



Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

Rapport préliminaire

de Sûreté du

LHC

1999

PREAMBULE

Le présent document est le Rapport Préliminaire de Sûreté du Projet LHC du CERN. Il fait partie de la procédure d'autorisation pour la création d'une installation nucléaire de base (INB).

Les chapitres I et II présentent des généralités et le chapitre III donne une description technique de l'installation.

Les risques radiologiques et non radiologiques pour les personnes et l'environnement sont respectivement traités dans les chapitres IV et V. Pour une meilleure compréhension du chapitre IV, le rapport CERN/TIS-RP/97-06 (Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement) est annexé à ce rapport.

Les mesures et contrôles du rayonnement et de la radioactivité autour de l'accélérateur LHC et son environnement sont décrits dans le chapitre VI.

Le chapitre VII énumère quelques règles générales d'exploitation du LHC (non exhaustif).

Une analyse critique de la sûreté du LHC est présentée dans le chapitre VIII.

Les figures citées en référence dans le texte se trouvent à la fin de chaque chapitre.

Ce rapport a été édité par Günter Rau, chargé de l'INB à la Direction des Accélérateurs (AC) du CERN.

Ont contribué à la rédaction de ce rapport les personnes des divisions suivantes:

AC: P. Faugeras ; P. Proudlock ; P. Lefèvre

EST: C. Arnaud ; K. Potter ; S. Weisz ; D. Lacarrere ; K. Kershaw

PS: K.H. Schindl

SL: P. Collier ; R. Rausch ; U. Jansson ; V. Mertens ; C. Fischer ; G. Fernqvist ; E. Weisse

ST: P. Ciriani ; E. Cennini ; C. Jacot ; J. Roche ; B. Pirollet ; H. Laeger

LHC: J.-M. Jimenez ; W. Erdt ; J. Vlogaert ; P. Lebrun ; G. Passardi ; O. Gröbner

TIS: M. Höfert ; J. Fivet ; A. Gilbert ; W. Weingarten ; P. Vojtyla ; T. Otto ; G. Stevenson ; M. Silari

Ce rapport a été approuvé par L. Evans, directeur du projet LHC.

TABLE DES MATIERES

I INTRODUCTION

II LE SITE DU LHC ET L'ETAT ACTUEL DE L'ENVIRONNEMENT

- 1 SITUATION ET LIMITES DU PERIMETRE DES INSTALLATIONS DU LHC ET DES INSTALLATIONS CONNEXES
- 2 SOL ET SOUS-SOL
- 3 HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE
- 4 CONDITIONS CLIMATIQUES
- 5 ETAT RADIOLOGIQUE DU SITE APRES LE LEP ET AVANT LE LHC
- 6 ENVIRONNEMENT HUMAIN

III CARACTERISTIQUES GENERALES DU LHC ET DE SES INSTALLATIONS CONNEXES

- 1 DESCRIPTION GENERALE
 - 1.1 Description et caractéristiques principales du LHC
 - 1.2 Mode de fonctionnement du LHC
- 2 DESCRIPTION DES INSTALLATIONS D'INJECTION
 - 2.1 Description générale
 - 2.2 Les accélérateurs du PS
 - 2.2.1 Le complexe PS (partie hadrons)
 - 2.2.2 Pré-injecteur de protons: caractéristiques du faisceau, schéma de base
 - 2.2.3 Pré-injecteur de protons: le projet des modifications du complexe PS
 - 2.2.4 Le CPS comme pré-injecteur des ions lourds (Pb)

2.3 Le SPS

- 2.3.1 Brève description du SPS
- 2.3.2 Le SPS et ses lignes de transfert
- 2.3.3 Caractéristiques du faisceau LHC dans le SPS
- 2.3.4 Cycles d'accélération du SPS pour le LHC
- 2.3.5 Modifications du SPS comme injecteur du LHC
- 2.3.6 Ions lourds dans le SPS

2.4 Les lignes de transfert des faisceaux TI2 et TI8

3 DESCRIPTION DU LHC

3.1 Structure générale

3.2 Les ouvrages souterrains

3.3 Les ouvrages de surface

3.4 Les principaux éléments de l'accélérateur

- 3.4.1 Les cryoaimants
- 3.4.2 L'alimentation électrique des cryoaimants
- 3.4.3 Le système cryogénique
- 3.4.4 Le système de pompage pour vide
- 3.4.5 Le système d'accélération et ses alimentations
- 3.4.6 Le pilotage du faisceau et les éléments de correction
- 3.4.7 Le système de contrôle de la machine

3.5 Les expériences

- 3.5.1 Généralités
- 3.5.2 Les zones expérimentales UX 15 et UX 55
- 3.5.3 Les zones expérimentales UX 25 et UX 85
- 3.5.4 Techniques employées dans les expériences LHC
- 3.5.5 Le système de supervision générale

3.6 Contrôle d'accès et verrouillage de sécurité

- 3.6.1 Définitions des zones d'accès au LHC
- 3.6.2 Modes d'accès à l'accélérateur
- 3.6.3 Les systèmes de sécurité et les éléments importants de la sûreté
- 3.6.4 Etats et acheminements des signaux de sûreté EIS
- 3.6.5 Le système d'interverrouillage
- 3.6.6 Le système d'arrêt des faisceaux

3.7 Les équipements auxiliaires

- 3.7.1 Les systèmes de télécommunications
- 3.7.2 Le système de refroidissement par eau
- 3.7.3 L'alimentation et la distribution électrique
- 3.7.4 Stockage et distribution de gaz et mélanges gazeux pour les expériences
- 3.7.5 Stockage et distribution des fluides du système cryogénique
- 3.7.6 Le système de ventilation
- 3.7.7 Le transport et les manutentions

IV INVENTAIRE DES RISQUES RADIOLOGIQUES

1 INTRODUCTION

- 1.1 Rappel des interactions de protons à haute énergie
- 1.2 Nature et localisation des sources de rayonnement ionisant
 - 1.2.1 Nature de la radioactivité dans le LHC
 - 1.2.2 Estimation de la radioactivité dans le LHC
 - 1.2.3 Les collimateurs
 - 1.2.4 Les zones expérimentales
 - 1.2.5 Les blocs absorbeurs
 - 1.2.6 Les pertes de faisceau autour du LHC
- 1.3 Fonctionnement du LHC avec des ions lourds
- 1.4 Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement
- 1.5 Les rayonnements diffusés et les blindages du LHC
- 1.6 La protection de l'environnement

