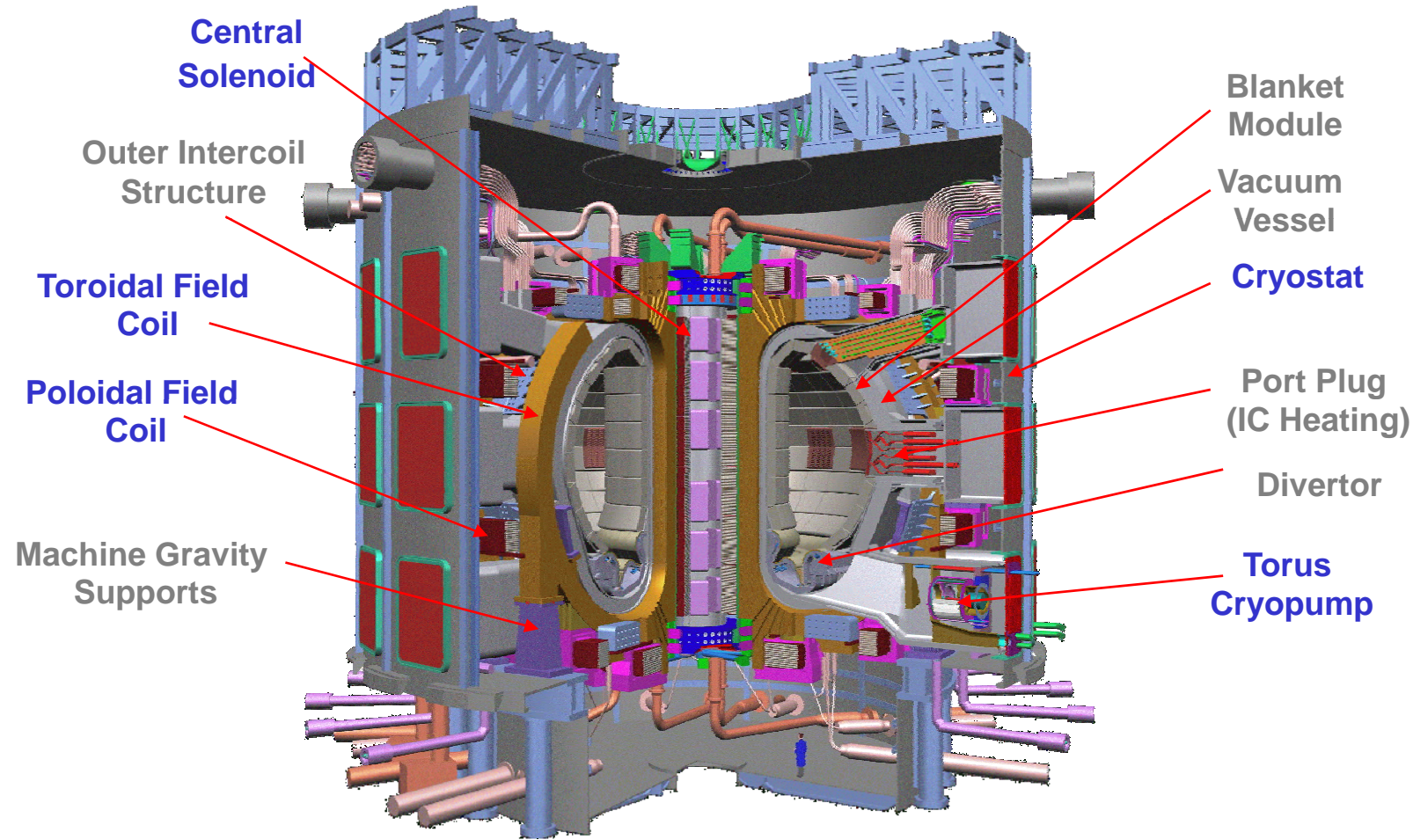




**Synchrotron
supraconducteur de
250 MeV pour
hadronthérapie
produit par l'industrie**



ITER partage les technologies-clés du LHC





Un investissement pour l'avenir

> 50 thèses de doctorat
> 120 mémoires de diplôme
en magnétisme,
cryogénie et
supraconductivité

Un premier emploi
qualifiant pour des
centaines de jeunes
ingénieurs et techniciens





Conclusion

- Le LHC, grand instrument de physique, est aussi un grand projet technologique basé sur la supraconductivité et la cryogénie
- Le LHC a stimulé le progrès et la formation dans ces domaines, à travers
 - des développements spécifiques conduits avec les centres d'expertise
 - le portage à l'échelle industrielle de technologies de laboratoire
- Les compétences développées et l'expérience acquise peuvent maintenant essaimer vers d'autres grands projets partageant ces technologies
- L'aventure technologique se termine, l'aventure scientifique et l'aventure humaine continuent!