

Un grand projet scientifique, le LHC

Organisation & gestion des risques

Ph. Lebrun

Département Technologies des Accélérateurs, CERN

Ecole IN2P3 de Conduite de Projets

Centre de l'Agelonde

11-17 Juin 2006

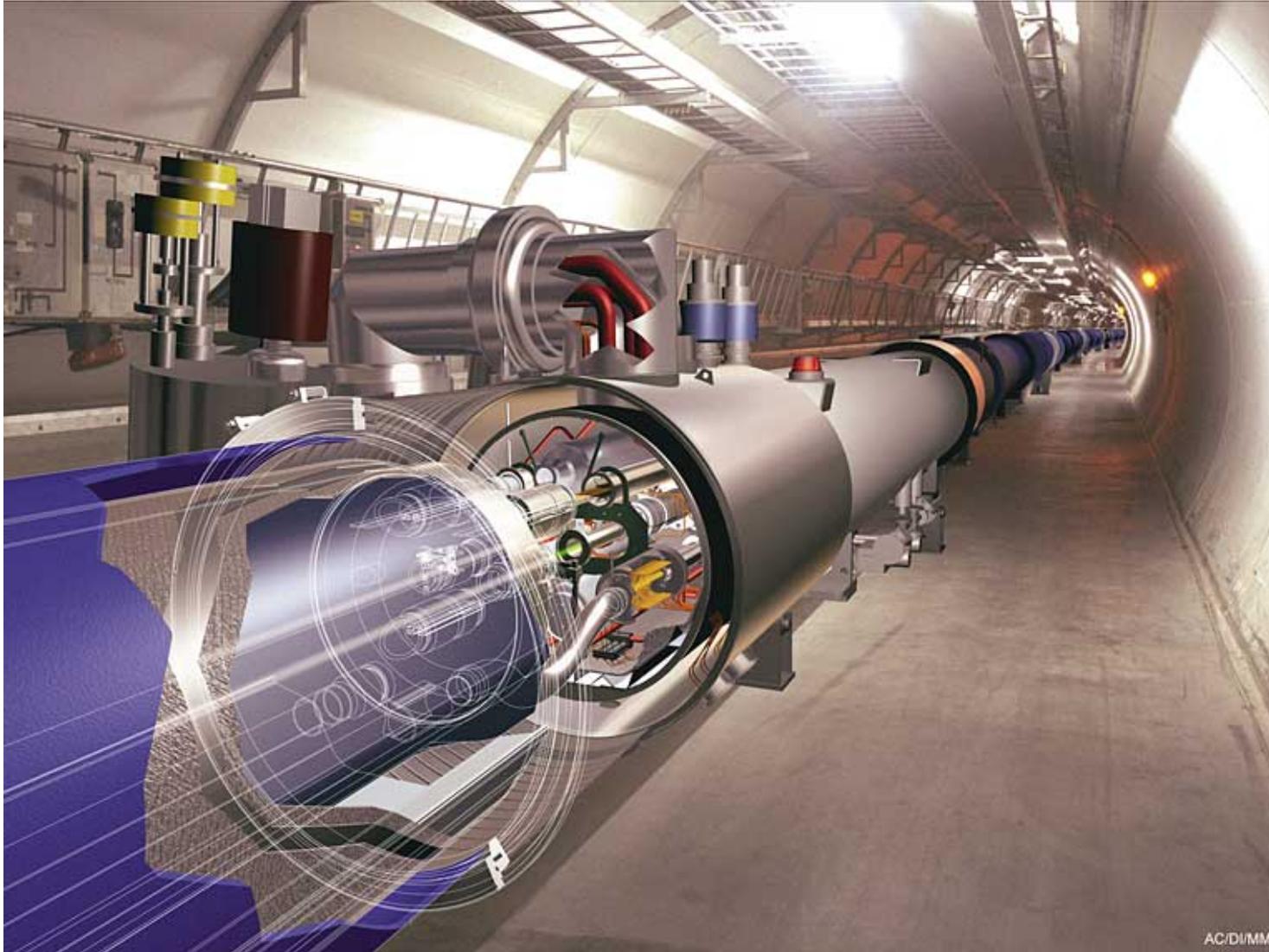
Plan

- Le LHC, un grand instrument scientifique basé sur une technologie avancée
- Un projet global dans un environnement local
- Organisation, décision, communication
- Éléments de gestion des risques
- Coefficients de sécurité et facteurs d'incertitude
- Méthodologies d'estimation des coûts
- Analyse probabiliste des risques de surcoûts

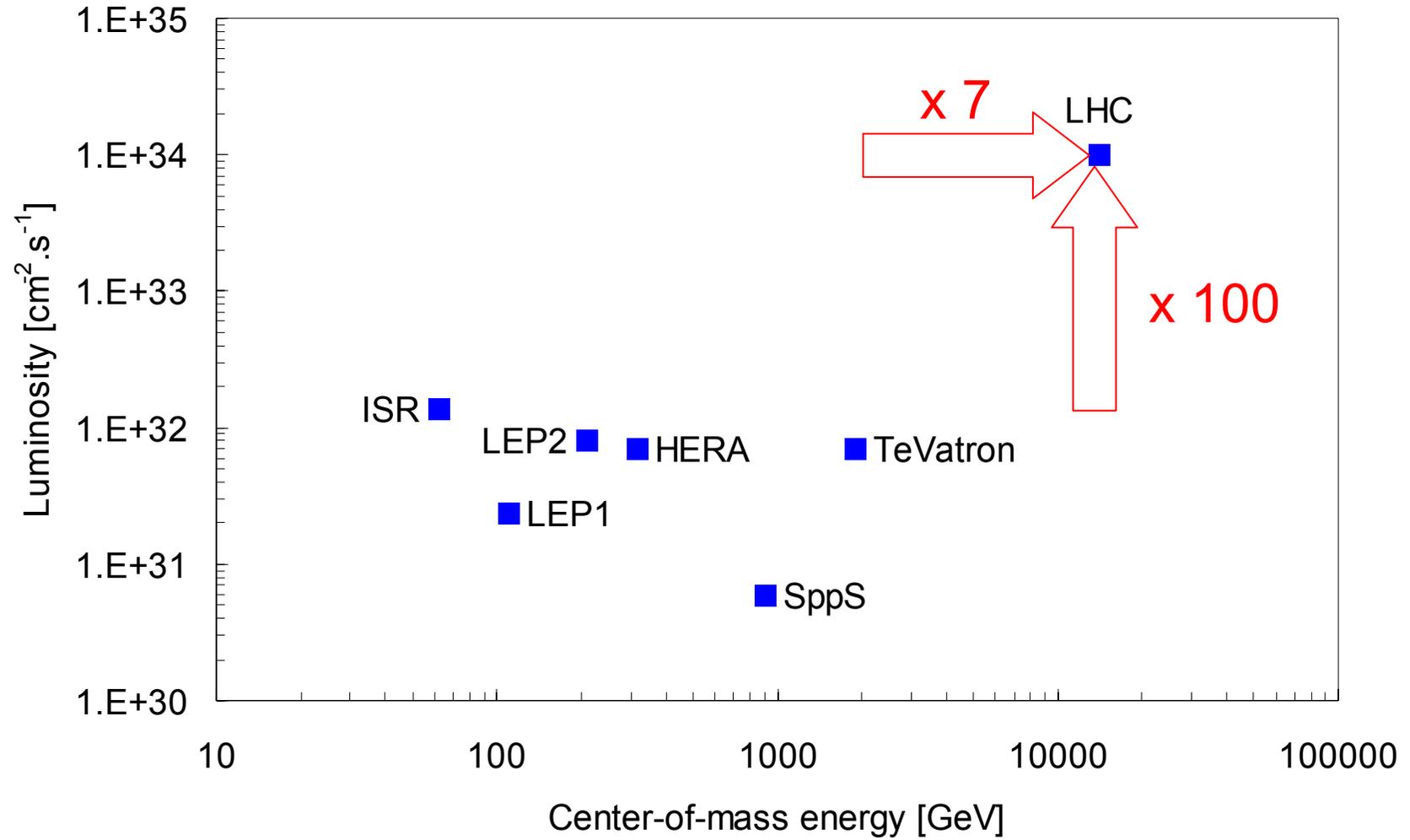
Un collisionneur de particules de 27 km...



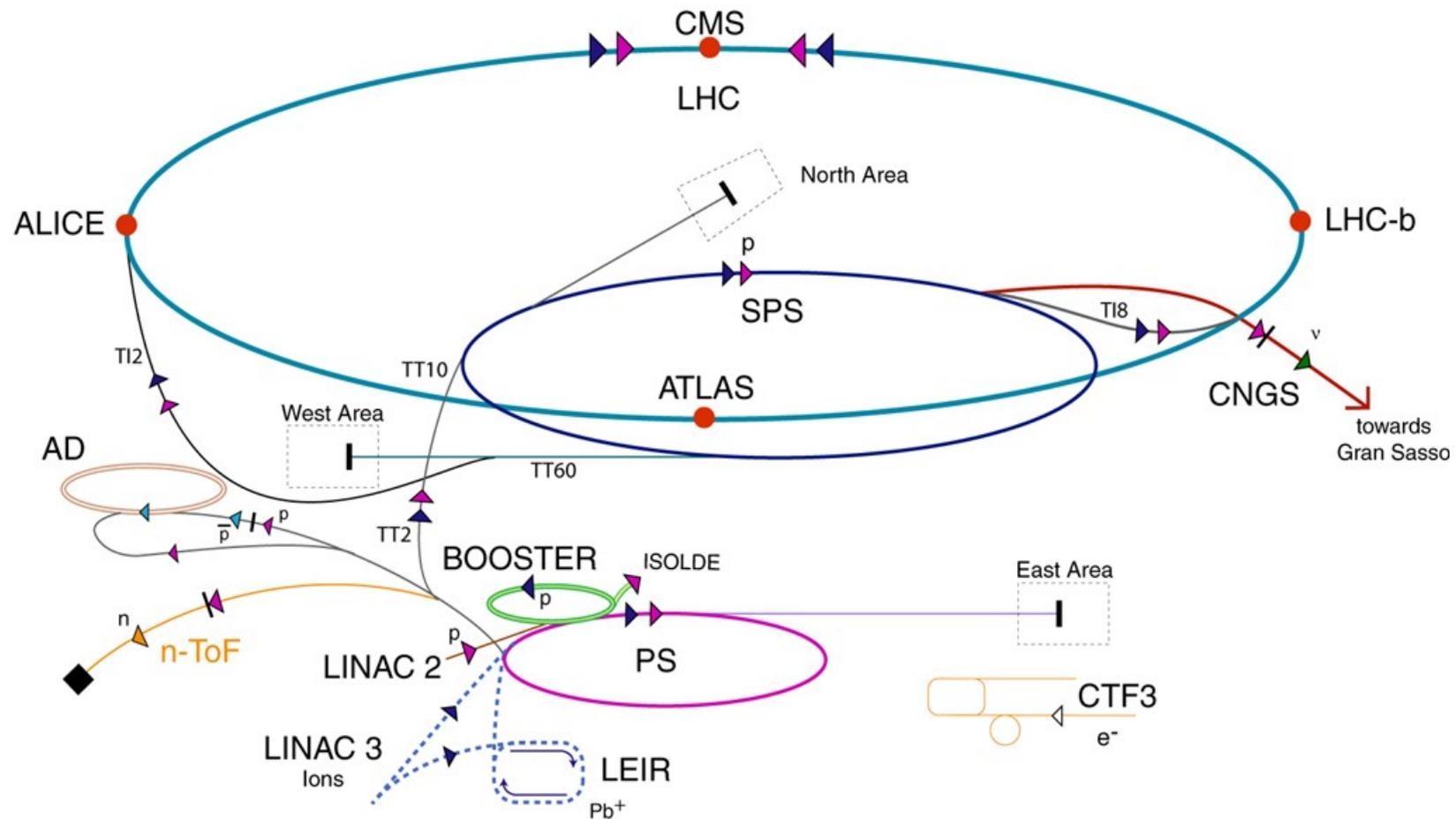
...constitué d'aimants supraconducteurs
refroidis à l'hélium superfluide



Luminosité & énergie des collisionneurs de particules



Réutilisation du complexe d'accélérateurs du CERN

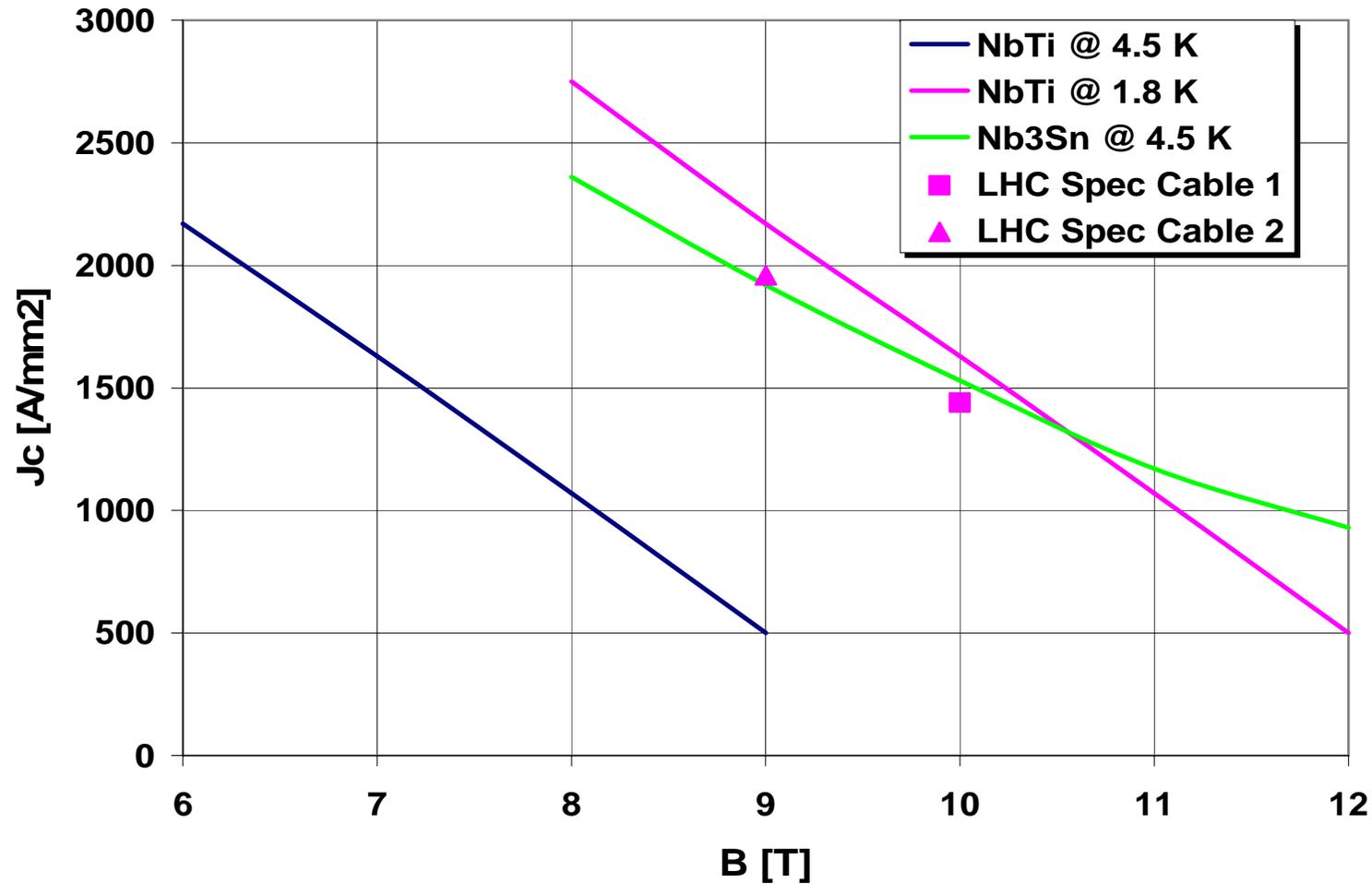


- | | | | |
|------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| ▶ protons | ▶ antiprotons | AD Antiproton Decelerator | LHC Large Hadron Collider |
| ▶ ions | ▶ electrons | PS Proton Synchrotron | n-ToF Neutron Time of Flight |
| ▶ neutrons | ▶ neutrinos | SPS Super Proton Synchrotron | CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso |
| | | | CTF3 CLIC Test Facility 3 |

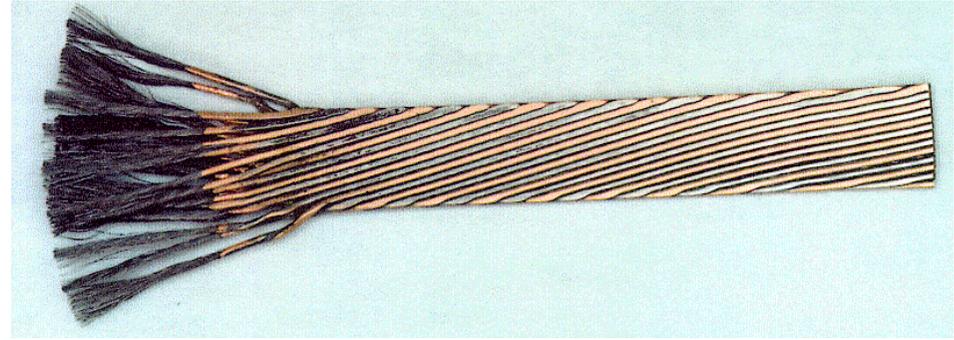
Technologies-clés du LHC

- Aimants supraconducteurs à champ élevé
 - 1250 t de supraconducteur Nb-Ti, 7000 km de câble Rutherford
 - Isolation électrique à caractéristiques mécaniques, thermiques et diélectriques contrôlées aux basses températures
 - Matériaux de structure aux propriétés mécaniques et magnétiques contrôlées aux basses températures
 - Techniques avancées de mesures et d'essais magnétiques
 - Alimentation & protection de dispositifs supraconducteurs
 - Amenées de courant utilisant des supraconducteurs à haute Tc
 - Convertisseurs de puissance de haute précision avec grande dynamique
- Cryogénie de puissance à l'hélium superfluide (< 2K)
 - Refroidissement à HeII pressurisé/saturé (écoulements diphasiques)
 - Refroidissement à l'hélium faiblement supercritique (écrans de faisceau)
 - Cryostats & techniques d'isolation thermique à grande échelle
 - Réfrigération hélium de grande puissance à haute efficacité
 - Logistique & stockage de fluides cryogéniques (100 t He)
- Vide
 - Techniques d'étanchéité et détection de fuites
 - Vide secondaire pour l'isolation cryogénique
 - UHV cryogénique soumis à effets dynamiques par les faisceaux circulants
 - Pompage distribué NEG sur chambres UHV à température ambiante

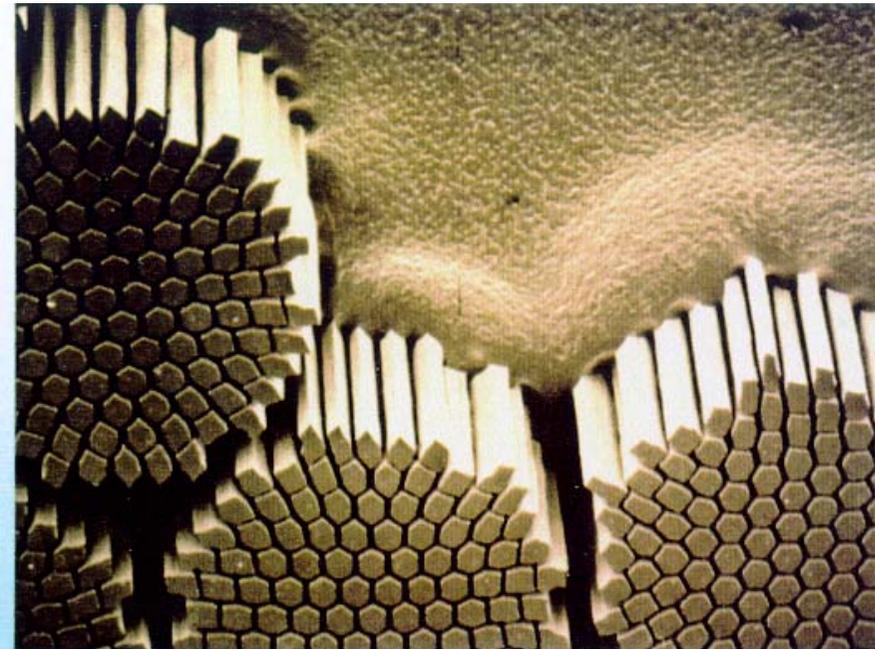
Densité de courant critique des supraconducteurs techniques