2 EVALUATION DES RISQUES RADIOLOGIQUES EN GENERAL

- 2.1 La transformation des champs de rayonnements en dose
- 2.2 L'évaluation de la radioactivité
- 2.3 Radioactivité induite et débit de dose
- 2.4 Description des risques radiologiques du LHC en général
- 2.5 Autres risques radiologiques

3 LES RISQUES RADIOLOGIQUES SPECIFIQUES

4 REFERENCES

5 ANNEXES

V INVENTAIRE DES RISQUES NON RADIOLOGIQUES ET PRINCIPE DE LEUR PREVENTION

1 RISQUE ELECTRIQUE

1.1 Inventaire des zones à risques électriques et de leurs composants

1.1.1 Locaux de service électriques (selon la norme UTE C12-100)

1.1.2 Bâtiments de surface à usage semi-industriel ou expérimental

1.1.3 Locaux souterrains à usage semi-industriel et expérimental

1.1.4 Ouvrages de liaisons

1.2 Principe de la prévention des risques électriques

1.2.1 Prévention des risques inhérents à toute installation électrique

1.2.2 Prévention des risques particuliers dans d'importants ouvrages souterrains ayant leur origine dans le réseau électrique

2 INCENDIE

2.1 Inventaire des risques d'origine électrique

2.2 Inventaire des risques d'origine non électrique

2.3 Prévention d'incendie

2.4 Moyens d'intervention contre le feu

2.5 Organisation de l'intervention contre le feu

2.6 Désenfumage

2.7 Evacuation

2.8 Formation du personnel intervenant en milieu souterrain

2.9 Procédures à respecter

-
- 3 EQUIPEMENTS SOUS PRESSION ET GAZ INFLAMMABLES
 - 3.1 Inventaire des risques dans les expériences (gaz inflammables)
 - 3.2 Système et équipements cryogéniques
 - 3.3 Recharge des batteries
 - 4 CHOCS ET CHUTES
 - 4.1 Inventaire des moyens de levage et de transport vertical
 - 4.2 Principe général de la prévention
 - 4.3 Dispositions particulières
 - 5 GAZ NOCIFS
 - 6 BRUIT
 - 6.1 Inventaire des risques
 - 6.2 Réglementations applicables
 - 6.3 Principes de la prévention
 - 7 INONDATIONS
 - 7.1 Inventaire des risques
 - 7.2 Principes de la prévention
 - 8 CHAMPS MAGNETIQUES DANS LES EXPERIENCES
 - 9 SYSTEMES D'ALARMES DE SECURITE
 - 9.1 Classification des alarmes
 - 9.2 Diffusion des alarmes
 - 9.3 Installation, test et entretien des systèmes d'alarmes de sécurité
 - 10 SEISMES
 - 11 INSTALLATIONS CLASSEES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (ICPE)

VI PREVENTION ET CONTROLE RADIOLOGIQUE

1 ORGANISATION DE LA PREVENTION RADIOLOGIQUE

- 1.1 Objectifs de la radioprotection
- 1.2 Les normes radiologiques
- 1.3 Classification et surveillance des locaux
- 1.4 Classification des zones avec radioactivité induite

2 PRINCIPES DE CONTROLE DES RISQUES RADIOLOGIQUES

- 2.1 Surveillance du personnel
- 2.2 Information du personnel

3 DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

- 3.1 Rayonnements diffusés
- 3.2 Radioactivité induite
- 3.3 Radioactivité dans l'eau
- 3.4 Radioactivité dans l'air
- 3.5 Traitement et acquisition des données
- 3.6 Emplacement des moniteurs autour de l'accélérateur et des zones expérimentales

4 DOSIMETRIE INDIVIDUELLE

- 4.1 Dosimétrie passive (photons et bêta)
- 4.2 Dosimétrie passive de neutrons
- 4.3 Dosimétrie active
- 4.4 Assurance de la qualité

5 CONTROLE DE L'ENVIRONNEMENT

- 5.1 Programme de mesure

- 5.2 Contrôle de l'impact radiologique
- 5.3 Instrumentation du Laboratoire de l'Environnement
- 5.4 Assurance de la qualité

6 MATERIEL ET DECHETS RADIOACTIFS

- 6.1 Transport des matériaux radioactifs
 - 6.1.1 Transport à l'intérieur des zones clôturées du CERN
 - 6.1.2 Transport entre les zones clôturées du CERN
 - 6.1.3 Transport hors du CERN
- 6.2 Stockage et élimination des matériaux radioactifs
 - 6.2.1 Stockage des matériaux radioactifs au CERN
 - 6.2.2 La gestion des déchets radioactifs
 - 6.2.3 Le traitement des déchets radioactifs
 - 6.2.4 Assurance de la qualité
 - 6.2.5 Le recyclage des matériaux radioactifs
 - 6.2.6 L'élimination des déchets radioactifs
- 6.3 Démantèlement du LHC

7 REFERENCES

VII REGLES GENERALES D'EXPLOITATION DU LHC

1 ORGANISATION DE LA SECURITE AU CERN

- 1.1 Généralités
- 1.2 Structures hiérarchiques et responsabilité en matière de sécurité
- 1.3 La réglementation de la sécurité au CERN
- 1.4 La Commission de l'Inspection Technique et de la Sécurité (TIS)
- 1.5 La sécurité des entreprises

2 ORGANISATION DE LA PREVENTION GENERALE

- 2.1 Exploitation du LHC et de ses expériences

- 2.2 Consignes de sécurité et formation du personnel
- 2.3 Contrôle et essais des systèmes et éléments de sécurité
- 2.4 Gestion des consignes de sécurité
- 2.5 Attitude et conduite en cas d'accident ou d'incident
- 3 ORGANISATION DU SERVICE DE SECOURS ET DU FEU
- 4 EXPLOITATION DES SYSTEMES DE CONTROLE D'ACCES ET DE VERROUILLAGE
 - 4.1 Mise en route de l'accélérateur
 - 4.2 Arrêt de l'accélérateur
 - 4.3 Assurance de la qualité

VIII ANALYSE CRITIQUE DE LA SURETE DU LHC

- 1 SURETE DANS L'INSTALLATION SUITE A UN INCIDENT RADIOLOGIQUE
- 2 SURETE DANS L'INSTALLATION SUITE A UN INCIDENT NON RADIOLOGIQUE
- 3 EJECTION ET ARRET DES FAISCEAUX
- 4 CONCLUSIONS

I INTRODUCTION

Le CERN est un laboratoire intergouvernemental créé le 1er juillet 1953 par treize états européens. Actuellement, vingt pays européens font partie du CERN : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Bulgarie, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Italie, la Norvège, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, le Royaume-Uni, la République Slovaque, la République Tchèque, la Suède et la Suisse.

Le siège du CERN est à Genève. Son domaine se situe en France et en Suisse, de part et d'autre de la frontière.

La mission du CERN est la recherche fondamentale dans le domaine de l'infiniment petit, c'est-à-dire celui de la physique des particules. A cette fin, il remplit les missions suivantes : il conçoit, construit et assure le fonctionnement d'accélérateurs de particules de haute énergie, ainsi que de grands détecteurs nécessaires aux travaux de recherche. Il accueille environ 6000 scientifiques venant participer à ces travaux et assure leur appui technique. En relation avec les représentants des universités et des instituts de physique des hautes énergies du monde entier, il organise une sélection des expériences à effectuer sur ses installations et prend lui-même une part active aux travaux de recherche.

Financé essentiellement par les contributions de ses Etats-membres, le budget du CERN s'élève en 1998 à 875 millions de francs suisses. Son personnel titulaire compte environ 2800 fonctionnaires (1998).

Pour le nouveau projet LHC, certains pays non membres de l'Organisation (Etats Unis, Canada, Russie, Japon, Inde) ont accepté de contribuer à la réalisation de l'accélérateur et de ses expériences dans le but que des chercheurs de ces pays puissent aussi bénéficier du LHC pour étudier la structure ultime de la matière.

Aujourd'hui, les équipements d'accélération et de stockage de particules exploités au CERN sont les suivants :

Désignation	Energie	Date de mise en service
Synchrotron PS	28 GeV	1959
Synchrotron SPS	450 GeV	1976
Collisionneur électron-positon LEP	100 GeV	1989

En décembre 1994, le Conseil du CERN, organe directeur de l'Organisation, formé des représentants des Etats-membres, a décidé à l'unanimité la réalisation d'un nouvel instrument appelé LHC (Large Hadron Collider) après que l'ECFA (European Committee for Future Accelerators), expression des physiciens européens de la discipline, l'eût recommandé à une très forte majorité.

Le LHC sera installé dans le tunnel du LEP de 27 km de circonférence, qu'il remplacera comme outil principal d'expérimentation dans le domaine de la physique des particules pour les prochaines décennies.

L'existence du tunnel LEP et des accélérateurs PS et SPS utilisables comme injecteurs du LHC, ainsi que la présence d'un personnel qualifié et l'importance des infrastructures existantes ont été les arguments prépondérants pour l'acceptation du projet LHC par le Conseil du CERN.

Pour le LEP, une procédure équivalente relative aux installations nucléaires de base (INB) a été appliquée par le CERN au travers d'une convention signée par l'Etat français et l'Organisation le 31 octobre 1984.

Pour garantir la sûreté des installations du LHC sur le territoire français, le CERN appliquera les réglementations en vigueur relatives à la sûreté des installations nucléaires de base.

Le présent document constitue le rapport préliminaire de sûreté du projet LHC dans le cadre de la demande d'autorisation de création d'une installation nucléaire de base pour le projet LHC.

the first 1000 cases of the 1998-1999 season. The number of cases in the 1998-1999 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 1997-1998 season. The number of cases in the 1999-2000 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 1998-1999 season.

The number of cases in the 2000-2001 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 1999-2000 season. The number of cases in the 2001-2002 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2000-2001 season.

The number of cases in the 2002-2003 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2001-2002 season. The number of cases in the 2003-2004 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2002-2003 season.

The number of cases in the 2004-2005 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2003-2004 season. The number of cases in the 2005-2006 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2004-2005 season.

The number of cases in the 2006-2007 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2005-2006 season. The number of cases in the 2007-2008 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2006-2007 season.

The number of cases in the 2008-2009 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2007-2008 season. The number of cases in the 2009-2010 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2008-2009 season.

The number of cases in the 2010-2011 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2009-2010 season. The number of cases in the 2011-2012 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2010-2011 season.

The number of cases in the 2012-2013 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2011-2012 season. The number of cases in the 2013-2014 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2012-2013 season.

The number of cases in the 2014-2015 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2013-2014 season. The number of cases in the 2015-2016 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2014-2015 season.

The number of cases in the 2016-2017 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2015-2016 season. The number of cases in the 2017-2018 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2016-2017 season.

The number of cases in the 2018-2019 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2017-2018 season. The number of cases in the 2019-2020 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2018-2019 season.

The number of cases in the 2020-2021 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2019-2020 season. The number of cases in the 2021-2022 season was 1000, which is 100% of the number of cases in the 2020-2021 season.

II LE SITE DU LHC ET L'ETAT ACTUEL DE L'ENVIRONNEMENT

Le projet LHC a fait l'objet d'une étude d'impact sur l'environnement en mars 1997^[1] traitant en détail des incidences de ce projet sur le site et son environnement. Ce qui suit est un court résumé de l'état actuel du site du LHC. Les effets du LHC sur l'environnement pendant l'exploitation de l'accélérateur seront traités au chapitre VI de ce rapport.