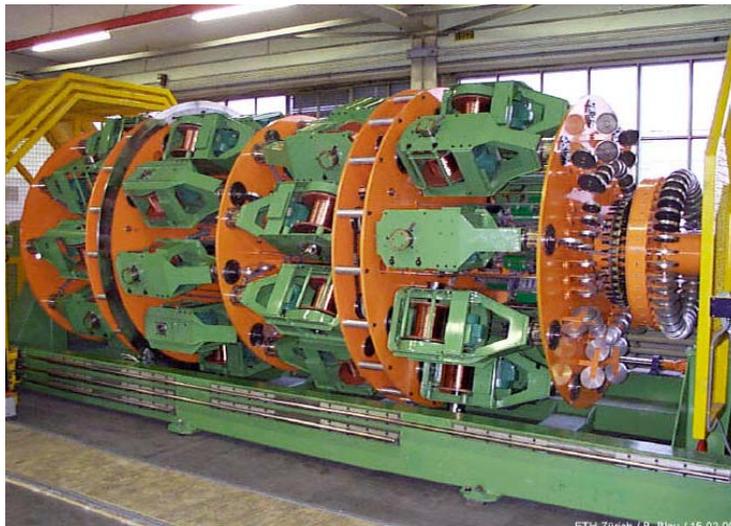
7000 km de câbles supraconducteurs



	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 $^\circ$	0.90 $^\circ$
Transposition length	115 mm	100 mm
Ratio Cu/Sc	≥ 1.6	≥ 1.9



Production des fils & câbles supraconducteurs



Fabrication des bobines supraconductrices



JEUMONT, NOELL, ANSALDO

Assemblage des masses froides de dipôles



ALSTOM, NOELL, ANSALDO

Mise en cryostat des aimants au CERN



Station de tests cryogéniques



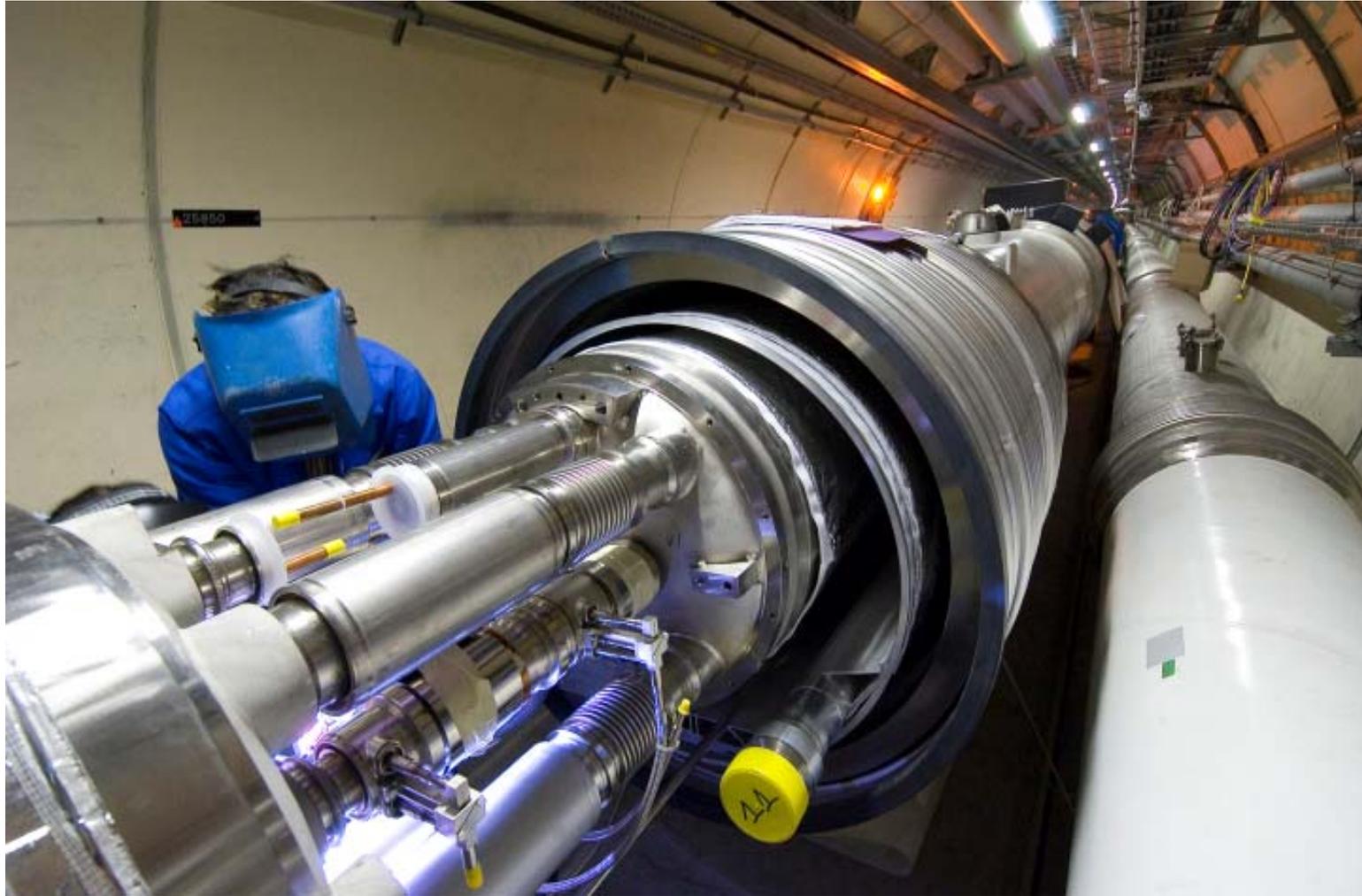
Descente des cryo-aimants au fond



Installation des cryo-aimants dans le tunnel



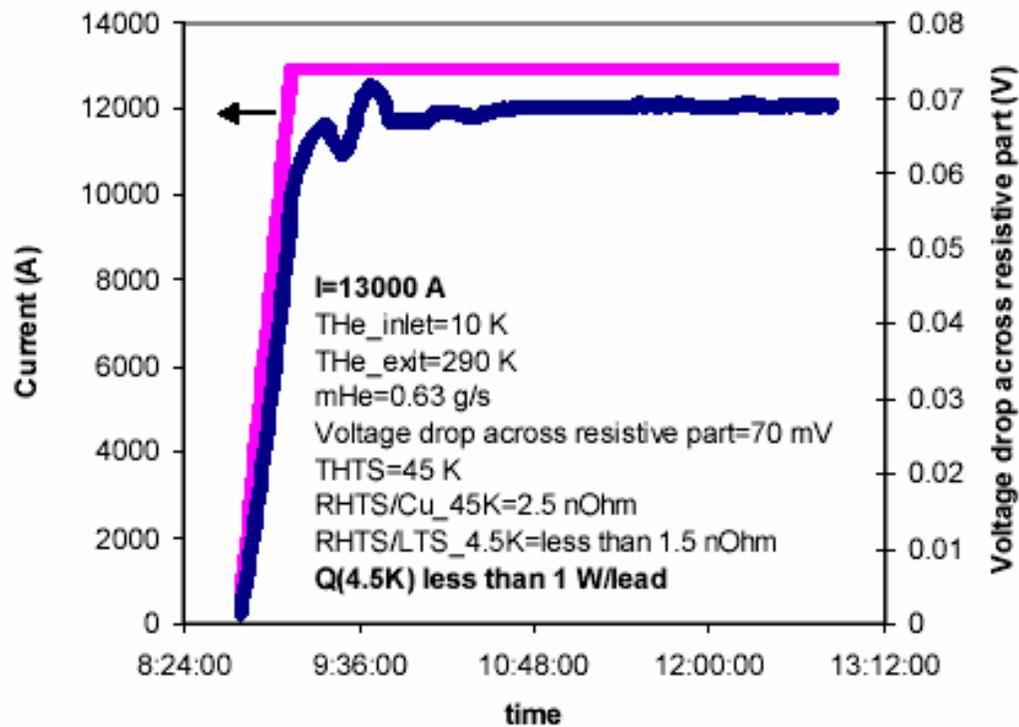
Interconnection des cryoaimants dans le tunnel



AQ électrique dans le tunnel



Amenée de courant 13 kA utilisant des supraconducteurs à haute température



Compresseurs froids des unités 2,4 kW @ 1,8 K

Air Liquide &
IHI-Linde



Roue axio-centrifuge



Cartouche 1^{er} étage

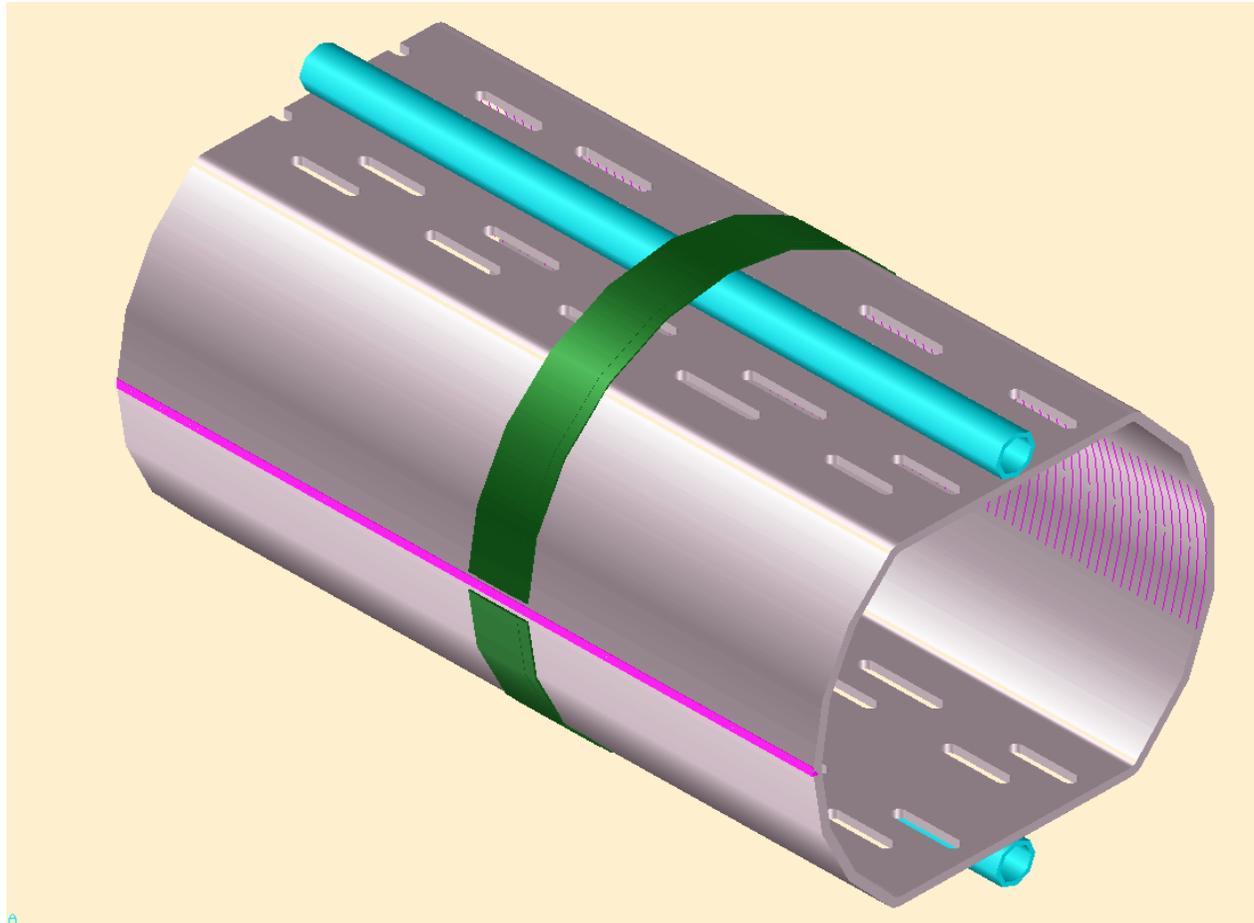
PhL



4 étages de compresseurs froids

LHC organisation & gestion des risques

Ecran de faisceau

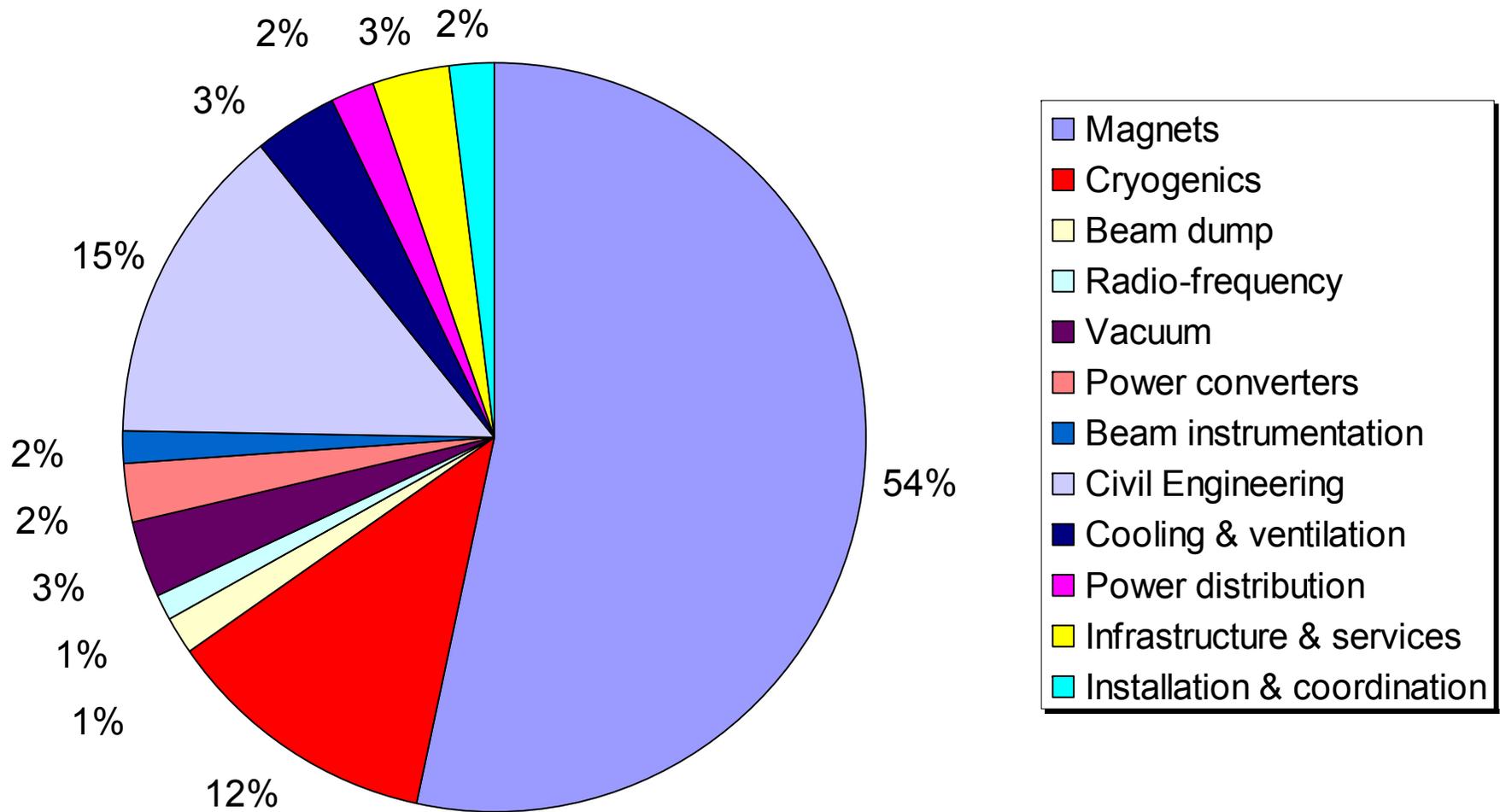


Interception des charges thermiques induites par le faisceau à 5-20 K (capillaires refroidis à l'hélium supercritique)

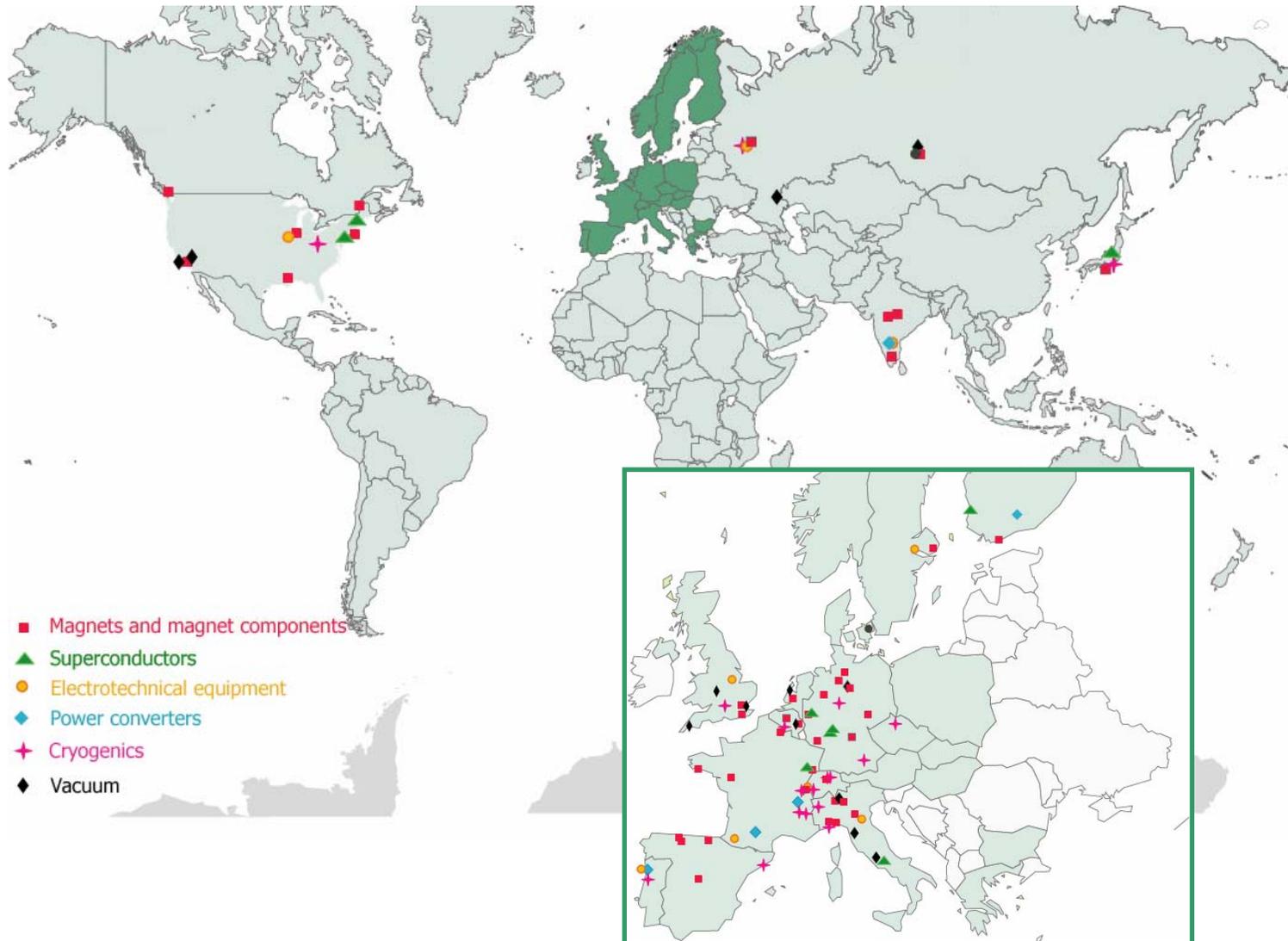
Baffle de cryopompe protégeant la surface à 1,9 K du rayonnement incident

Surface en dents de scie à faible réflectivité sur l'équateur pour réduire la photoémission

Structure des coûts du LHC



90 contrats principaux de fournitures en technologies avancées dans le monde



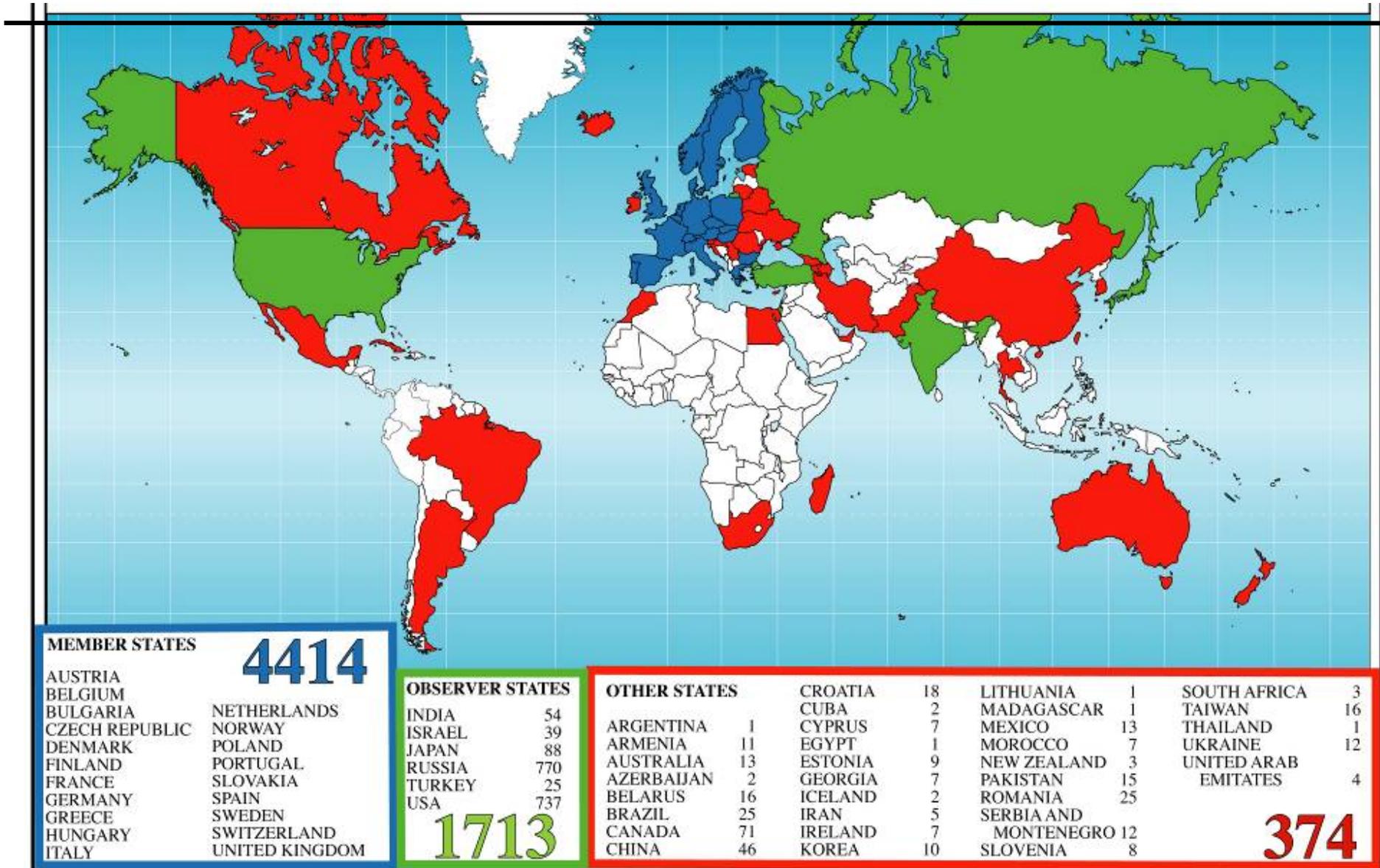
Plan

- Le LHC, un grand instrument scientifique basé sur une technologie avancée
- **Un projet global dans un environnement local**
- Organisation, décision, communication
- Eléments de gestion des risques
- Coefficients de sécurité et facteurs d'incertitude
- Méthodologies d'estimation des coûts
- Analyse probabiliste des risques de surcoûts

Le CERN compte 20 états membres en Europe...