1 SITUATION ET LIMITES DU PERIMETRE DES INSTALLATIONS DU LHC ET DES INSTALLATIONS CONNEXES

Le tracé du tunnel du LHC passe en tréfonds à des profondeurs variant entre 50 et 170 m (voir figure II.1), sous le territoire des communes suivantes: Meyrin (CH), Prévessin, Saint Genis-Pouilly, Sergy, Crozet, Echenevex, Cessy, Versonnex, Ornex, Collex-Bossy (CH) et Ferney-Voltaire. Le tunnel traverse six fois la frontière franco-suisse sur son périmètre. Les points d'accès par des puits, au nombre de huit, sont distants d'environ 3 km les uns des autres et se situent comme suit:

Désignation du point d'Accès	Pays	Département ou Canton	Commune
PA1	CH	Genève	Meyrin
PA2	F	Ain	Sergy
PA3, PZ33	"	"	Crozet
PA4	"	"	Echenevex
PA5	"	"	Cessy
PA6	"	"	Versonnex
PA7	"	"	Ornex
PA8	"	"	Ferney-Voltaire

Autour de ces points d'accès, se trouvent des zones clôturées et des bâtiments abritant les différentes installations des services du LHC (périmètre des installations du LHC, voir chapitre III, section 3).

Le LHC est conçu pour permettre la collision des faisceaux en huit points équidistants. Quatre d'entre eux vont recevoir les quatre expériences du LHC: PA1 (ATLAS), PA2 (ALICE), PA5 (CMS) et PA8 (LHC-B).

Deux nouveaux tunnels de transfert (TI) permettront d'injecter dans le LHC des particules pré-accélérées dans le SPS. Ce sont:

- le TI2, un tunnel d'un diamètre de 3 m et d'une longueur de 2650 m reliant un ouvrage souterrain existant situé sur le Site de Meyrin (CH) à une chambre souterraine sur le tunnel existant près du point 2 du LHC;
- le TI8, un tunnel d'un diamètre de 3 m et d'une longueur de 2380 m reliant un ouvrage souterrain existant au point 4 du SPS à une chambre souterraine sur le tunnel LHC près du point 8 du LHC.

2 SOL ET SOUS-SOL

Déjà pour le projet LEP, des études géologiques poussées ont été effectuées sur les différents tracés du tunnel pour connaître de façon aussi précise que possible le substrat dans lequel les ouvrages souterrains doivent être réalisés.

Pour le Projet LHC, de nombreux sondages et forages ont été effectués dans les zones où des nouveaux ouvrages souterrains sont à réaliser, notamment aux:

- point 1, expérience ATLAS : on y trouve une moraine d'une épaisseur de 3 à 5 m qui repose directement sur la molasse;
- point 2, expérience ALICE : une galerie technique sera entièrement excavée dans la molasse grise;
- point 5, expérience CMS : dans le sillon de l'Oudard, on trouve le substratum molassique entre 30 et 40 m de profondeur avec une alternance très hétérogène de niveaux d'argile. Sous un niveau superficiel (8 à 10 m d'épaisseur) très argileux, puis un niveau d'alluvions d'une épaisseur très variable, on trouve un niveau très argileux, suivi d'une couche d'alluvions grossières;
- point 6, cavernes pour les arrêts de faisceau : ces ouvrages (y compris les deux tunnels de 750 m de longueur) seront entièrement excavés dans la molasse grise. Aucun nouveau puits n'est prévu;
- tunnel de transfert TI2 : ce tunnel sera excavé dans la molasse sur toute sa longueur;
- tunnel de transfert TI8: ce tunnel sera entièrement excavé dans la molasse grise, assez profondément sous la surface de contact avec les formations quaternaires.

3 HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

L'importance que présentent pour le Pays de Gex les ressources en eau, tirées essentiellement des sillons aquifères dans la Plaine du Léman, a conduit le CERN à effectuer des études hydrologiques poussées dans la zone d'implantation du LEP. Ces études, toujours d'actualité, ont été complétées pour le projet LHC, notamment dans la zone PA5 (Commune de Cessy).

L'ensemble des données recueillies permet de dresser l'état initial précis des lieux, de déterminer les bassins versants des rivières, d'évaluer les réserves d'eau souterraines et d'établir les relations pouvant exister entre les écoulements du Jura et les sillons aquifères de la plaine du Léman (voir figures II.2-a et II.2-b et paragraphe 6.5 de l'étude d'impact^[1] pour les détails).

4 CONDITIONS CLIMATIQUES

Les conditions climatiques de la zone d'implantation du LHC sont bien connues, grâce notamment aux mesures météorologiques effectuées par l'Office fédéral de Météorologie suisse de l'aéroport de Genève. Les températures moyennes mensuelles, l'ensoleillement mensuel, l'humidité relative et les précipitations moyennes mensuelles ainsi que la vitesse et la direction des principaux vents sont présentés sous forme graphique dans les figures II.3 à II.5.

5 ETAT RADIOLOGIQUE DU SITE APRES LE LEP ET AVANT LE LHC

L'état radiologique d'une région est déterminé par les sources naturelles de rayonnement ionisant. Il varie d'un endroit à un autre en fonction des caractéristiques des terrains et de leur altitude.

Le Groupe de Radioprotection (RP) du CERN effectue depuis des années des mesures de routine dans l'environnement autour des installations du CERN. Ces mesures incluent le contrôle de l'émission de la radioactivité dans l'air et dans l'eau, ainsi que sa dispersion dans l'environnement. Les résultats de ces mesures sont consignés dans des rapports mensuels, trimestriels ou annuels et transmis régulièrement aux autorités des pays-hôtes (OPRI pour la France, Office fédéral de la

Santé pour la Suisse) (voir aussi l'Etude d'Impact du Projet LHC ^[1] et son annexe 5, « Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement »).

Les résultats du programme de mesures effectuées avant et pendant le fonctionnement du LEP ont montré que l'influence radiologique du LEP sur l'environnement n'est pas détectable.

Il faut mentionner que les autorités des pays-hôtes effectuent elles-mêmes des mesures de contrôle du rayonnement ionisant et de la radioactivité dans l'air et dans l'eau autour des installations du CERN.

6 ENVIRONNEMENT HUMAIN

En 1996, on recensait 57577 habitants dans le Pays de Gex. La population des communes directement ou indirectement concernées par le Projet LHC est la suivante:

Cessy	2269
Chevry	743
Crozet	1331
Echenevex	1209
Ferney-Voltaire	7291
Gex	7694
Ornex	2267
Prévessin-Moëns	4400
St-Genis-Pouilly	6484
Segny	1219
Sergy	1386
Thoiry	4213
Versonnex	1869
Total	42375

Référence:

[1] Projet LHC: Etude d'impact sur l'environnement, 1997.

the 1990s, the number of people in the UK who are aged 65 and over has increased from 10.5 million to 13.5 million, and the number of people aged 75 and over has increased from 4.5 million to 6.5 million (Office for National Statistics 2000).