...mais sert la communauté mondiale des physiciens



Le LHC en tant que projet

- La norme AFNOR X50-105 définit un projet comme *une démarche spécifique qui permet de structurer méthodiquement et progressivement une réalité à venir*
- Un projet se caractérise par
 - La satisfaction d'un besoin spécifique
« fournir à la communauté des physiciens des particules l'instrument de recherche des 20 prochaines années »
 - Un objectif autonome
« construire un collisionneur de hadrons d'une énergie de 14 TeV dans le c.m. et d'une luminosité de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ »
 - Des actions à entreprendre avec des ressources données
« développer, industrialiser et produire en série des aimants supraconducteurs à champ élevé, refroidis à l'hélium superfluide, avec l'aide des laboratoires et de l'industrie européens »

Quelques dates de l'histoire du projet

- 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 2006
- Premières collisions de faisceaux 2007
- Exploitation pour la physique 2008-2030

Un SGDT consultable mondialement *via* le WWW...

LHC - THE LARGE HADRON COLLIDER

[EDMS](#)
[CDD](#)
[MTE](#)
[SEARCH](#)

[LHC dashboard](#)

[Magnet test facility](#)

[LHC NEWS](#)

[Design report](#)

[LHC Go-ordination schedule and status](#)

[Golden Hadron Awards](#)

[General Information and Outreach](#)

[LHC@interactions.org](#)

[Organization and Committees](#)

[Quality Assurance](#)

[Publications](#)

[Seminars and Workshops](#)

[Presentations](#)

[Images](#)

[Surface Sites](#)

[Underground Sites](#)

[LHC Experiments](#)

[Beam Parameters](#)

[Lattice and Optics](#)

[Baseline Documentation](#)

[Equipment Catalogues](#)

[Naming and Conventions](#)

[Layouts](#)

[Integration](#)

[Installation](#)

[Hardware Commissioning](#)

[Sector Test](#)

[Beam Commissioning](#)

New CERN Control Centre (CCC)

https://edms.cern.ch/cedar/plsql/navigation.tree?cookie=1123634&top=1504900006&style=DEFAULT_STYLE

Local intranet

Start | Current05 | The LHC, a global scienc... | LHC_Homepage - Mic... | FR | 15:53

...donnant accès à l'organigramme technique du projet

The screenshot shows a Microsoft Internet Explorer browser window titled "EDMS Web Navigator". The address bar contains the URL: http://edms.cern.ch/cedar/plsql/navigation.tree?cookie=3466253&p_top_id=1504900006&p_top_type=P&p_open_id=1858752345&p_open_type=P. The main content area is titled "LHC Hardware Baseline" and features a tree view on the left and a document details panel on the right.

LHC Hardware Baseline

Collapse Expand

- LHC Hardware Baseline
 - Cryo Magnets in Common Arc Cryostats**
 - Cryo Dipoles in the Arcs and the Dispersion Suppressors
 - Cold Mass Assembly
 - Dipole Cryostat & Related Equipment
 - Standard Arc Short Straight Sections
 - Short Straight Sections in Dispersion Suppressors
 - Other Arc Cryostats and Components
 - Long Straight Sections
 - Cryogenics
 - Vacuum System
 - DC Powering and Quench Protection
 - Radiofrequency System
 - Transfer Lines, Injections and Beam Dumping
 - Other Machine Systems
 - Civil Engineering Works and Infrastructure
 - General Services
 - Installation
 - LHC Specific Facilities

Help **Search for Documents** **Guidelines for Document Creation** **Approval List**

Cryo Magnets in Common Arc Cryostats

Type: Project, Identifier: LHCAM228, Code: **Approved**
Project Engineer: Philippe LEBRUN

LHC-DC-ES-0001 LHC Magnet Polarities
[Paul Proudlock, Stephan Russenschuck, Markus Zerlauth](#)
LHC-DC-ES-0001-30-10 [pdf](#) (202 Kb) Date: 2004-12-15
Released
Engineering Specification

LHC-G-ES-0010 The Smoothing of the Magnets of the LHC Ring (Final Positioning)
[Christophe PODEVIN](#)
lhc-g-es-0010-10-00 Date: 2002-01-22
[PDF](#) (145 Kb) Released
Engineering Specification

LHC-LB-EC-0002 Addition of a Flange on Domed End Covers of the Magnet Cold Masses
[A. PONCET, P. BONNAL](#)
LHC-LB-EC-0002-10-10 Date: 2001-01-16
lhc-lb-ec-0002-10-10 Accepted
Engineering Change Request

[Open Drawing Folder](#)

Local intranet

...et à des documents tenus à jour

LHC Hardware Baseline

Collapse Expand

- LHC Hardware Baseline
 - Cryo Magnets in Common Arcs
 - Cryo Dipoles in the Arcs and
 - Cold Mass Assembly
 - Collared Coil
 - Coils**
 - Superconducting
 - Superconducting
 - Quench Heaters
 - Cable & Ground
 - Other Coil Comp
 - Collars
 - Spool Pieces
 - Bus Bars
 - Yoke & Related Comp
 - Shrinking Cylinder & F
 - Quench Diode Assem
 - Cold Bore Pipes & Ins
 - Dipole Beam Screen

CDD Drawing Information

C:\Documents and Settings\plebrun\Local Settings\Temporary Internet Files\Content.IE5\2XWVI12P\cddvi...

File Edit View Window Help

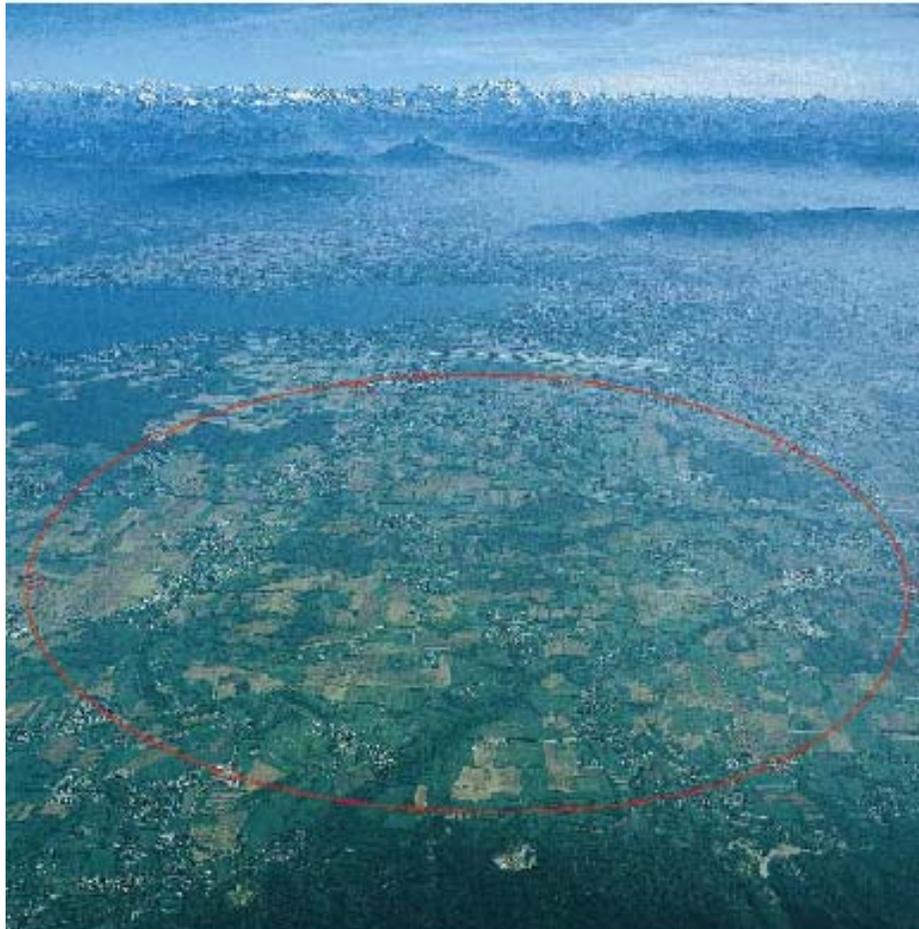
DIMENSIONED ANGLE (DEG)				
NO.	DIR 1	DIR 2	DIR 3	DIR 4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0

-286.675, -343.125 mm Page 1 of 1

Start | Inbo... | Current05 | Séminaire LHC Cad... | EDMS Web Navigat... | C:\Documents a... | FR | 18:13



LHC



Le Conseil du CERN a décidé à l'unanimité, le 16 décembre 1994, de construire le grand collisionneur de hadrons (LHC), qui donne aux physiciens des particules européens et du monde un instrument exceptionnel pour la poursuite de leurs travaux.

Cet instrument sera réalisé sur le domaine que la Suisse et la France, Etats-hôtes de l'Organisation, ont mis à la disposition de celle-ci.

Comme il l'a fait pour ses grands accélérateurs antérieurs, en particulier le SPS et le LEP, le CERN réalisera le LHC en concertation avec les autorités nationales et les élus locaux.

Hubert Curien

Président du Conseil du CERN
lors de l'approbation du projet LHC
Ancien Ministre de la Recherche
du Gouvernement français

étude d'impact sur l'environnement



Grand tétras

L'environnement dans son état initial



Gentiane jaune sur le Jura

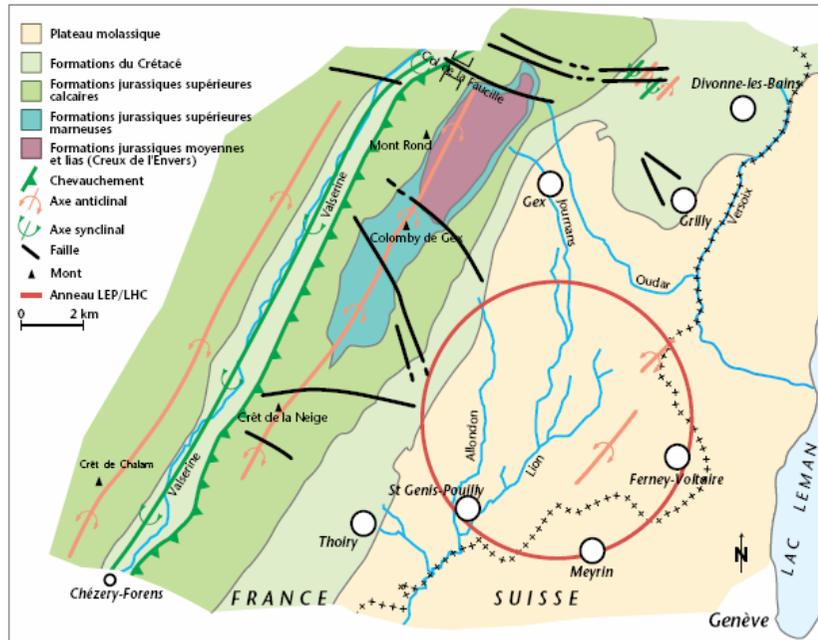
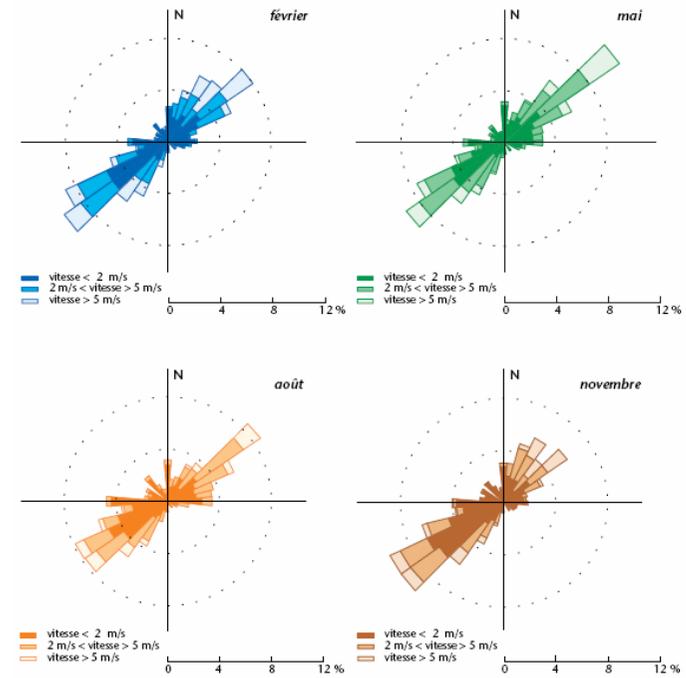


Figure 6.6

Schéma structural et géologie simplifiée



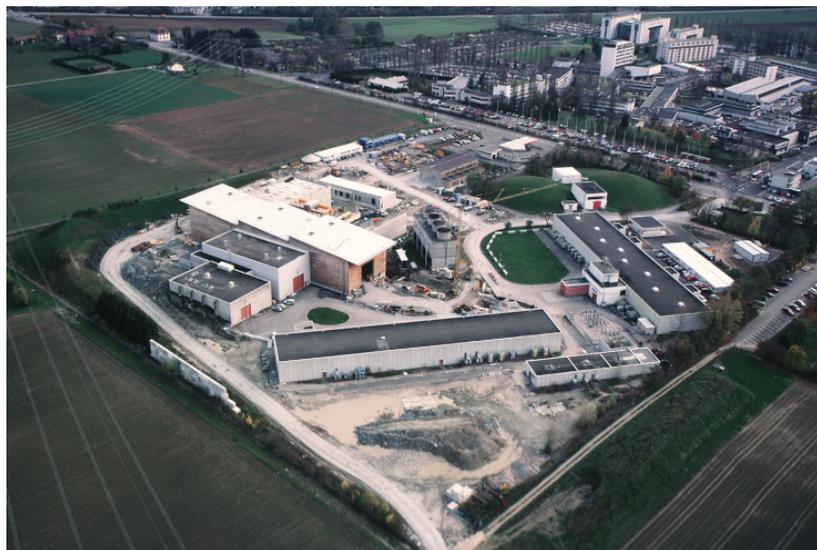
4

Vents enregistrés à Genève-Cointrin de 1982 à 1995

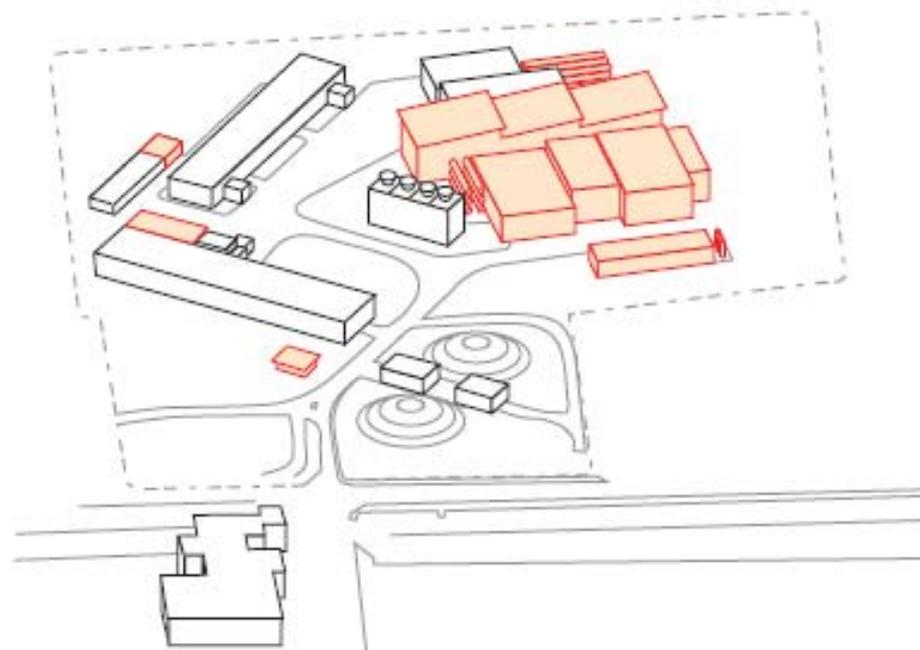
Les travaux à réaliser



Vue aérienne du Point 1



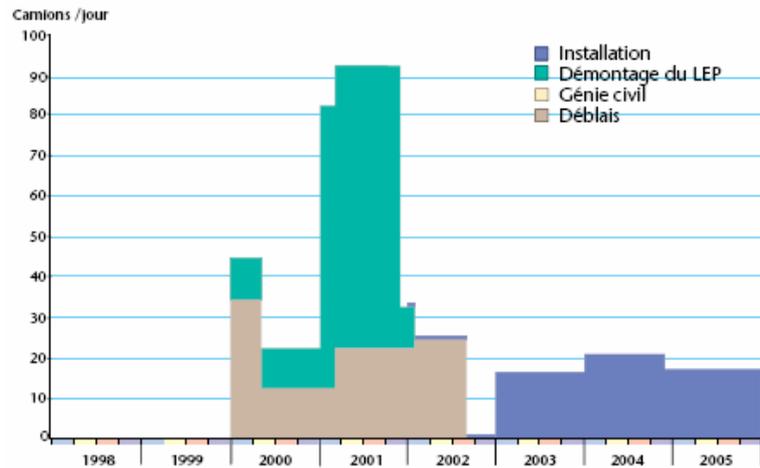
PhL



Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 1

... et tels que réalisés!

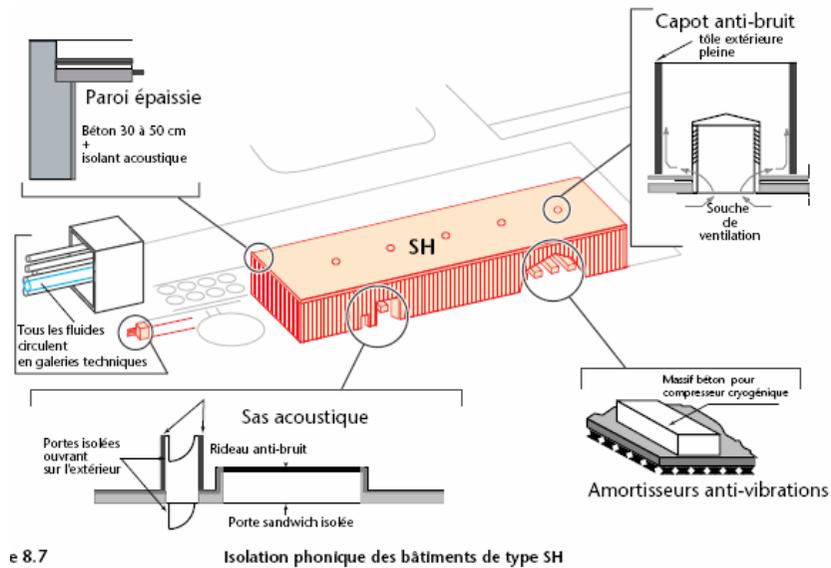
Minimiser les impacts



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 ...