There is a growing awareness of the need to address the health care needs of the elderly population. The Department of Health (2000) has set out a strategy for the care of the elderly, which includes a commitment to improve the quality of care for the elderly. This strategy is based on the following principles:

- To ensure that the elderly are treated as individuals, with their own needs and preferences being taken into account.
- To ensure that the elderly are given the opportunity to live in their own homes, wherever possible.
- To ensure that the elderly are given the opportunity to participate in decisions about their care.
- To ensure that the elderly are given the opportunity to live a full and active life.

The Department of Health (2000) also states that the following are the key areas for action:

- Improving the quality of care for the elderly in residential care homes.
- Improving the quality of care for the elderly in the community.
- Improving the quality of care for the elderly in hospital.
- Improving the quality of care for the elderly in primary care.

The Department of Health (2000) also states that the following are the key areas for action in the community:

- Improving the quality of care for the elderly in the community.
- Improving the quality of care for the elderly in the community.
- Improving the quality of care for the elderly in the community.
- Improving the quality of care for the elderly in the community.

The Department of Health (2000) also states that the following are the key areas for action in hospital:

- Improving the quality of care for the elderly in hospital.
- Improving the quality of care for the elderly in hospital.
- Improving the quality of care for the elderly in hospital.
- Improving the quality of care for the elderly in hospital.

The Department of Health (2000) also states that the following are the key areas for action in primary care:

- Improving the quality of care for the elderly in primary care.
- Improving the quality of care for the elderly in primary care.