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

Déclaration d'utilité publique

6 août 1998

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

12039

MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES

Décret du 30 juillet 1998 déclarant d'utilité publique et urgente l'acquisition d'immeubles non bâtis sis sur le territoire des communes de Cessy, Crozet, Echenevex, Ferney-Voltaire, Ornex, Prévessin-Moëns, Sergy, Saint-Genis-Pouilly et Versonnex (Ain) en vue de la réalisation d'un grand collisionneur de hadrons, dit LHC, par l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) et emportant mise en compatibilité des plans d'occupation des sols des communes de Cessy, Echenevex, Ferney-Voltaire, Prévessin-Moëns et Versonnex (Ain)

NOR : MAEA9820244D

Le Premier ministre,

Sur le rapport du ministre de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie et du ministre des affaires étrangères,

Vu le code de l'expropriation, et notamment ses articles L. 11-1 à L. 15-5, R. 11-14-1 à R. 11-14-15 et R. 15-1 à R. 15-8 ;

Vu le code de l'urbanisme, et notamment ses articles L. 123-8, R. 123-35-3 et R. 123-36 ;

Décète :

Art. 1^{er}. – Est déclarée d'utilité publique et urgente en vue de la réalisation d'un grand collisionneur de hadrons, dit LHC, par l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) l'acquisition par l'Etat des immeubles non bâtis sis dans le département de l'Ain, arrondissement de Gex, sur le territoire des communes de Cessy, Crozet, Echenevex, Ferney-Voltaire, Ornex, Prévessin-Moëns, Sergy, Saint-Genis-Pouilly et Versonnex, d'une contenance totale de 18,4 hectares en surface et 5,3 hectares en tréfonds, tels qu'ils sont délimités sur le plan au 1/1 000 annexé au présent décret, tant en ce qui concerne l'emprise des ouvrages souterrains que l'emprise des ouvrages de surface.

Art. 2. – Les expropriations éventuellement nécessaires devront être réalisées dans un délai de cinq ans à compter de la publication du présent décret.

Art. 3. – Le maître d'ouvrage est tenu de remédier aux dommages causés aux exploitations agricoles en application des dispositions de l'article 10 de la loi du 8 août 1962 susvisée.

Art. 4. – Le présent décret emporte mise en compatibilité des plans d'occupation des sols des communes de Cessy, Prévessin-Moëns et Versonnex au 1/5 000 et Echenevex et Ferney-



Date : 2006-01-11

DOCUMENT D'EXPLOITATION

RAPPORT PROVISOIRE DE SÛRETÉ DU SPS/CNGS ET DU LHC

SECTION I.1 INTRODUCTION

DOCUMENT PRÉPARÉ PAR :

Enrico Cennini / SC
André Faugier / SC
(Éditeurs)

DOCUMENT VÉRIFIÉ PAR :

Pierre Bonnal / AB
John Poole / AB
Ghislain Roy / AB

DOCUMENT APPROUVÉ PAR :

Steve Myers / AB
Chef d'Installation

GRUPE D'APPROBATION

Le SPS et le LHC sont classés INB



Date : 2006-01-11

DOCUMENT D'EXPLOITATION

RÈGLES GÉNÉRALES D'EXPLOITATION DU SPS/CNGS ET DU LHC

SECTION 0 INTRODUCTION

DOCUMENT PRÉPARÉ PAR :

Enrico Cennini / SC
André Faugier / SC
(Éditeurs)

DOCUMENT VÉRIFIÉ PAR :

Pierre Bonnal / AB
John Poole / AB
Ghislain Roy / AB

DOCUMENT APPROUVÉ PAR :

Steve Myers / AB
Chef d'Installation

GRUPE D'APPROBATION



Date : 2006-02-27

DOCUMENT D'EXPLOITATION

PLAN D'URGENCE INTERNE DU CERN

PARTIE A0 PRÉSENTATION DES CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTABLISSEMENT

DOCUMENT PRÉPARÉ PAR :

Enrico Cennini / SC
Ernst Peter Doebling / SC
André Faugier / SC
(Éditeurs)

DOCUMENT VÉRIFIÉ PAR :

Pierre Bonnal / AB
John Poole / AB
Ghislain Roy / AB

DOCUMENT APPROUVÉ PAR :

Steve Myers / AB
Chef d'Installation

GRUPE D'APPROBATION

Plan

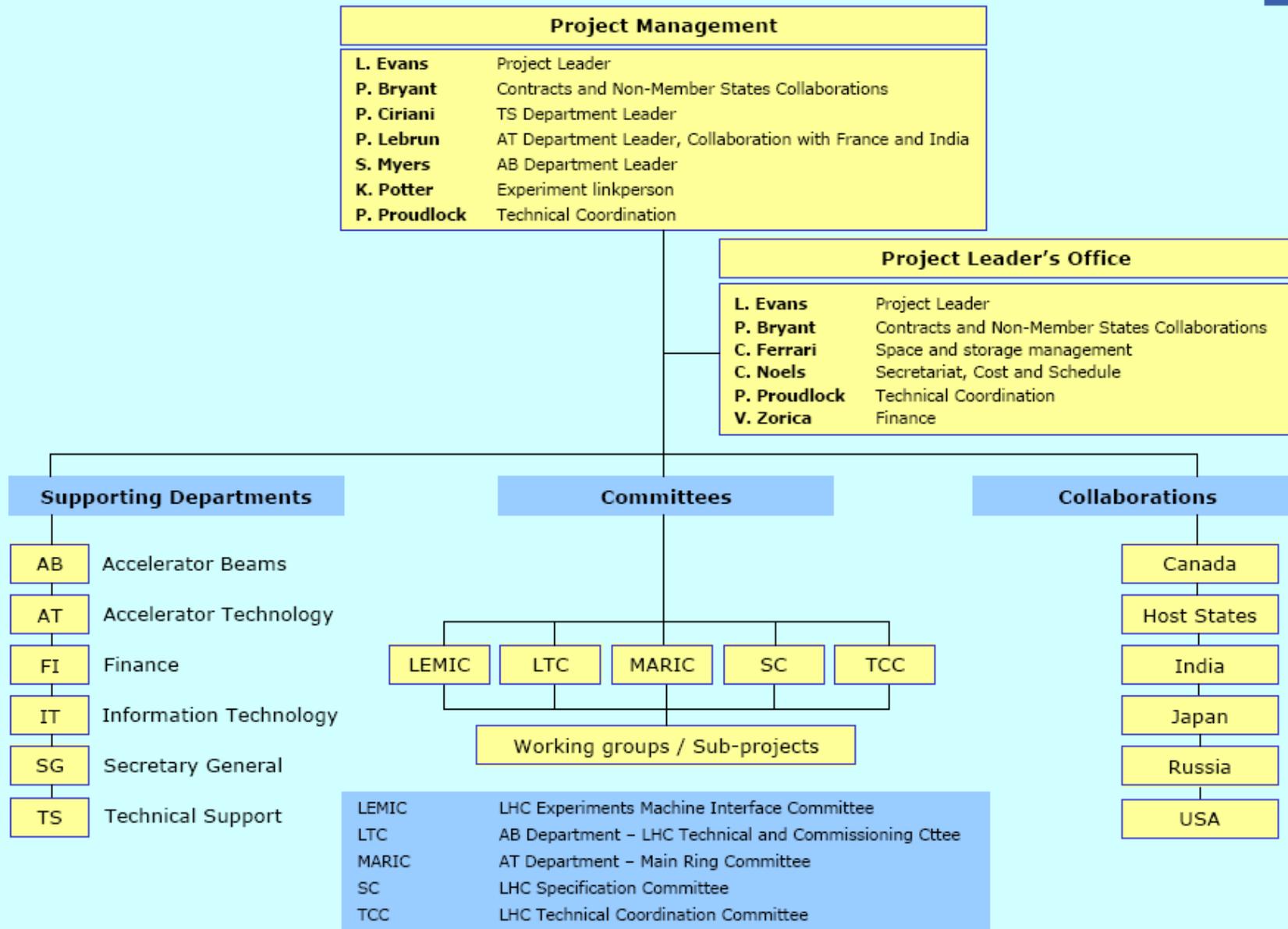
- Le LHC, un grand instrument scientifique basé sur une technologie avancée
- Un projet global dans un environnement local
- **Organisation, décision, communication**
- Eléments de gestion des risques
- Coefficients de sécurité et facteurs d'incertitude
- Méthodologies d'estimation des coûts
- Analyse probabiliste des risques de surcoûts

La question centrale de l'organisation

- « Every organized human activity... gives rise to two fundamental and opposing requirements: the **division of labor** into various tasks to be performed, and the **coordination** of these tasks to accomplish the activity. »
- « The **structure of an organization** can be defined simply as the sum total of the ways in which it divides its labor into distinct tasks and then achieves coordination among them. »

H. Mintzberg

The structuring of organizations (1979)



Organisation et décision

- « The **elaborate organizations** that human beings have constructed in the modern world to carry out the work of production and government can only be understood as machinery for coping with the **limits of man's abilities** to comprehend and compute in the face of **complexity** and **uncertainty** »

H.A. Simon

Rational decision-making in business organizations, Nobel lecture (1978)

Préparation et prise de décision

- Modèle de rationalité limitée (*bounded rationality*) de H.A. Simon: décision basée sur la rationalité technique, mais
 - en univers incertain: complexité des questions et limite des connaissances
 - en conditions imparfaites: absence de fonction d'utilité explicite à maximiser, recherche de solutions suffisantes sinon optimales, contingences externes, politique et enjeux de pouvoir...
- Mécanisme structurel visant à assurer
 - Qualité technique
 - Responsabilisation
 - Transparence
 - Traçabilité
- Etapas du processus
 - Identifier et impliquer les partenaires (*stakeholders*)
 - Analyser le cas et établir des propositions dans groupe de travail *ad hoc* ou permanent
 - Référer pour discussion au comité de projet (par exemple, MaRiC)
 - Décider au niveau de responsabilité adéquat
 - Communiquer la décision aux partenaires
 - Documenter la décision et ses conséquences (SGDT)

Gestion de la configuration

CERN
CH-1211 Geneva 23
Switzerland



LHC Project Document No.
LHC-PM-QA-304.00 rev 1.1
CERN Div./Group or Supplier/Contractor Document No.

EDMS Document No.
103557

Date: 1999-11-16

Quality Assurance Procedure

CONFIGURATION MANAGEMENT - CHANGE PROCESS AND CONTROL

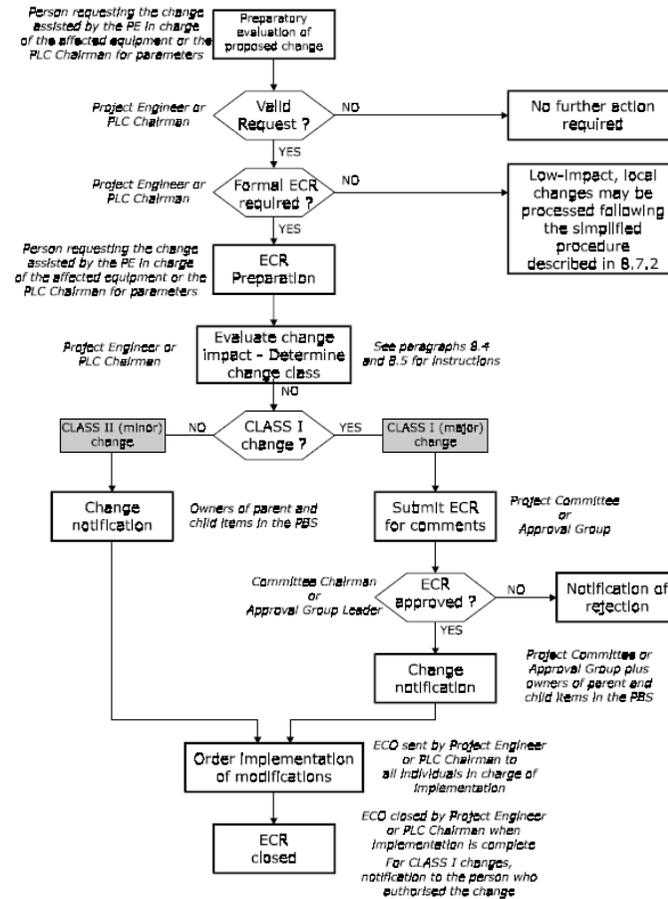
Abstract

This document describes the procedures and responsibilities for the systematic and uniform review of all engineering changes to the LHC configuration baseline, to ensure that the impact of changes on performance, cost and schedule are identified and thoroughly evaluated before the decision to incorporate them is taken.

Prepared by :
M Mottier
EST/ISS
Marcel.Mottier@cern.ch

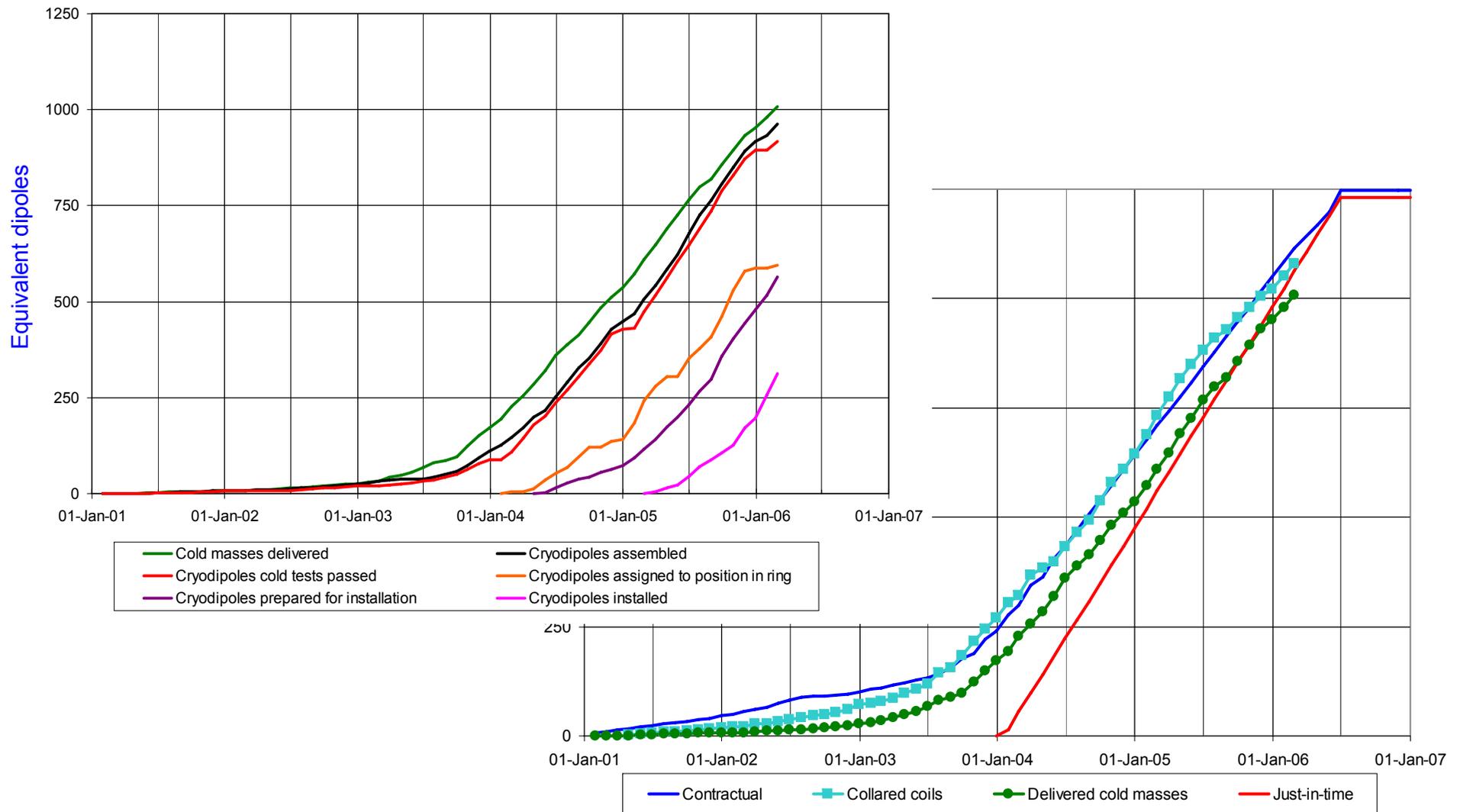
Checked by :
LHC Quality Assurance Working Group

Approved by :
Paul Faugas
Deputy to LHC Project Leader for Quality Assurance

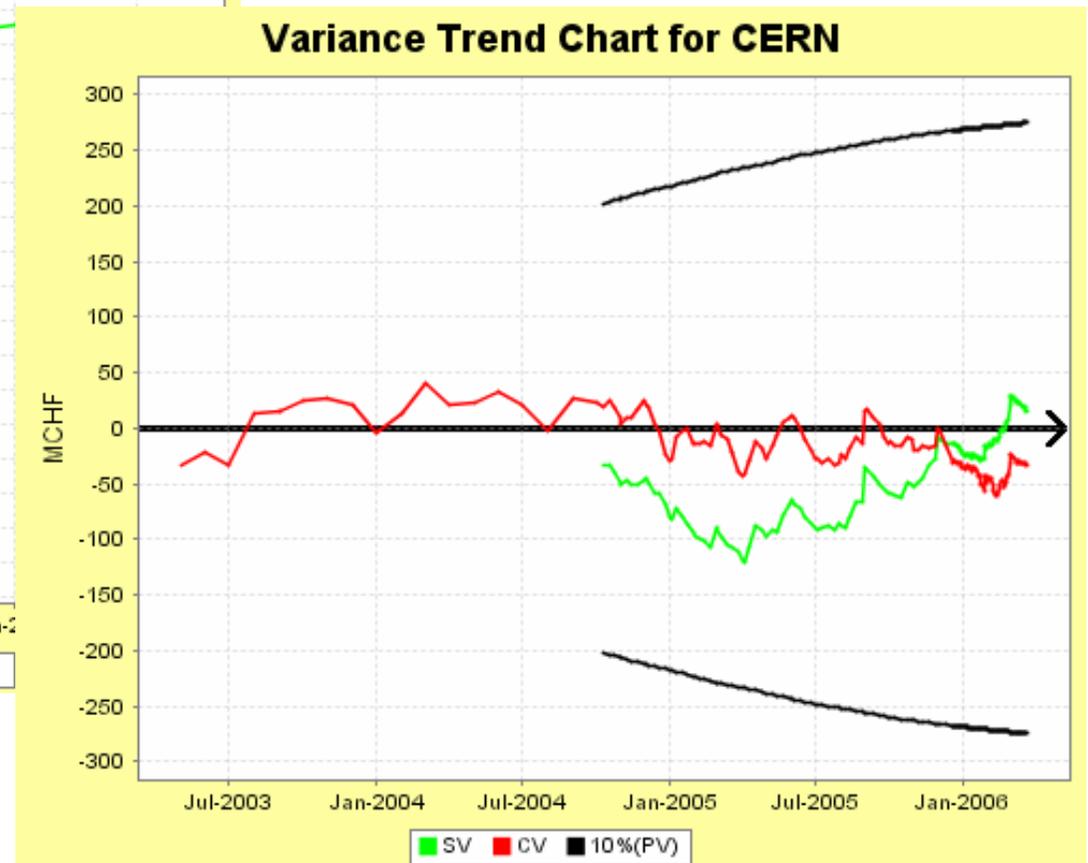
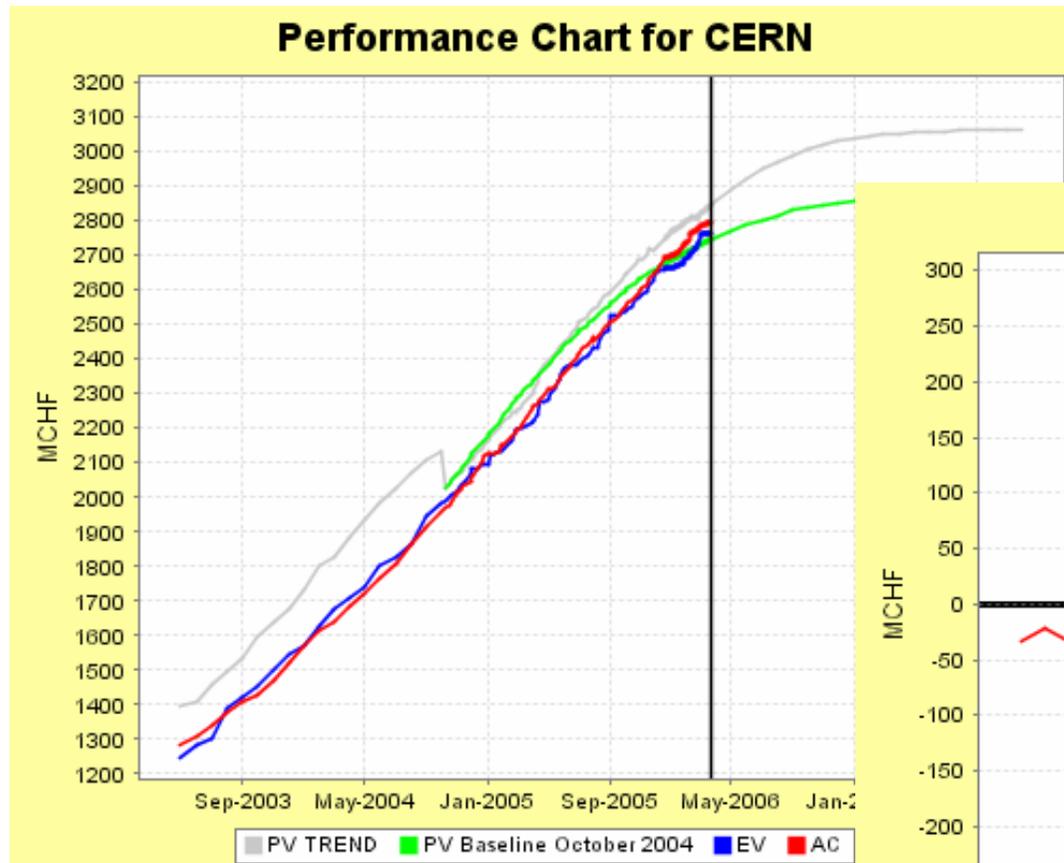


	Local change	Extended change
Low impact change	CLASS II	CLASS I
High impact change	CLASS I	CLASS I

Le Tableau de Bord, outil de reporting et de communication interne et externe



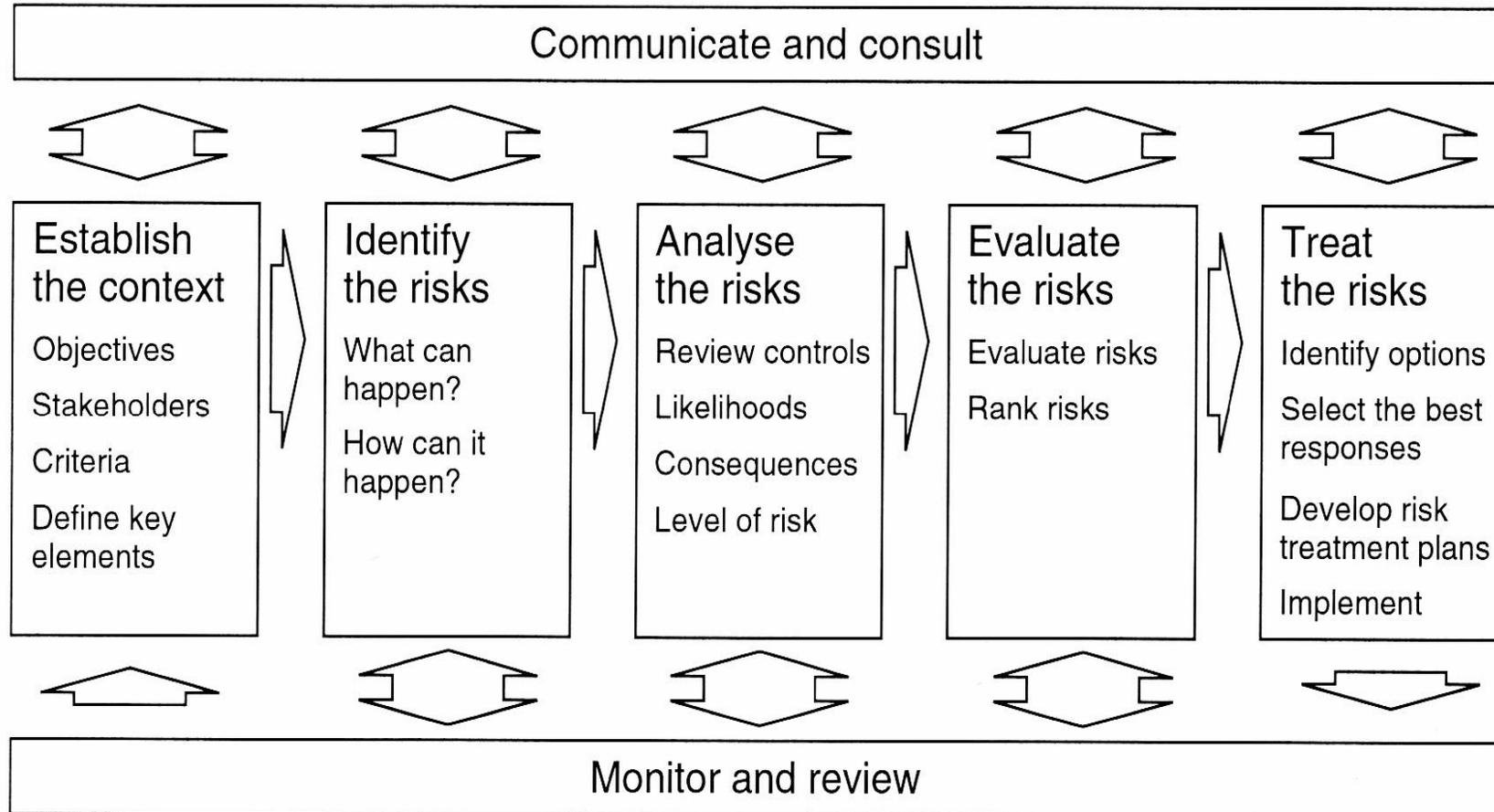
La mesure de Valeur Acquise, outil de suivi de l'avancement et du coût du projet



Plan

- Le LHC, un grand instrument scientifique basé sur une technologie avancée
- Un projet global dans un environnement local
- Organisation, décision, communication
- **Éléments de gestion des risques**
- Coefficients de sécurité et facteurs d'incertitude
- Méthodologies d'estimation des coûts
- Analyse probabiliste des risques de surcoûts

Processus de gestion des risques



Les questions à se poser en gestion des risques

Etape du processus	Question
Contexte	Quel but voulons nous atteindre? Dans quel cadre? Selon quels critères de succès?
Identification	Que peut-il se passer? Quels types de risques? Avec quelles probabilités?
Analyse	Quels impacts pour le projet?
Evaluation	Quels sont les principaux facteurs et types de risque?
Action	Que faisons nous? Suppression, réduction ou acceptation du risque?
Suivi	Comment garder le contrôle?
Communication	Qui impliquer? Comment?

Types et exemples de risques projet

- Technique/conception
 - Caractéristiques de conception non atteintes
- Qualité/réalisation
 - Exécution non conforme
 - Dérives de production
- Industriel/financier
 - Incapacité du fournisseur, redondance des approvisionnements
 - Faillite, fusion, réorganisation
- Réglementation/sécurité
 - Changement des réglementations en cours de projet
 - Evolution du droit du travail
- Coût
 - Inflation & révision des prix
 - Fluctuations de change
- Délai
 - Rupture du flux tendu
- Performance/exploitation
 - Fiabilité, disponibilité
- Environnement

Intégration de la chaîne d'approvisionnement

Avantages

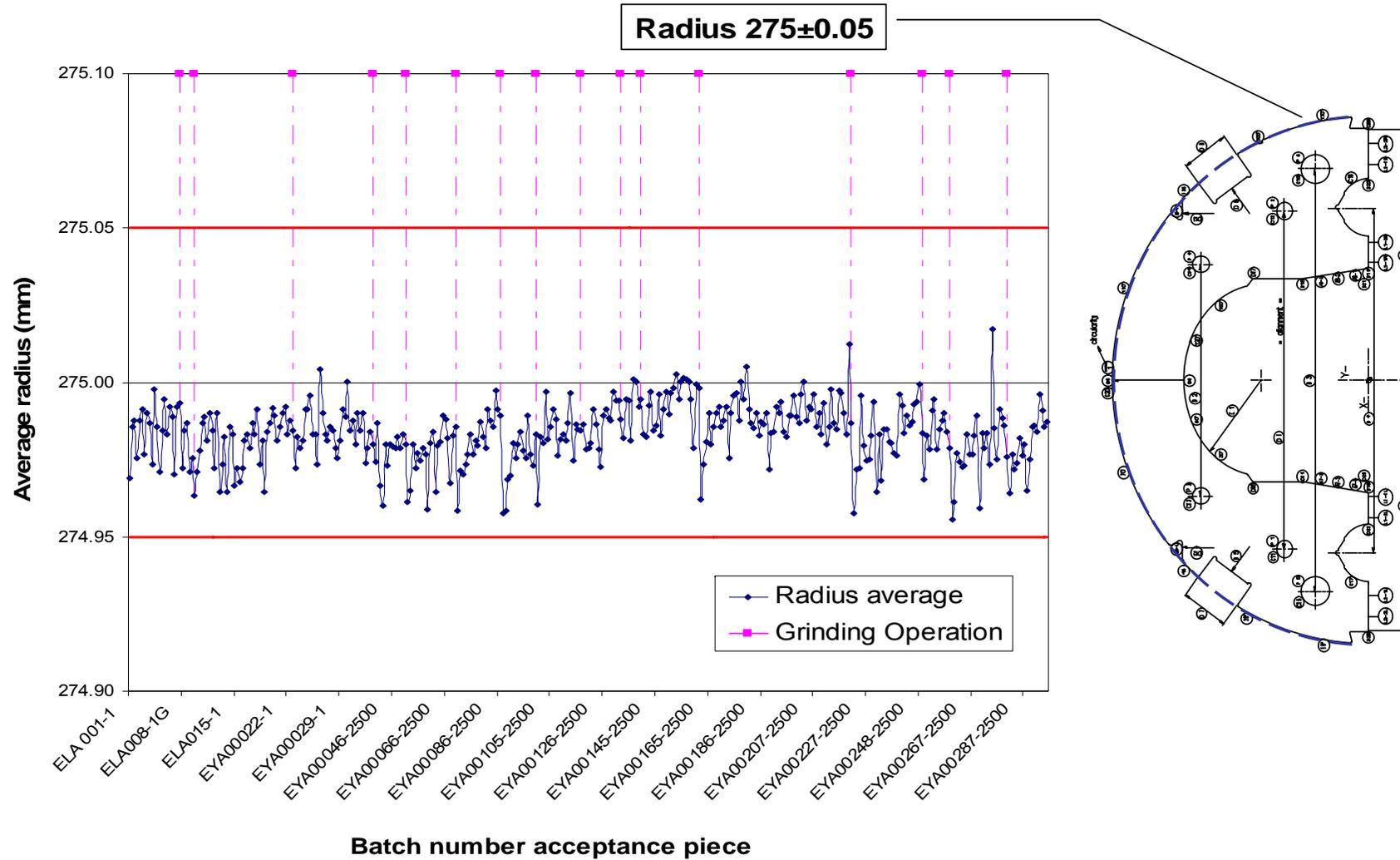
- Homogénéité technique
- Assurance qualité
- Economie d'échelle
- Sécurité d'approvisionnement
- Retours industriels équilibrés

Inconvénients & risques

- Interface de responsabilité
- Travail additionnel
- Rupture du flux tendu
- Transport, stockage, logistique

Détection et correction des dérives de production

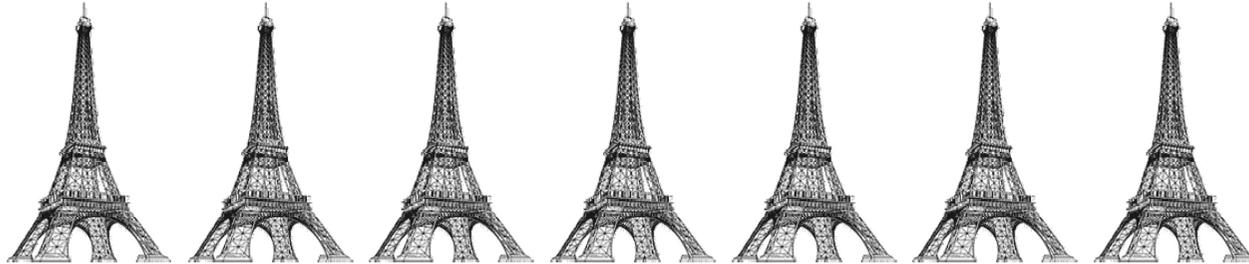
Méthode de contrôle statistique



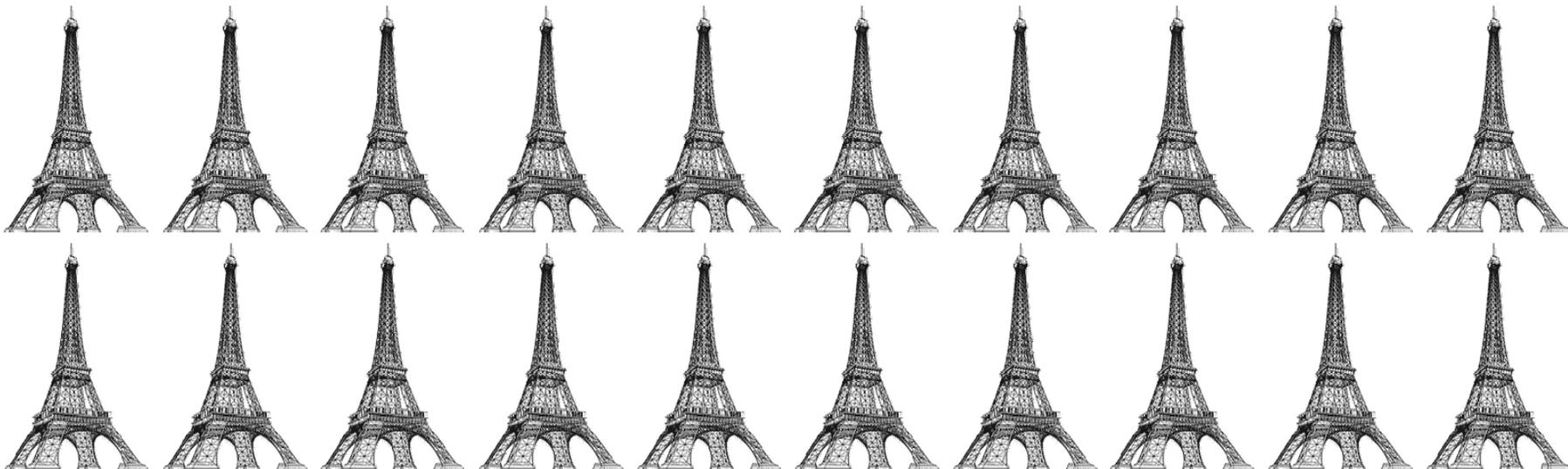
Approvisionnement et logistique

Qualité & quantité au bon endroit au bon moment

Installé dans le tunnel: **50 000 t**



Transporté en Europe: **~150 000 t**



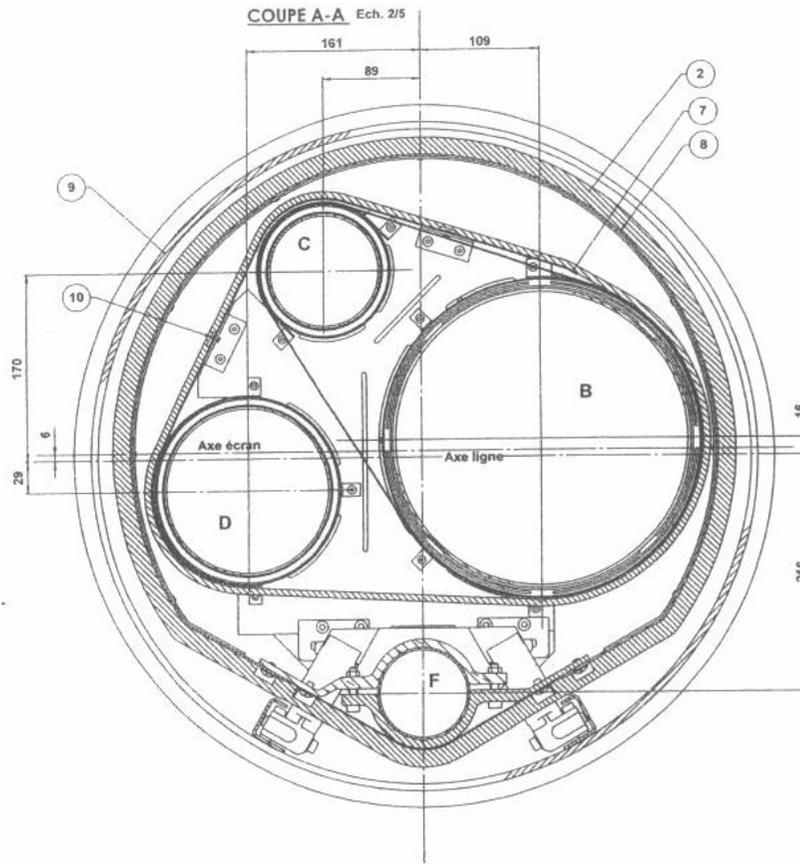
Assemblage des sections droites courtes au CERN

Internalisation suite à la faillite du contractant



Ligne cryogénique du tunnel

Difficultés techniques dans l'industrialisation



Cotation probabilité / gravité

ESA-ESTEC, *Systemes spatiaux: gestion des risques*, ECSS (2000)

Degré	Probabilité	Probabilité d'occurrence
5	Maximale	Se produit avec certitude, une à plusieurs fois au cours du projet
4	Elevée	Se produit fréquemment , 1 fois sur 10 projets
3	Moyenne	Se produit quelquefois , 1 fois sur 100 projets
2	Faible	Se produit rarement , 1 fois sur 1000 projets
1	Minimale	Ne se produit presque jamais , 1 sur 10 000 projets ou plus

Degré	Gravité	Gravité des conséquences : Impact sur (par exemple) les coûts
5	Catastrophique	Entraîne la fin du projet
4	Critique	Augmentation du coût du projet > % à définir
3	Majeure	Augmentation du coût du projet > % à définir
2	Significative	Augmentation du coût du projet < % à définir
1	Négligeable	Minime ou sans impact

Evaluation du risque et actions proposées

ESA-ESTEC, Systèmes spatiaux: gestion des risques, ECSS (2000)

Indice de risque	Magnitude du risque	Actions proposées
R \geq 20	Risque maximum	Risque inacceptable : appliquer de nouveaux processus d'équipe ou modifier les références de base - attirer l'attention des responsables du projet au niveau hiérarchique supérieur approprié comme défini dans le plan de gestion des risques.
15 \leq R < 20	Risque élevé	Risque inacceptable : voir ci-dessus.
10 \leq R < 15	Risque moyen	Risque inacceptable : gérer de façon dynamique, envisager de modifier les processus d'équipe et les références de base - attirer l'attention des responsables du projet au niveau approprié comme défini dans le plan de gestion des risques.
4 < R < 10	Risque faible	Risque acceptable : maîtriser, surveiller - attirer l'attention du responsable du management du lot de travaux.
R \leq 4	Risque minimum	Risque acceptable : voir ci-dessus.



Fiche de risque composant

WBS Element # _____ Element Name _____	Risk Factor	Weight
Design Risk (check one of 4): (from RSVP at BNL, similar for US CMS, NCSX)		
___ Concept only	15%	1
___ Conceptual Design Phase: some drawings; many sketches	8%	1
___ Preliminary Design > 50 % complete; some analysis complete	4%	1
___ Detailed Design > 50% Done	0%	1
Technical Risk (check one of 8 and answer Yes or No to two questions):		
___ New design; well beyond current state-of-the art	15%	2 or 4
___ New design of new technology; advances state-of-the art	10%	2 or 4
___ New design; requires some R&D but does not advance the state-of-the-art	8%	2 or 4
___ New design; different from established designs or existing technology	6%	2 or 4
___ New design; nothing exotic	4%	2 or 4
___ Extensive modifications to an existing design	3%	2 or 4
___ Minor modifications to an existing design	2%	2 or 4
___ Existing design and off-the-shelf hardware	1%	2 or 4
Yes/No – does this element push the current state-of-art in Design?		either = 2
Yes/No – does this element push the current state-of-art in Manufacturing?		both = 4
Cost Risk (check one of 8 and answer Yes or No to two questions):		
___ Engineering judgment	15%	1 or 2
___ Top-down estimate from analogous programs	10%	1 or 2
___ In-house estimate for item with minimal experience and minimal in-house capability	8%	1 or 2
___ In-house estimate for item with minimal experience but related to existing capabilities	6%	1 or 2
___ In-house estimate based on previous similar experience	4%	1 or 2
___ Vendor quote (or industrial study) with some design sketches	3%	1 or 2
___ Vendor quote (or industrial study) with established drawings	2%	1 or 2
___ Off-the-shelf or catalog item	1%	1 or 2
Yes/No – are the material costs in doubt?		either = 1
Yes/No – are the labor costs in doubt?		both = 2
Schedule Risk (check one)		
___ Delays completion of critical path subsystem item	8%	1
___ Delays completion of non-critical path subsystem item	4%	1
___ No schedule impact on any other item	2%	1
Prepared by: _____ date: _____		
Comments:		

Exemple: fiabilité du linac supraconducteur de la SNS (Oak Ridge)

<i>Superconducting Linac equipment reliability analysis</i>						
Consequences:						
5 = Must have to commission. Need all installed units functional.						
4 = Very difficult to commission without. Prefer all units functional.						
3 = Somewhat difficult to commission without. If one unit fails can work around.						
2 = Slight impact on commissioning. Can live without several units.						
1 = Not needed to commission.						
Likelihood of failure						
5 = Fails often. E.g. pulsed power or electromechanical device.						
3 = Fails occasionally. E.g. DC power supply.						
1 = Almost never fails. E.g. magnet or passive component.						
Time to repair						
5 = Could be two or more months. Long lead time components.						
4 = A few weeks.						
2 = A few days.						
1 = Same day repair.						
Priority = (Consequence of failure) x (Likelihood of failure) x (Time to repair)						
<i>System</i>	<i>Group</i>	<i>Equipment</i>	<i>Consequence of failure for CD4</i>	<i>Likelihood of failure</i>	<i>Time to repair</i>	
Cryomodule	Cryogenics	Cryomodule isolation valves	5	3	5	75
SCL	Cryogenics	Warm section, any failure	5	3	4	60
Cryomodule	Cryogenics	Cavity feedthroughs	3	3	5	45
MPS	Vacuum	Fast valves	5	2	4	40
Cryomodule	Cryogenics	Cryomodule internal cables	3	3	4	36
SCL	Mech/Electrical	Quadrupoles	5	3	2	30
HPRF	Electrical	HVCM	5	5	1	25
CHL	Cryogenics	CHL	5	1	5	25
CHL	Cryogenics	Transfer lines	5	1	5	25
Controls/RF	Controls/rf	Control or RF Cables	2	4	3	24
SCL	Cryogenics	U-tubes	4	1	5	20
SCL	Cryogenics	Dummy cryomodules	5	1	4	20

Exemple: risques liés à la compression du planning LHC

Ref No	Risk Description	Risk Type	Risk Category	Current Risk Score			Risk Owner	Risk Manager
				L	I	LxI		
1	Insufficient trained personnel to meet compressed schedule	OPERATIONAL, SCHEDULE	High	3	3	9	LHC Project Leader	DHs
2	Late availability of critical components	SCHEDULE	High	3	3	9	LHC Project Leader	DHs
3	Interference of installation of cryoline and magnets	SCHEDULE, QUALITY	Medium	3	2	6	LHC Project Leader	DHs
4	Errors in early parallel commissioning of sectors	OPERATIONAL, EQUIPMENT DAMAGE	Medium	2	3	6	LHC Project Leader	DHs, GLs
5	Diversion of core competencies from main task to make up for industry's weaknesses	OPERATIONAL	Medium	2	3	6	LHC Project Leader	DHs
6	Withdrawal of cryoline contractor	SCHEDULE	Medium	2	3	6	LHC Project Leader	AT DH
7	No separate mechanical integrity verification of cryoline in operation	TECHNICAL, OPERATIONAL	Medium	1	3	3	LHC Project Leader	AT DH, ACR GL
8	No separate heat load measurement of cryoline	TECHNICAL, OPERATIONAL	Low	1	2	2	LHC Project Leader	AT DH, ACR GL

Likelihood Categories (L)		Impact Categories (I)	
1	Rare or unlikely	1	Insignificant/Minor (undesirable or no threat to objectives, no injury, minor impact on reputation).
2	Possible	2	Moderate (injuries, moderate impact on budget and reputation).
3	Likely	3	Major (extensive injury, major impact on budget, reputation and objectives).
4	Frequent or almost certain	–	<i>Impact categories leap from 3-5 to emphasise the jump from Major to Catastrophic.</i>
		5	Catastrophic (loss of life, failure to meet objectives, major threat to CERN and ongoing viability).