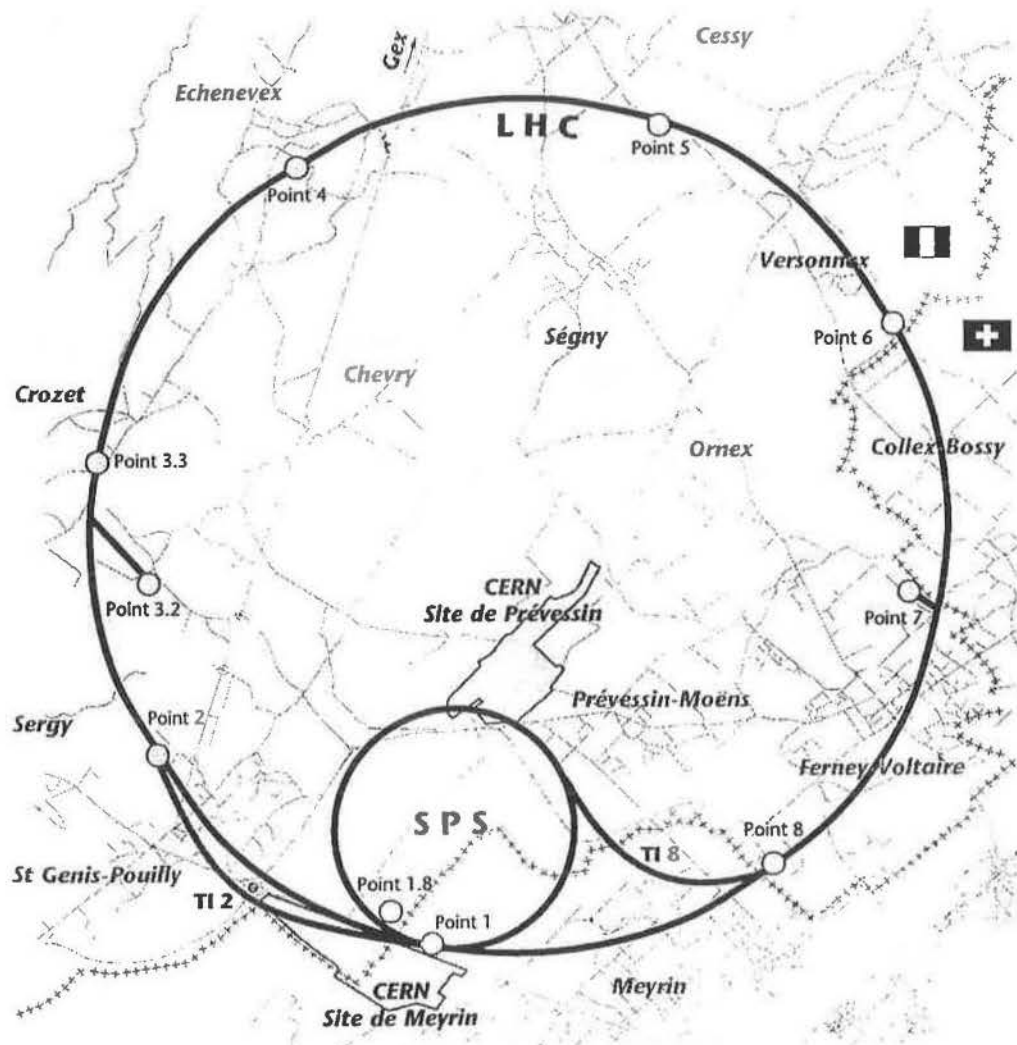


Figure II.1 - Plan de situation du LHC dans le Pays de Gex

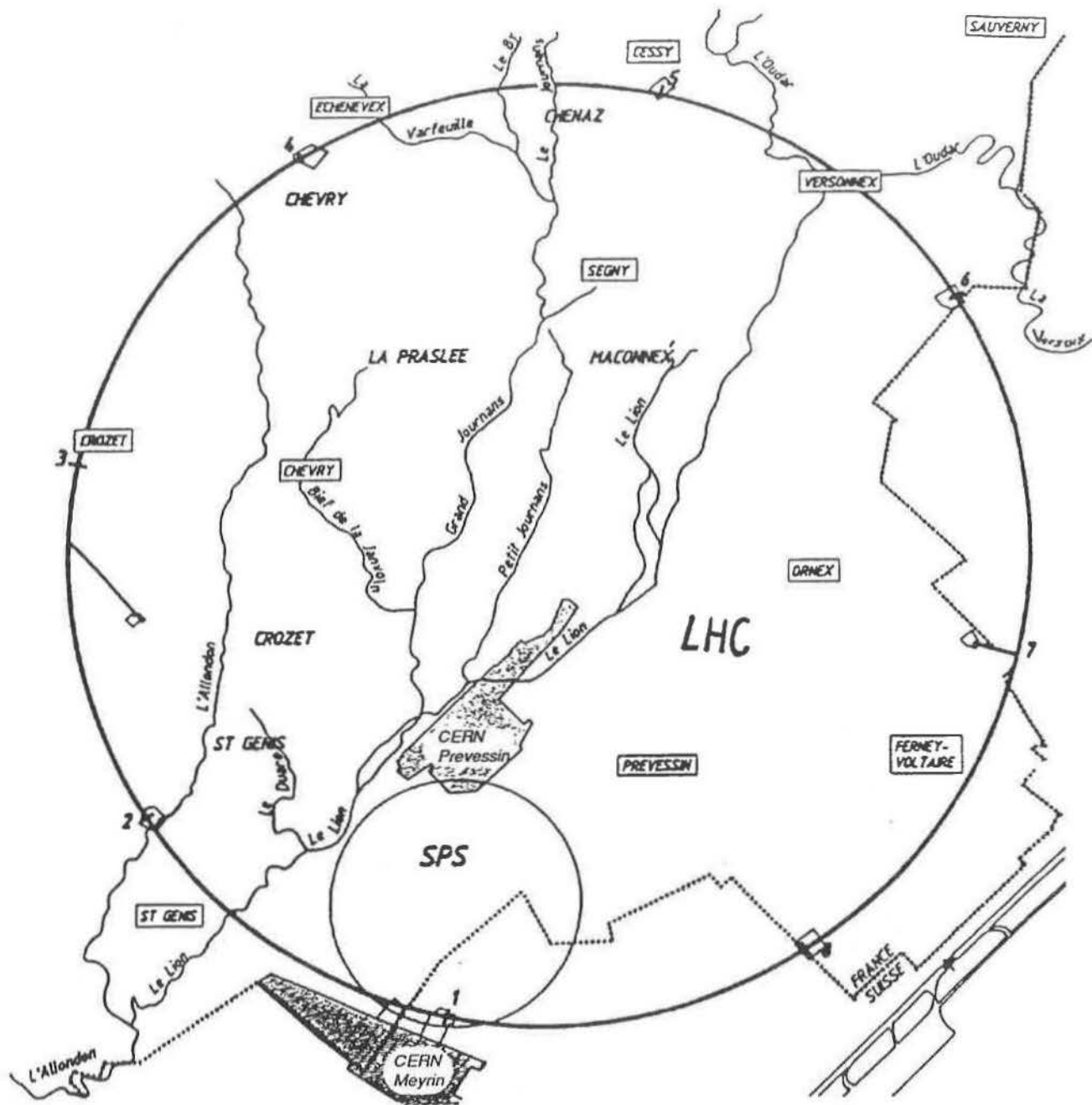


Figure II.2-a - Cours d'eau dans le Pays de Gex

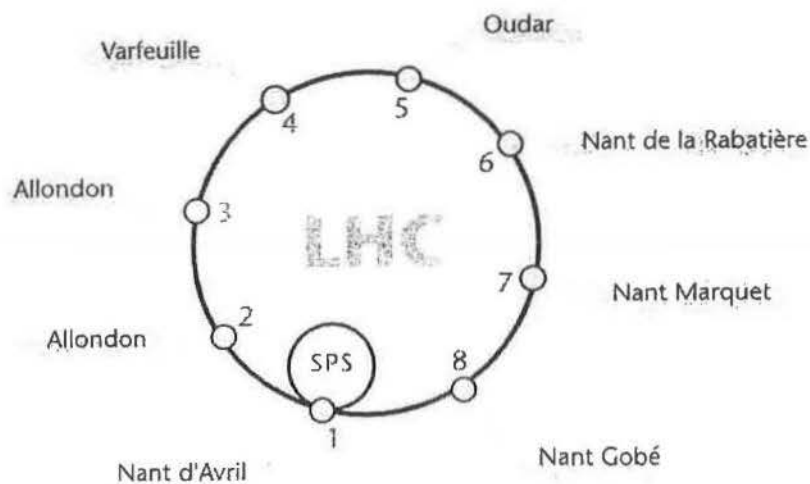


Figure II.2-b - Points de rejets des eaux pluviales et de drainage des sites LHC

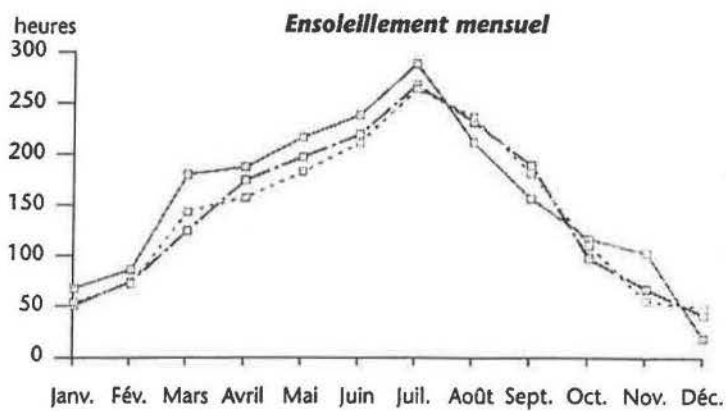
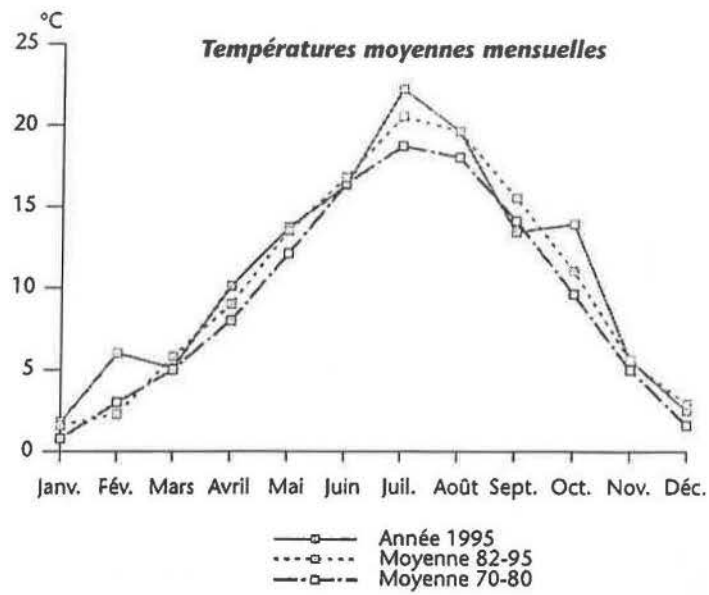