Plan

- Le LHC, un grand instrument scientifique basé sur une technologie avancée
- Un projet global dans un environnement local
- Organisation, décision, communication
- Eléments de gestion des risques
- **Coefficients de sécurité et facteurs d'incertitude**
- Méthodologies d'estimation des coûts
- Analyse probabiliste des risques de surcoûts

Coefficients de sécurité & facteurs d'incertitude

- Exemple: dimensionnement de la puissance des réfrigérateurs cryogéniques du LHC
- Approche analytique
 - Identification des divers types de charges thermiques et de leur dépendance paramétrique
 - Estimation des entrées de chaleur individuelles des composants, par calcul et/ou mesure
 - Estimation des charges thermiques statiques, par sommation
 - Estimation des charges thermiques dynamiques, par calcul et/ou mesure

Identification & gestion des charges thermiques

Identification

Gestion

- Heat inleaks

- Radiation
- Residual gas conduction
- Solid conduction

70 K shield, MLI

Vacuum < 10^{-4} Pa

Non-metallic supports

Heat intercepts

- Joule heating

- Superconductor splices

Resistance < a few n Ω

- Beam-induced heating

- Synchrotron radiation
- Beam image currents
- Acceleration of photoelectrons

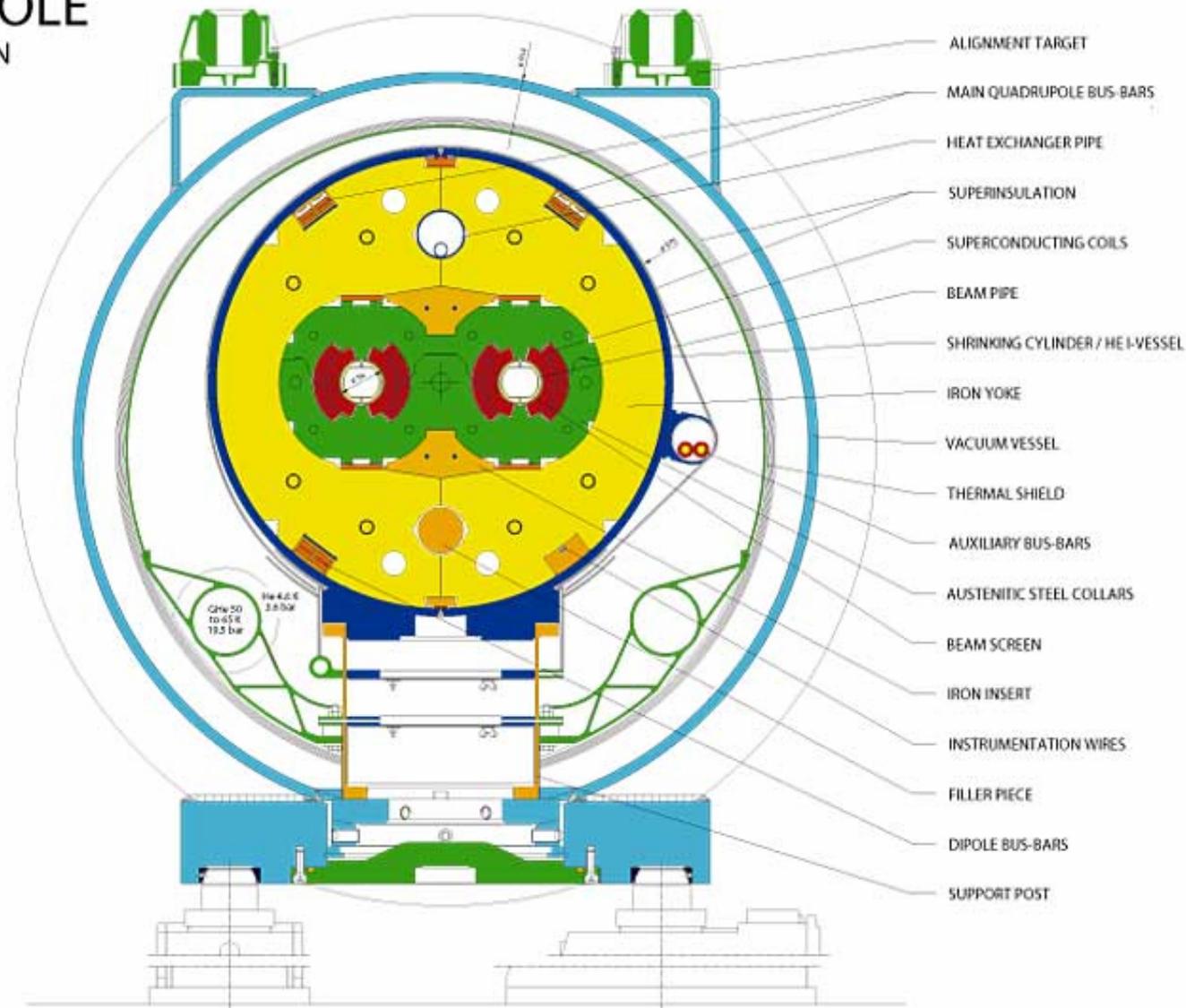
}

} 5-20 K beam screens

}

Coupe transversale d'un cryodipôle LHC

LHC DIPOLE CROSS SECTION



Charges thermiques en régime établi [W/m]

(Cryoaimants & ligne de distribution dans les arcs du LHC)

Temperature	50-75 K	4.6-20 K	1.9 K LHe	4 K VLP
Heat inleaks*	7.7	0.23	0.21	0.11
Resistive heating	0.02	0.005	0.10	0
Beam-induced nominal**	0	1.58	0.09	0
Beam-induced ultimate**	0	4.36	0.11	0
Total nominal	7.7	1.82	0.40	0.11
Total ultimate	7.7	4.60	0.42	0.11

* no contingency

** Breakdown

	nominal	ultimate
Synchrotron radiation	0.33	0.50
Image current	0.36	0.82
Beam-gas Scattering	0.05	0.05
Photoelectron	0.89	3.07

Facteurs d'incertitude

- Application de facteurs d'incertitude F_{in} sur les charges statiques, prenant en compte
 - L'incertitude sur la connaissance des mécanismes en jeu (p.ex. impédances thermiques de contact, couplages conductif/radiatif dans MLI)
 - Le défaut de reproductibilité des configurations (p.ex. MLI)
 - La variabilité des conditions réelles de fonctionnement (p.ex. vide d'isolement)
 - L'évolution dans le temps (vieillessement, contamination des surfaces)
- On suppose les lois de calcul des charges dynamiques connues et exactes (cas «nominal» et «ultime»)

Lois d'échelle des charges dynamiques du LHC

Beam parameter	Energy E	Bunch current I_{bunch}	Bunch number n_{bunch}	Bunch length σ_z [r.m.s.]	Luminosity L
Resistive heating	E^2	-	-	-	-
Synchrotron radiation	E^4	I_{bunch}	n_{bunch}	-	-
Image current	-	I_{bunch}^2	n_{bunch}	$\sigma_z^{-3/2}$	-
Photo-electron cloud	-	I_{bunch}^3	n_{bunch}	-	-
Beam gas scattering	-	I_{bunch}	n_{bunch}	-	-
Random particle loss	-	I_{bunch}	n_{bunch}	-	-
Secondaries	E	-	-	-	L
RF losses	-	I_{bunch}^2	n_{bunch}	-	-

Facteurs de surcapacité

- Application de facteurs de surcapacité F_{sc} sur le total [charges statiques corrigées du facteur d'incertitude + charges dynamiques nominales] prenant en compte
 - La surcapacité nécessaire au refroidissement en un temps fini
 - Le souci de ne pas faire fonctionner les machines à 100% de charge
 - La dégradation de l'efficacité des machines à charge réduite
 - La variabilité des performances des machines
- Du fait de la forte influence des paramètres de faisceau sur les charges dynamiques, on n'applique pas de facteur de surcapacité dans le cas « ultime »

Coefficients de sécurité globaux

- Puissance installée

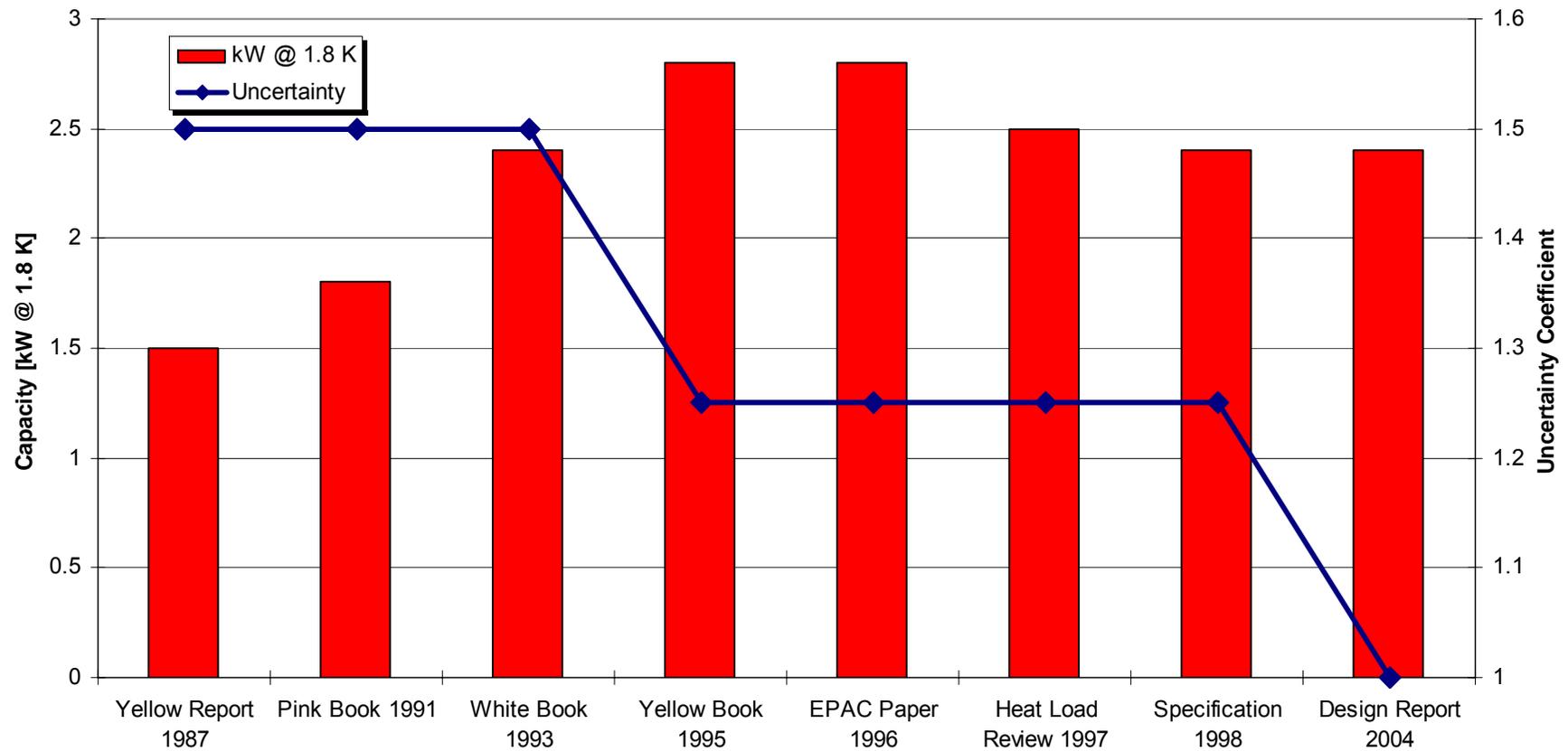
$$Q_{\text{installed}} = \text{Max} [F_{\text{sc}} (F_{\text{in}} Q_{\text{stat}} + Q_{\text{dyn nom}}); (F_{\text{in}} Q_{\text{stat}} + Q_{\text{dyn ult}})]$$

- On a pris pour facteurs d'incertitude et de surcapacité
 - $F_{\text{in}} = 1,5$ au début du projet
 - $F_{\text{sc}} = 1,5$
 - Les facteurs F_{in} ont été ensuite adaptés à la baisse en suivant l'amélioration de la définition technique de la configuration et de la connaissance des performances thermiques des composants

Besoins en puissance de réfrigération installée dans les secteurs du LHC

Temperature	High-load sector	Low-load sector	
50-75 K	33000	31000	[W]
4.6-20 K	7700	7600	[W]
4.5 K	300	150	[W]
1.8 K	2400	2100	[W]
3-4 K	430	380	[W]
20-280 K	41	27	[g/s GHe]

**EVOLUTION OF LHC REFRIGERATION REQUIREMENTS
INSTALLED CAPACITY @ 1.8 K PER SECTOR**



Plan

- Le LHC, un grand instrument scientifique basé sur une technologie avancée
- Un projet global dans un environnement local
- Organisation, décision, communication
- Éléments de gestion des risques
- Coefficients de sécurité et facteurs d'incertitude
- **Méthodologies d'estimation des coûts**
- Analyse probabiliste des risques de surcoûts

Estimation des coûts

- Approche analytique

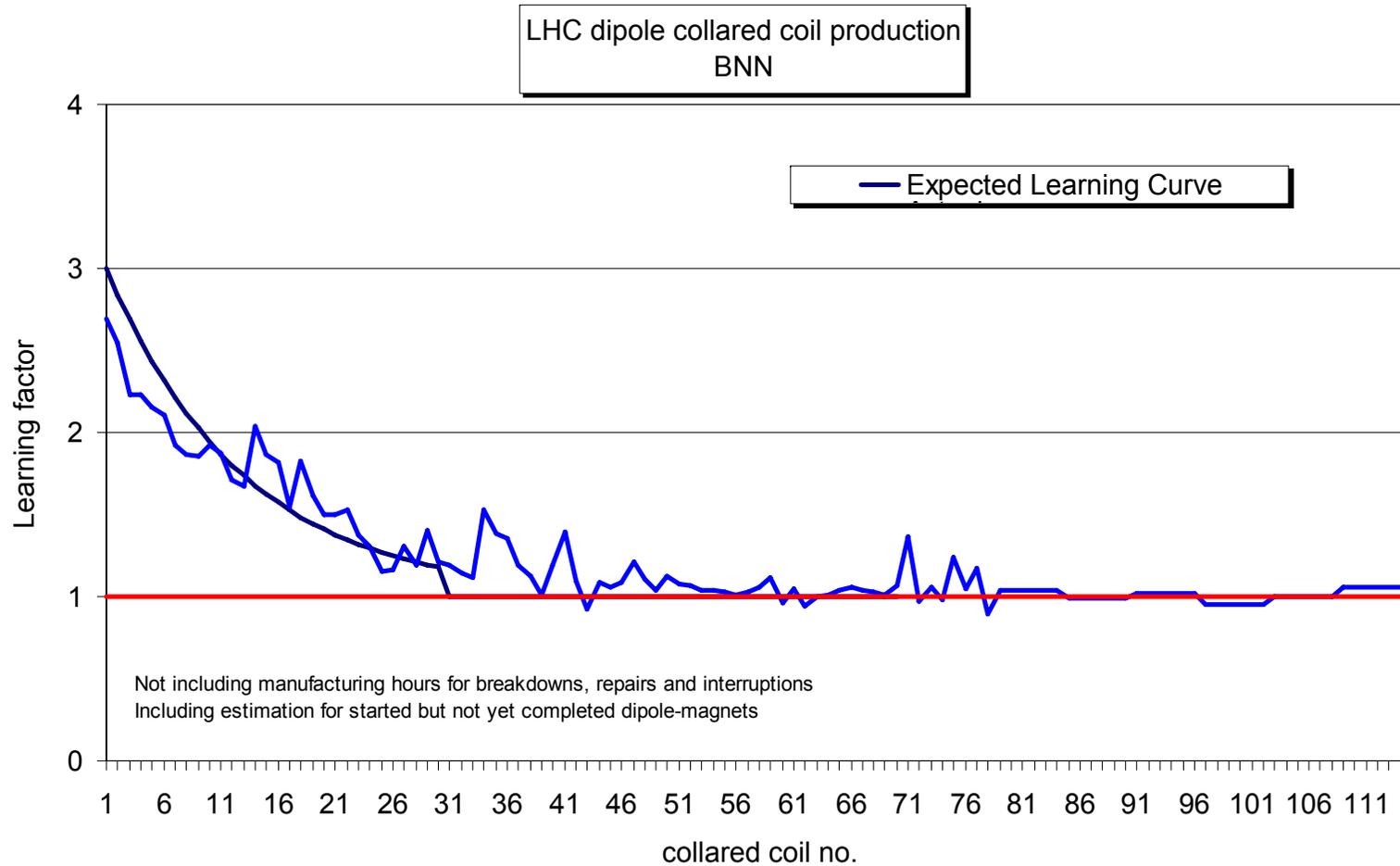
- Etablissement de l'organigramme technique (WBS)
- Définition des coûts unitaires et des quantités (y compris la consommation intermédiaire et les rebuts)
- Estimation des coûts fixes
- Estimation du coût total par sommation
- Dans le cas de séries, prise en compte d'une loi d'apprentissage

- Approche synthétique

- Recherche d'un ou plusieurs estimateurs d'échelle et de leurs conditions et domaines d'application
- Recherche d'une loi d'échelle par calcul (p.ex. récipients sous pression) et/ou calage empirique (p.ex. réfrigérateurs cryogéniques d'hélium)

Loi d'apprentissage

Exemple des dipôles supraconducteurs du LHC



Modélisation de loi d'apprentissage

U.S. Department of Defense, *Joint Industry Government Parametric Estimating Handbook*, Second Edition (1999)

- Le **coût total** $P(N)$ des N premières unités est modélisé par une loi puissance:

$$P(N) = p_1 N^a \quad a < 1$$

p_1 étant le coût de la première unité et a le facteur d'apprentissage

- Le **coût moyen** $\langle p \rangle$ des N premières unités est donc:

$$\langle p \rangle = P(N)/N = p_1 N^{a-1}$$

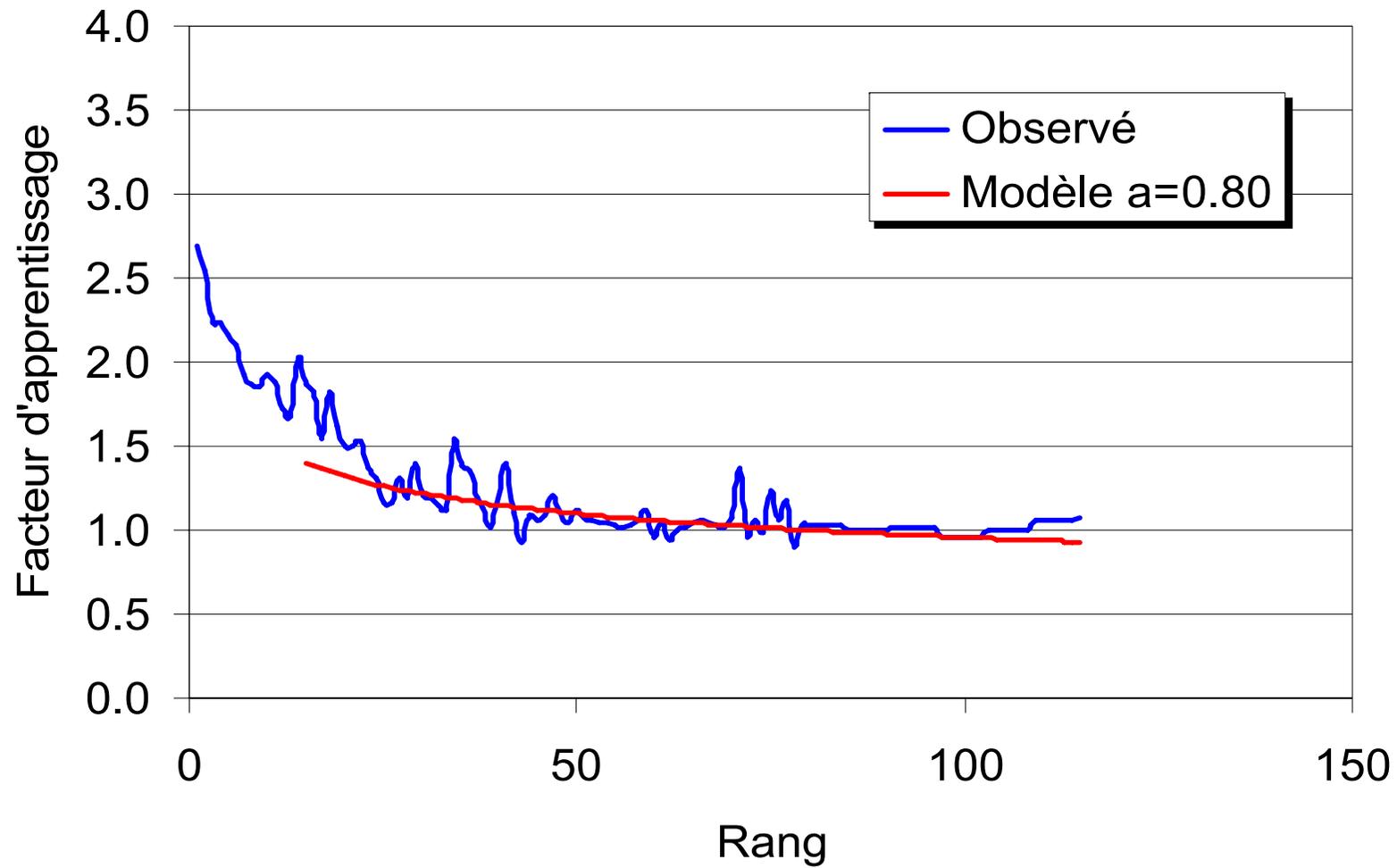
- On montre aisément que, **pour N grand**:

$$\begin{aligned} a &\approx p_n / \langle p \rangle \\ p_n / p_1 &\approx a N^{a-1} \\ p_n / p_{n-1} &\approx (N/N-1)^{a-1} \end{aligned}$$

p_n étant le coût de la n ème unité

- Ces formules permettent de « caler » le modèle sur des observations (pour N suffisamment grand, en pratique > 10)

Modélisation de loi d'apprentissage



Estimation des coûts

- Approche analytique
 - Etablissement de l'organigramme technique (WBS)
 - Définition des coûts unitaires et des quantités (y compris la consommation intermédiaire et les rebuts)
 - Estimation des coûts fixes
 - Estimation du coût total par sommation
 - Dans le cas de séries, prise en compte d'une loi d'apprentissage
- Approche synthétique
 - Recherche d'un ou plusieurs estimateurs d'échelle et de leurs conditions et domaines d'application
 - Recherche d'une loi d'échelle par calcul (p.ex. récipients sous pression) et/ou calage empirique (p.ex. réfrigérateurs cryogéniques d'hélium)

Modèle de coût des réservoirs à gaz sous pression

- On démontre que
 - pour une géométrie donnée (cylindrique ou sphérique),
 - pour une contrainte admissible dans l'acier σ_{acier} donnée,
 - pour une capacité massique de stockage de gaz m_{gaz} donnée à température T ,

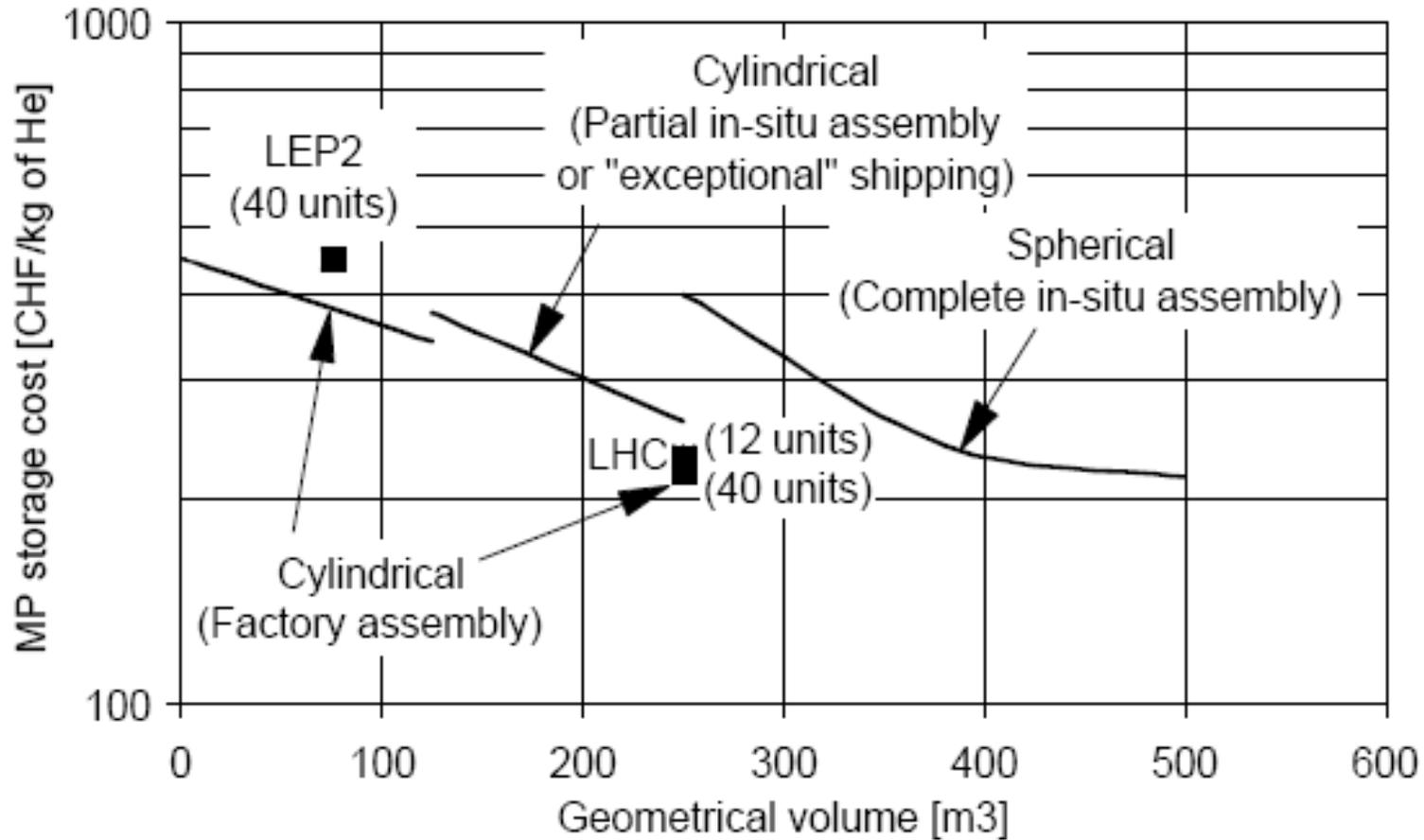
la masse d'acier m_{acier} du réservoir ne dépend ni de son diamètre, ni de sa pression de service

$$m_{\text{acier}}/m_{\text{gaz}} \approx 2 \rho_{\text{acier}} R T / M \sigma \text{ pour des cylindres}$$

$$m_{\text{acier}}/m_{\text{gaz}} \approx 60 \text{ pour He } (M = 4) \text{ à } T = 300 \text{ K et } \sigma_{\text{acier}} = 150 \text{ MPa}$$

- On peut donc utiliser comme **estimateur synthétique** le coût par kg de gaz stocké
- L'effet d'échelle, dû aux coûts fixes, est visible sur un diagramme coût par kg de gaz en fonction du volume géométrique du réservoir

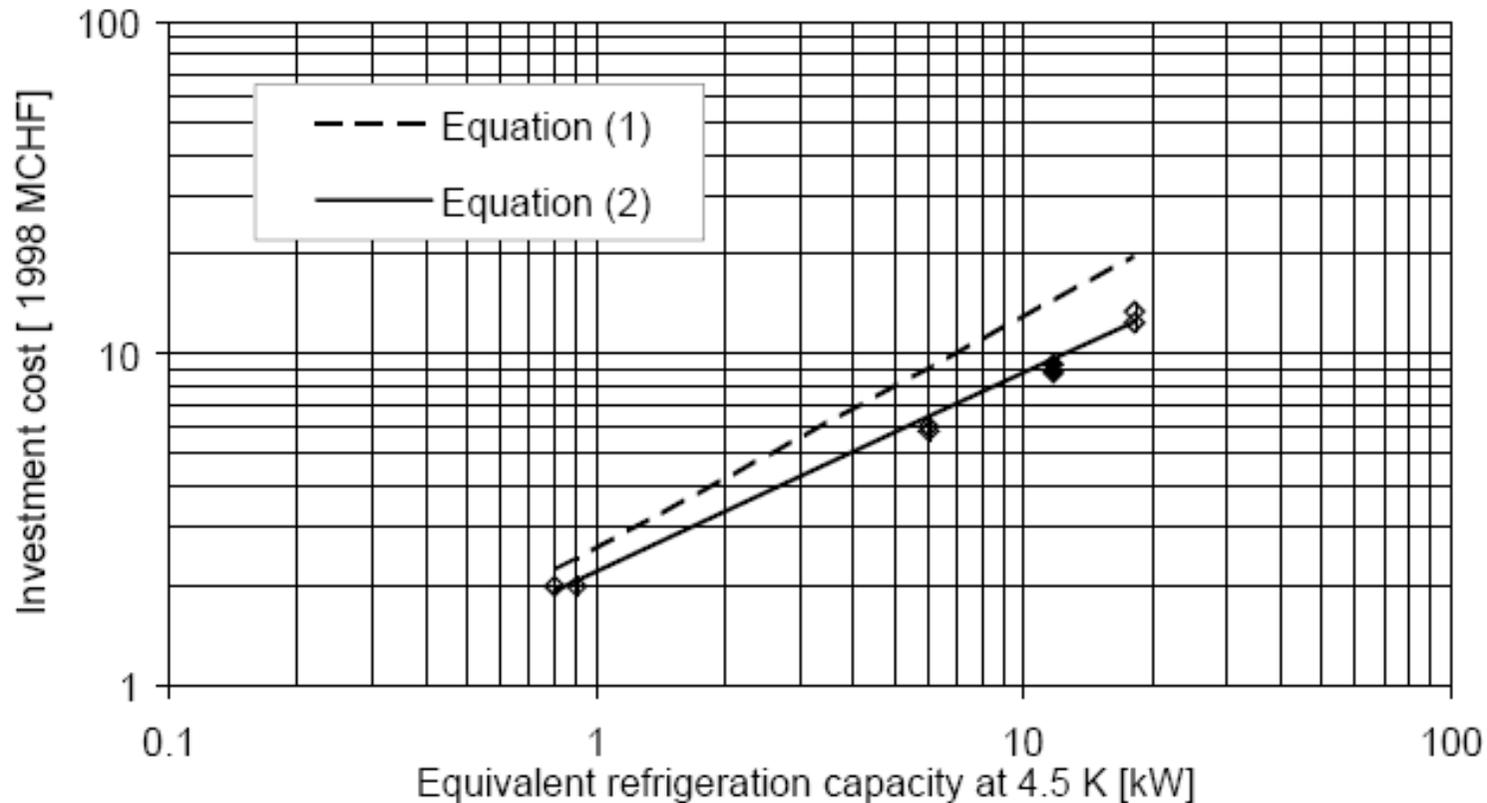
Coût des réservoirs à gaz sous pression



Réservoirs 250 m³ d'hélium gazeux à 2 MPa



Lois d'échelle (empiriques) du coût des réfrigérateurs cryogéniques



$$\text{Cost}[1998 \text{ MCHF}] = 2.6 * (\text{Capacity}[\text{kW}@4.5\text{K}])^{0.7} \quad (1)$$

$$\text{Cost}[1998 \text{ MCHF}] = 2.2 * (\text{Capacity}[\text{kW}@4.5\text{K}])^{0.6} \quad (2)$$

Un réfrigérateur d'hélium de 18 kW @ 4,5 K

Station de compression (~4 MW)



Boîte froide

Plan

- Le LHC, un grand instrument scientifique basé sur une technologie avancée
- Un projet global dans un environnement local
- Organisation, décision, communication
- Eléments de gestion des risques
- Coefficients de sécurité et facteurs d'incertitude
- Méthodologies d'estimation des coûts
- **Analyse probabiliste des risques de surcoûts**

Analyse de variabilité des coûts

Cause de variabilité	Evolution de configuration	Evolution du marché	Change, taxes, droits de douane	Difficultés d'exécution	Sous-estimation initiale
Lot 1					
Lot 2					
Lot 3					
Lot 4					
...					
Lot N					
Total					

Analyse probabiliste des coûts

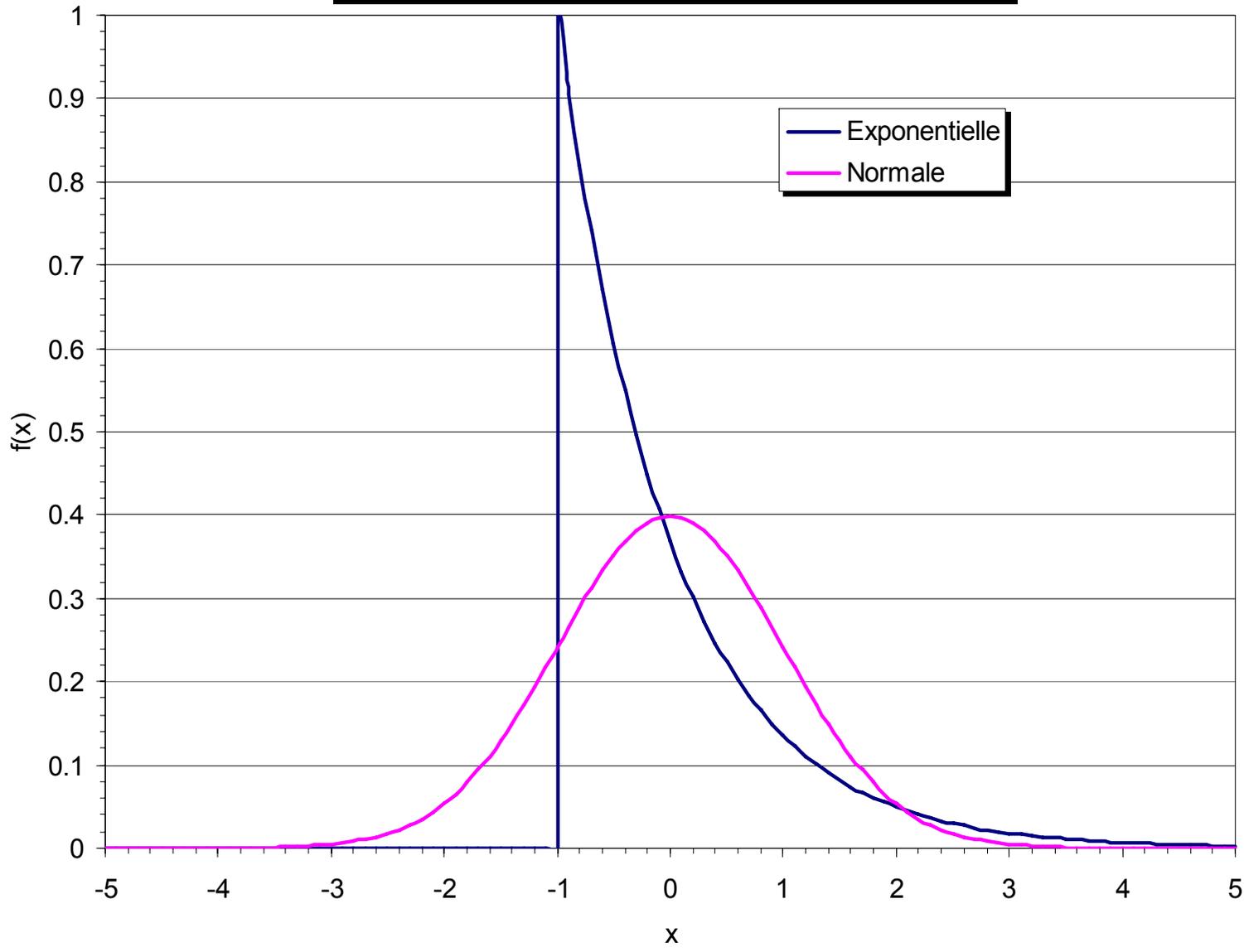
- Selon l'organigramme technique, le projet est divisé en lots dont les coûts sont des variables aléatoires supposées indépendantes X_i
 - de moyennes m_i
 - d'écart-types σ_i
- Le coût total du projet est une variable aléatoire $X = \sum X_i$
- La variable aléatoire X est
 - de moyenne $m = \sum m_i$
 - d'écart-type $\sigma = (\sum \sigma_i^2)^{1/2}$
- D'après le théorème centrale limite, la loi de distribution de X tend vers une loi normale
- La question est de déterminer les X_i

Modélisation statistique du coût des lots

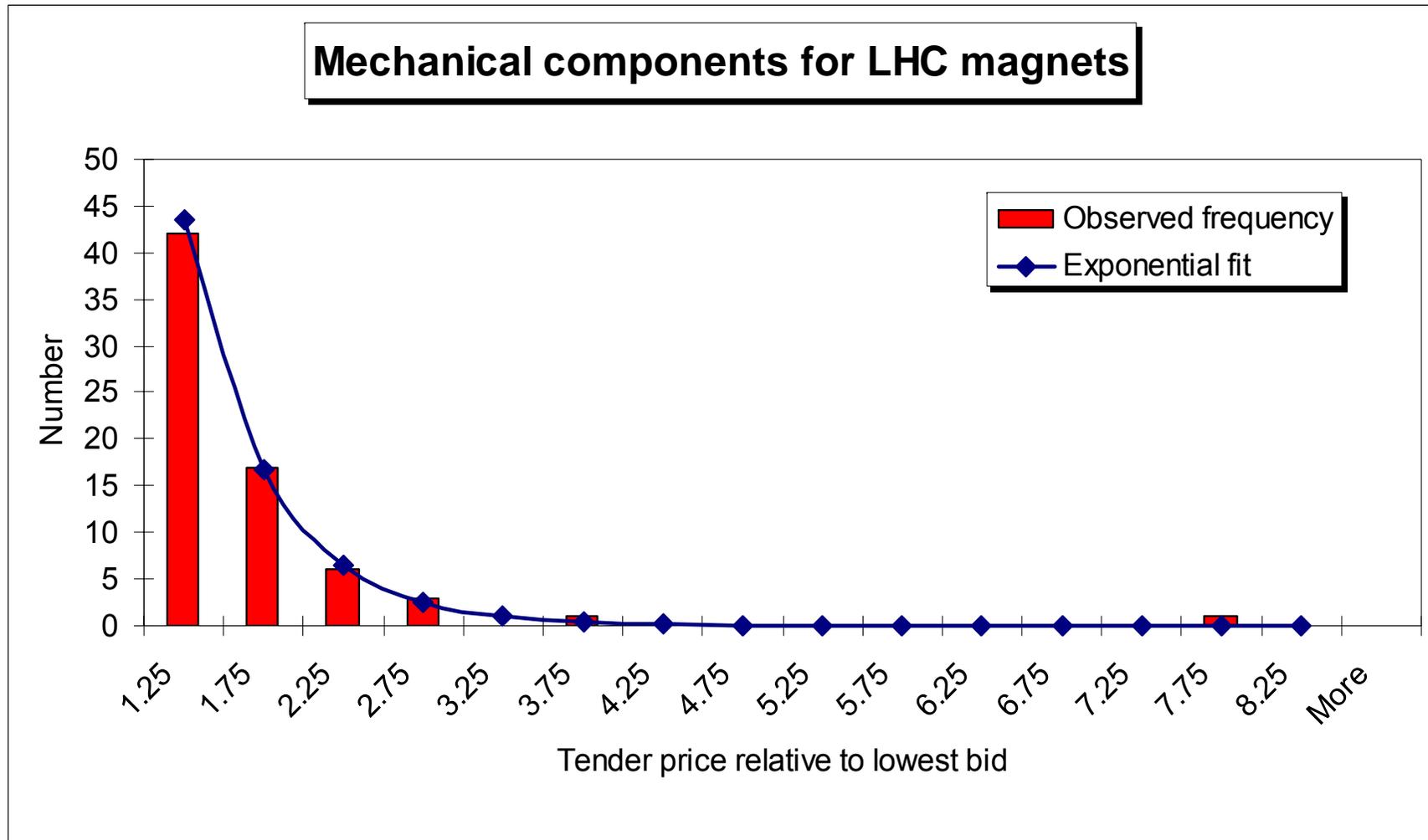
- Il est très rare que les lots coûtent *in fine* moins cher que leur estimation initiale, donc
 - les lois statistiques des X_i sont fortement asymétriques
 - les densités de probabilité $f_i(x_i)$ doivent être identiquement nulles en dessous de valeurs seuils b_i qui représentent les estimations initiales sans facteur de sécurité
 - les densités de probabilité $f_i(x_i)$ sont vraisemblablement uniformément décroissantes au-dessus des valeurs seuils b_i
- La loi exponentielle est une loi simple qui satisfait ces conditions

$$f(x) = 0 \quad \text{pour } x < b$$
$$f(x) = a \exp[-a(x-b)] \quad \text{pour } x \geq b$$
- Caractéristiques de la loi exponentielle
 - seuil b
 - moyenne $m = 1/a + b$
 - écart-type $\sigma = 1/a = m - b$
 - la moyenne est égale à la valeur seuil plus un écart-type