Figure II.3 - Températures moyennes et ensoleillement mensuel (1970-1995, Genève-Cointrin)

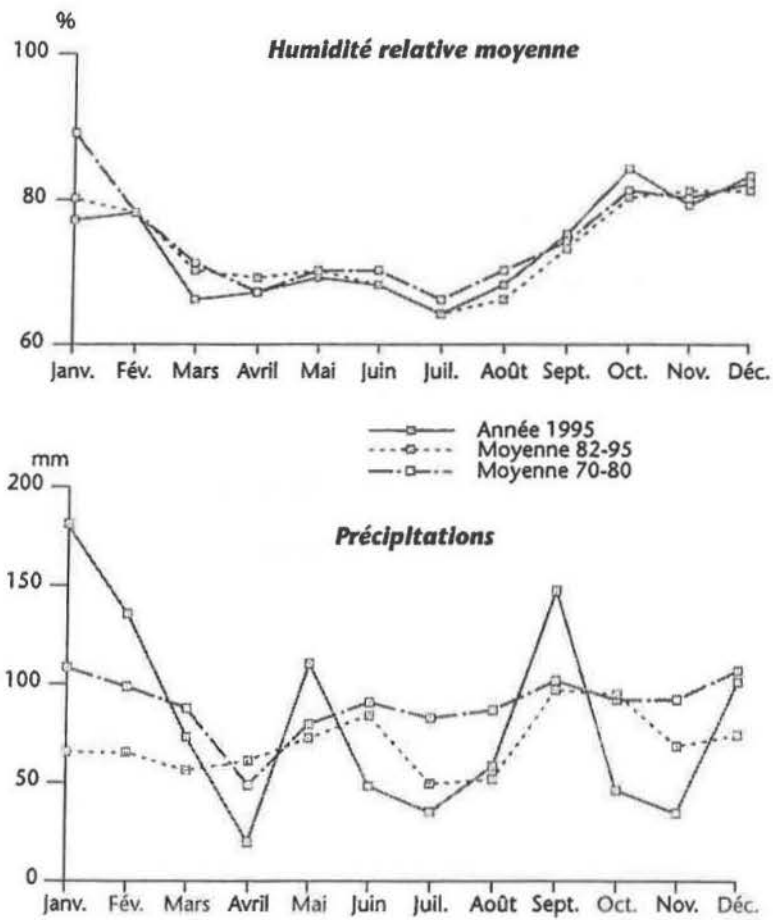


Figure II.4 - Humidité relative et précipitations mensuelles (1970-1995, Genève-Cointrin)

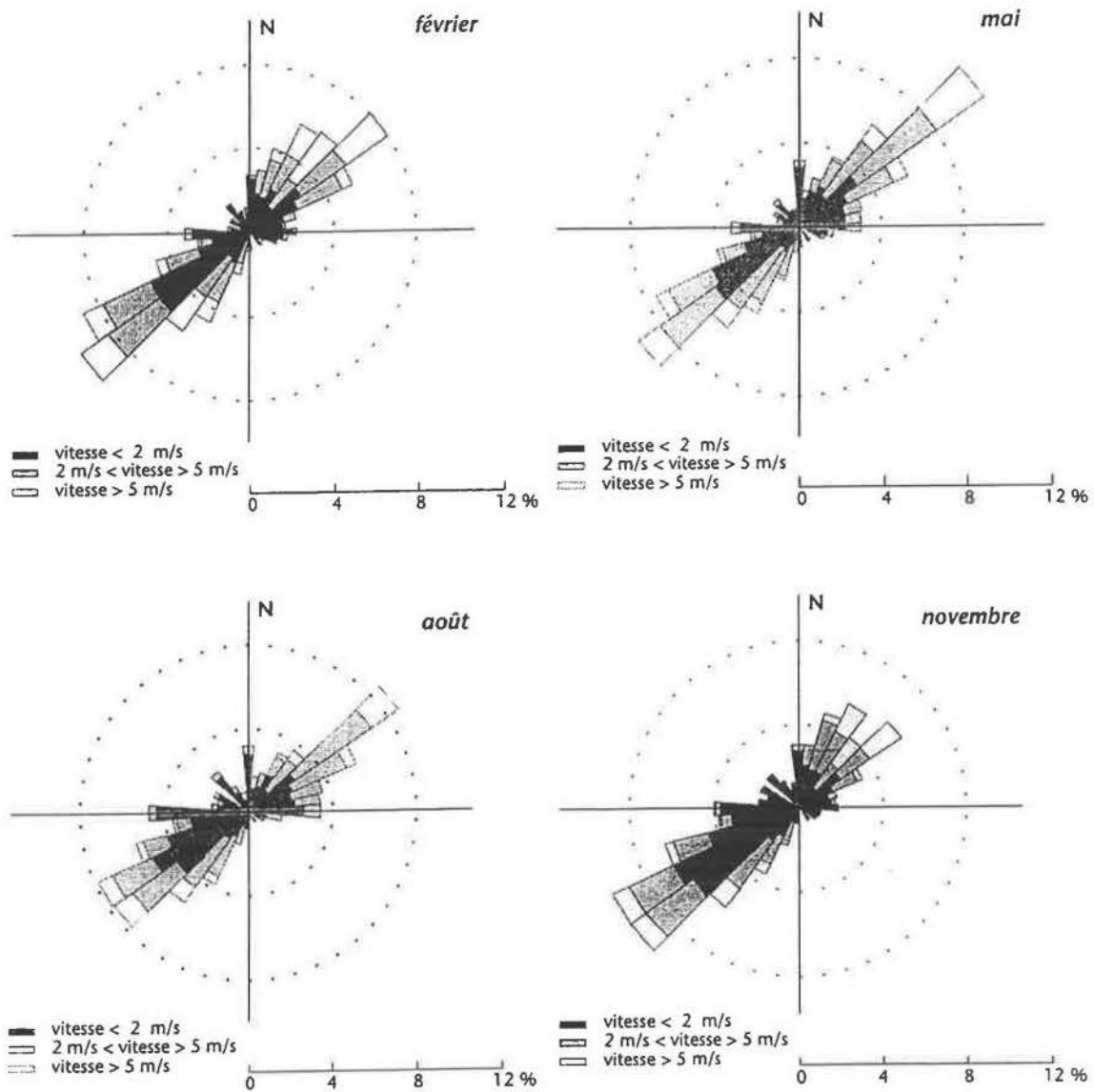


Figure II.5 - Vents enregistrés à Genève-Cointrin (1982-1995)