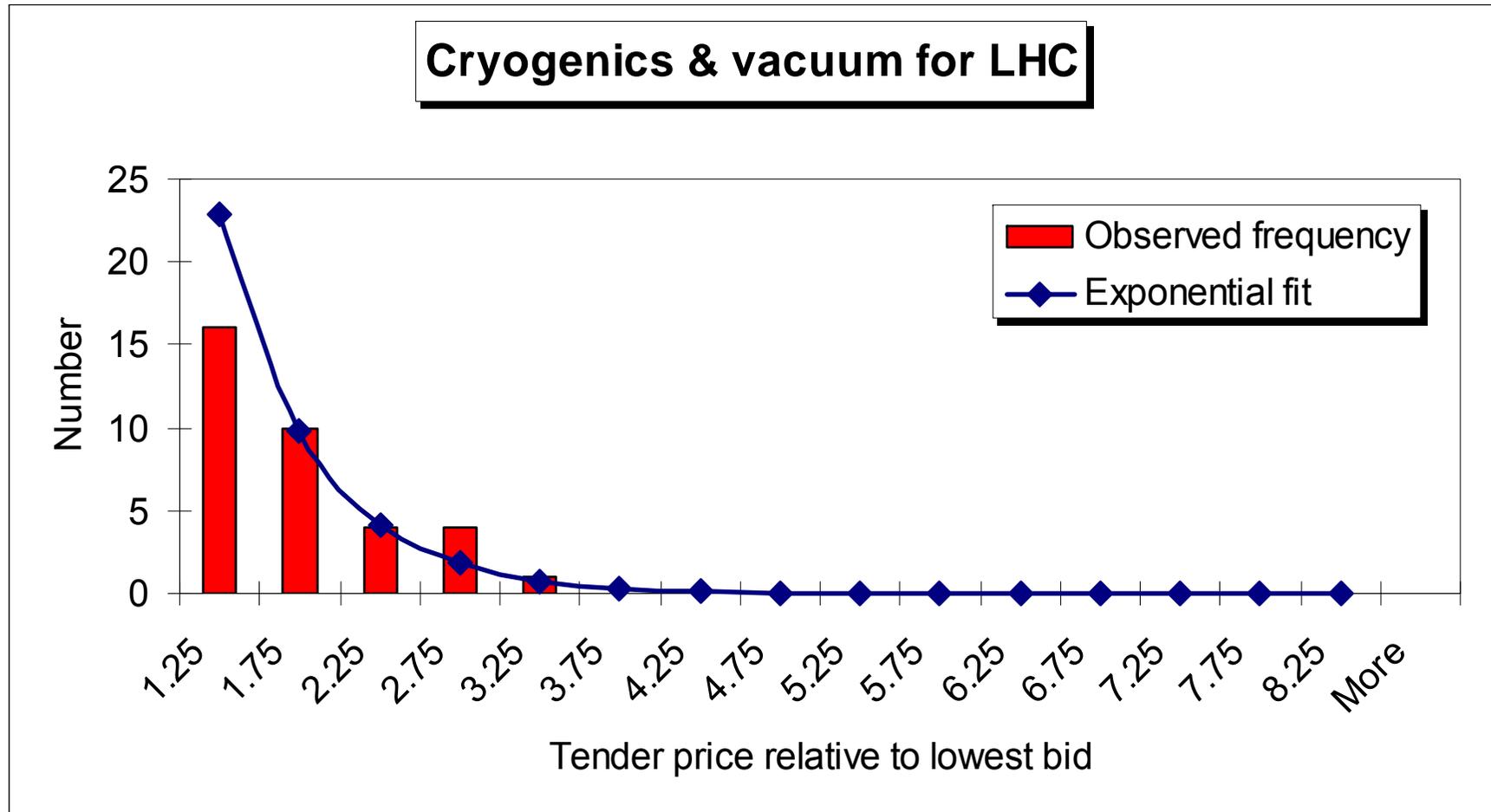
Densités de probabilité exponentielle et normale
($m = 0$, $\sigma = 1$)



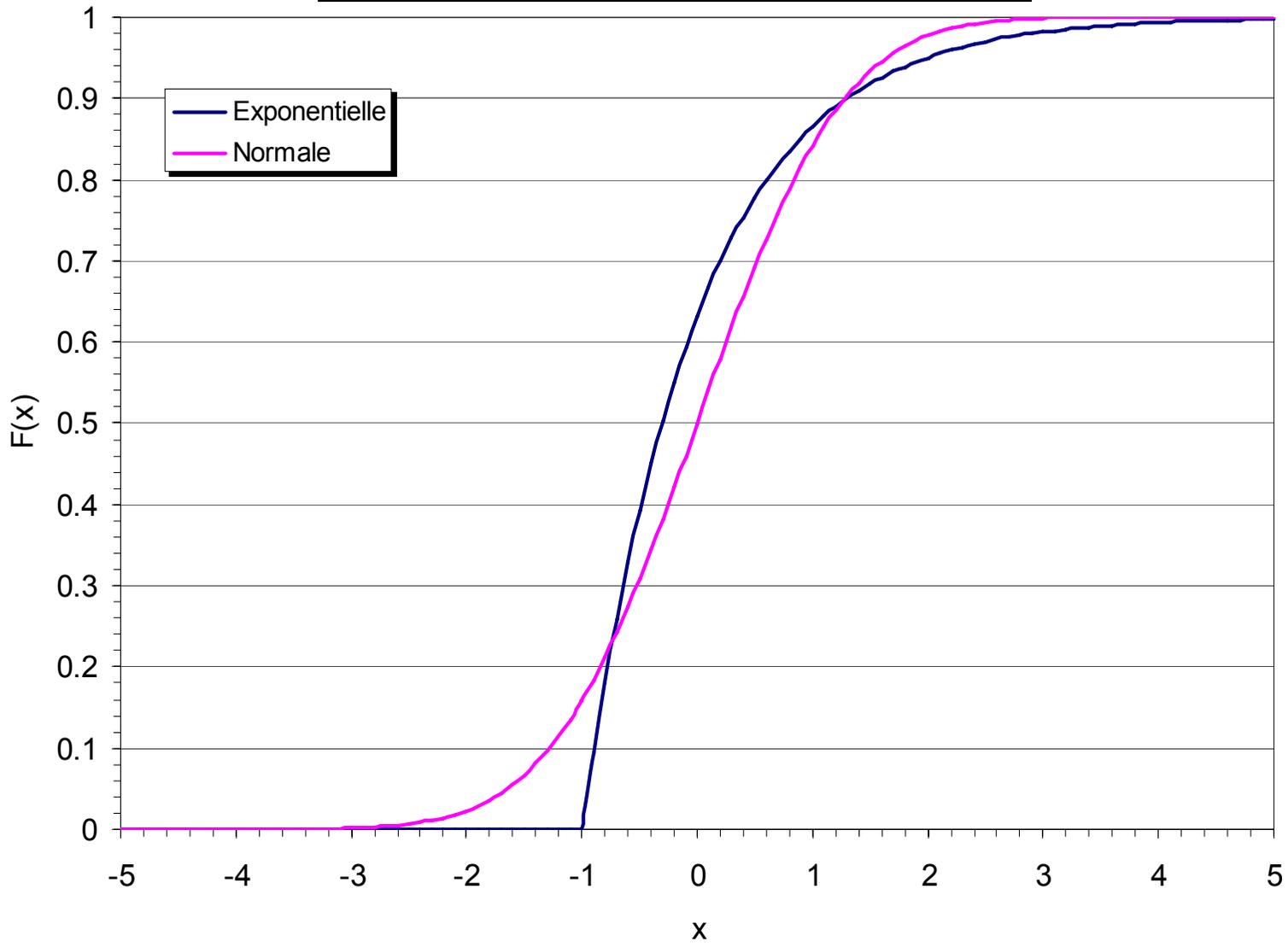
Fréquences observées du prix des offres reçues (une indication de la variabilité du coût des lots)



Fréquences observées du prix des offres reçues (une indication de la variabilité du coût des lots)



Fonctions de distribution exponentielle et normale
($m = 0$, $\sigma = 1$)



Comparaison des lois normale et exponentielle

- Selon la loi normale
 - $X \leq m - \sigma$ au niveau de confiance 15,9%
 - $X \leq m$ au niveau de confiance 50%
 - $X \leq m + 1,28 \sigma$ au niveau de confiance 90%
 - $X \leq m + 1,65 \sigma$ au niveau de confiance 95%
 - $X \leq m + 2,06 \sigma$ au niveau de confiance 98%
- Selon la loi exponentielle
 - $X \leq m - \sigma$ au niveau de confiance 0
 - $X \leq m$ au niveau de confiance 63,2%
 - $X \leq m + 1,30 \sigma$ au niveau de confiance 90%
 - $X \leq m + 2,00 \sigma$ au niveau de confiance 95%
 - $X \leq m + 2,91 \sigma$ au niveau de confiance 98%

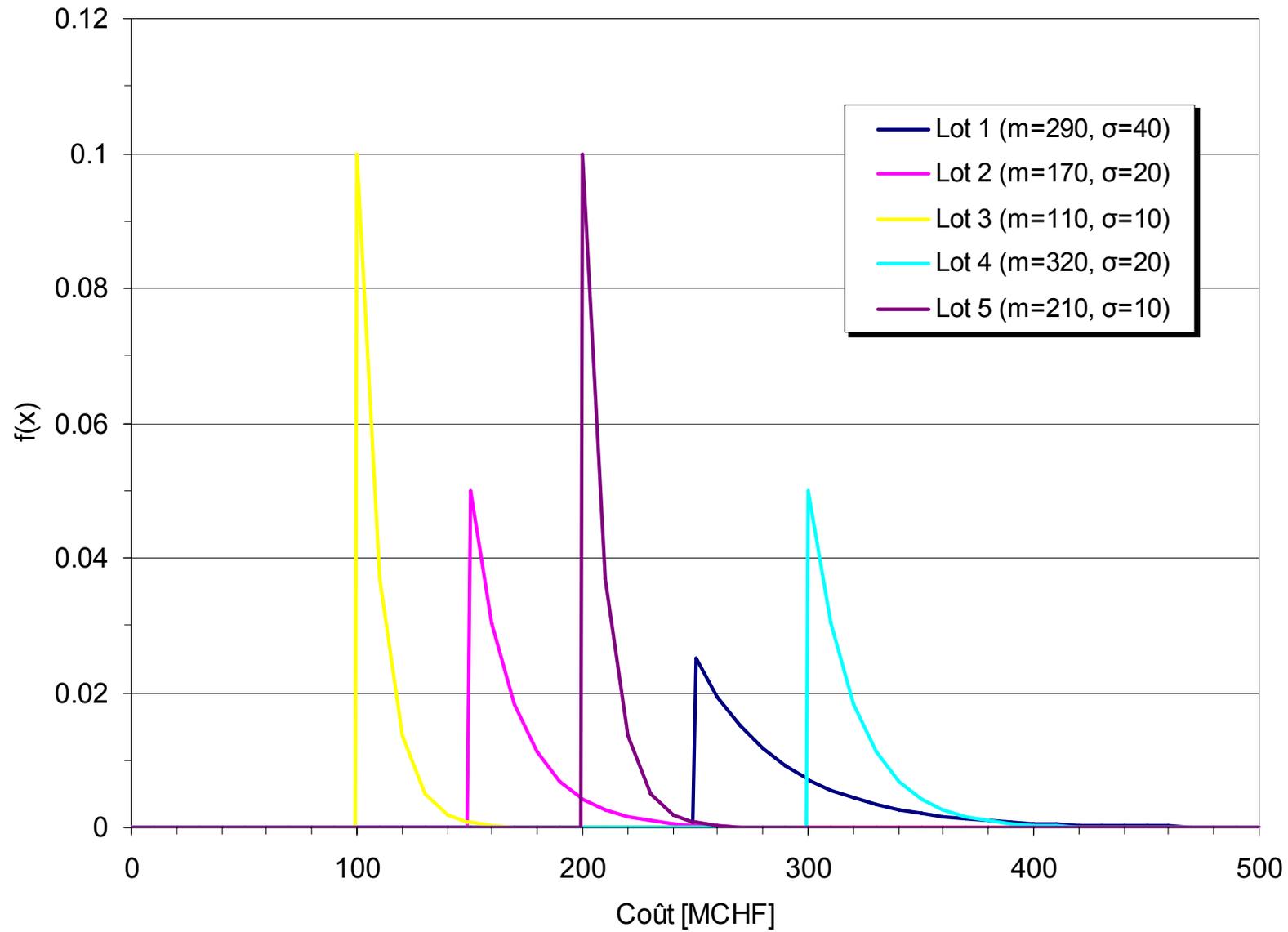
Exemple numérique: théorème centrale limite

- Soit un projet constitué de 5 lots selon le tableau ci-après

Lot	Seuil	Ecart-type	Moyenne	Variance
1	250	40	290	1600
2	150	20	170	400
3	100	10	110	100
4	300	20	320	400
5	200	10	210	100
Somme	1000	100	1100	2600
Sigma				50.9901951

- Si les lots sont statistiquement indépendants, le coût total est une variable aléatoire
 - de moyenne $m = \sum m_i = 1100$
 - d'écart-type $\sigma = (\sum \sigma_i^2)^{1/2} \approx 51$
- Sa loi tend vers une loi normale [1100, 51]
 - $X \leq 1165$ au niveau de confiance 90%
 - $X \leq 1184$ au niveau de confiance 95%
 - $X \leq 1205$ au niveau de confiance 98%

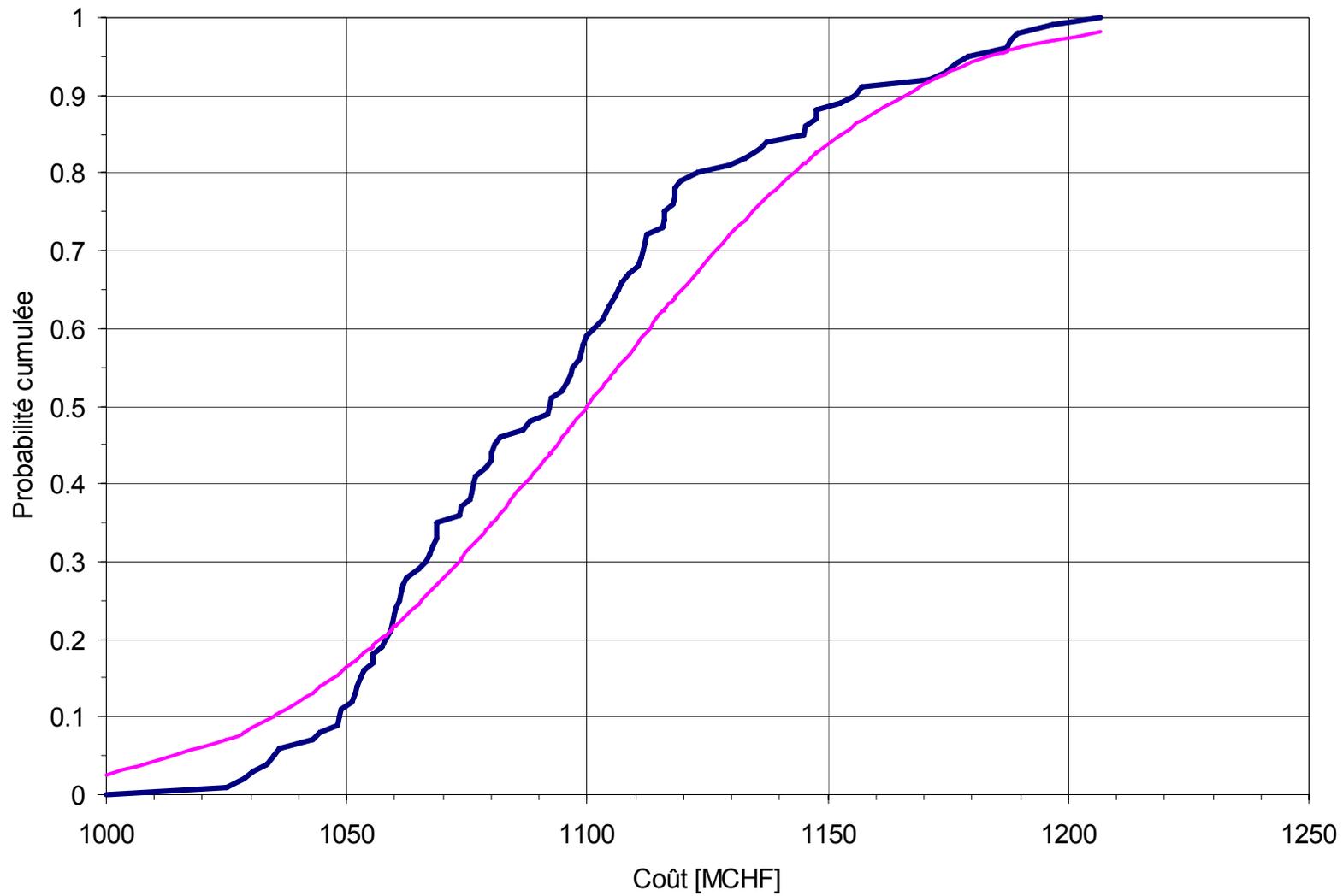
Densités de probabilité du coût des lots
(lois exponentielles)



Exemple numérique: simulation Monte Carlo

- Lots statistiquement indépendants
 - Pour chaque lot, on tire n nombres aléatoires équiprobables entre 0 et $\max[f_i(x_i)]$, et on calcule les x_i correspondants.
 - Pour chaque ensemble de 5 tirages, on calcule $x = \sum x_i$, et on trace la distribution des n réalisations de x .
 - La distribution expérimentale pour n grand tend vers la fonction de distribution de X
 - Le graphique suivant donne les résultats calculés avec EXCEL pour $n = 100$
- Cas de corrélation statistique
 - La simulation numérique permet d'introduire des corrélations statistiques entre les variables aléatoires qui représentent le coût des lots, par exemple une co-dépendance des indices économiques ou du prix de l'énergie et des matières premières.

Fonction de distribution du coût total du projet
(simulation Monte Carlo n = 100, comparée à une loi normale [1100, 51])



Quelques références

- H. Mintzberg, *Structure et dynamique des organisations*, Les Editions d'Organisation, Paris (1982)
- I. Chvidchenko, *Gestion des grands projets*, Cours de Sup'Aéro, CEPADUES Editions, Toulouse (1992)
- Ph. Lebrun et al., *Demands in refrigeration capacity for the Large Hadron Collider*, Proc. ICEC16 **1**, Elsevier Science (1997) pp.95-98
- *Systèmes spatiaux: gestion des risques*, norme ECSS-M-00-03A, ESA-ESTEC, Noordwijk (2000)
- S. Claudet et al., *Economics of large helium cryogenic systems: experience from recent projects at CERN*, Adv. Cryo. Eng. **45B** Plenum Publishers (2000), pp.1301-1308
- Ph. Lebrun, *The Large Hadron Collider: a megascience project*, Proc. 38th Eloisatron workshop, World Scientific (2001) pp. 11-20
- *Management de projet: gestion du risque*, norme FD X 50-117, AFNOR, Saint Denis (2003)
- Ph. Lebrun, *Industrial technology for unprecedented energy and luminosity: the Large Hadron Collider*, Proc. EPAC2004, JACoW website, pp. 6-10
- *Project Risk Management*, in PMBOK® Guide, 3rd edition, Project Management Institute, Newton Square (2004), pp. 237-268
- Ph. Lebrun, *Cryogénie et supraconductivité pour le grand collisionneur de hadrons du CERN*, Revue Générale du Froid **1050**, Jan-Fev 2005, pp. 33-40