III CARACTERISTIQUES GENERALES DU LHC ET DE SES INSTALLATIONS CONNEXES

1 DESCRIPTION GENERALE

1.1 Description et caractéristiques principales du LHC

Le LHC, «Large Hadron Collider», est un accélérateur de particules de type synchrotron qui permettra d'accélérer et de stocker à une énergie de 7 TeV deux faisceaux intenses de protons circulant en sens inverse l'un de l'autre. Les deux faisceaux rentreront en collision quasi frontale en quatre endroits où seront installées les expériences qui observeront les interactions de particules de très haute énergie. Il est également prévu d'accélérer et de mettre en collision des faisceaux d'ions lourds (Pb^{82+}).

Le LHC sera installé dans le tunnel existant de 27 km de circonférence qui abrite actuellement la machine LEP. Les dimensions du LHC étant ainsi fixées, l'énergie maximale des faisceaux dépend uniquement du champ magnétique qui peut être atteint par les aimants dipolaires servant à guider les faisceaux tout autour du tunnel. Les aimants dipolaires du LHC utilisent des bobines supraconductrices refroidies à 1,9 K par de l'hélium superfluide et fournissent un champ magnétique de 8,3 T pour des particules à 7 TeV. Ces aimants ont une structure dite «deux en un» qui ménage deux canaux magnétiques avec des champs opposés dans la même culasse et le même cryostat, ce qui permet de faire circuler deux faisceaux de même énergie dans des sens opposés.

La configuration du LHC ressemble à celle du LEP : huit arcs identiques de 3300 m de rayon moyen et d'une longueur unitaire de 2780 m sont reliés entre eux par huit sections droites longues de 550 m chacune. Chaque arc se décompose en 23 périodes identiques, une demi période comprenant trois dipôles de 14,3 m de longueur magnétique et un quadripôle de 3,1 m de longueur magnétique et capable d'un gradient de 223 T/m (voir figure III.1). Cette «maille» régulière est complétée aux deux extrémités de chaque arc par un ensemble de huit dipôles et quatre quadripôles appelé «suppresseur» de dispersion. Dans tous les aimants des arcs, les deux canaux magnétiques où circulent les faisceaux ont un diamètre de 56 mm et sont séparés horizontalement de 194 mm. La figure III.2 montre une coupe schématique du tunnel LHC avec un aimant supraconducteur à deux ouvertures, ainsi que les lignes cryogéniques pour la distribution d'hélium liquide et la récupération de l'hélium gazeux.

Dans quatre des sections droites longues, des aimants spéciaux sont utilisés pour amener les faisceaux en collision et les focaliser au centre de la section droite. Les dispositifs expérimentaux sont installés autour de ces points : deux expériences à haute luminosité, ATLAS et CMS, utilisant des détecteurs polyvalents, seront installées dans de nouvelles cavernes creusées aux points 1 et 5. Deux autres expériences, ALICE, dédiée aux études de collisions d'ions lourds, et LHC-B, spécialisée dans la physique des particules «B», seront installées dans les cavernes existantes aux points 2 et 8. Ces sections droites autour des points 2 et 8 reçoivent également chacune un système d'injection pour un faisceau.

Les autres sections droites sont réservées à la machine: des ensembles de collimateurs seront installés dans les sections droites autour des points 3 et 7 pour éliminer des faisceaux toutes les particules dont la trajectoire et/ou l'énergie seraient en dehors de l'acceptance de la machine. Le système radiofréquence pour l'accélération des particules sera installé dans la section droite autour du point 4, tandis que les systèmes d'extraction rapide et de décharge des faisceaux sur des blocs absorbeurs externes occuperont la section droite autour du point 6. La figure III.3 montre le schéma

de principe du LHC. Les paramètres principaux du LHC sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.1 - Caractéristiques du LHC

Paramètres	Unité	Protons	Ions-Pb
Energie dans le centre de masse	TeV	14	1148
Champ magnétique dans les aimants dipôles	T	8,3	8,3
Luminosité initiale par zone d'interaction	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	10^{34}	$1,95 \times 10^{27}$
Nombre de paquets RF par faisceau		2835	608
Séparation entre les paquets	ns	24,95	124,75
Nombre de particules par paquet		10^{11}	$9,4 \times 10^7$
Courant par faisceau	mA	513	78
Nombre de zones d'interaction		3	1
Facteur Beta au point d'interaction	m	0,5	0,5
r.m.s. du rayon du faisceau au point d'interaction	μm	16	16
r.m.s. de la longueur des paquets en collision	mm	77	75
r.m.s. de la dispersion en énergie σ_E/E		$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$
Angle de croisement des faisceaux au point d'interaction	μrad	300	100
Durée de vie de la luminosité	h	10	6,7
Energie stockée par faisceau	MJ	333	5,2
Rayonnement synchrotronique émis par faisceau	kW	3,7	-

1.2 Mode de fonctionnement du LHC

La structure des faisceaux du LHC est décrite au chapitre III, paragraphe 2.3.4. A la luminosité nominale de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, le temps de décroissance du courant dans chaque faisceau est de 40 h, si l'on prend en compte les collisions aux quatre points d'interaction où sont localisées les expériences. Ceci donne une demi-vie de la luminosité de 16 h environ. Si l'on tient compte des autres sources de perte de particules, (interaction faisceau-gaz résiduel, imperfections de la machine, etc.), ces chiffres sont respectivement réduits à 22 h et 10 h. Comme le processus d'injection, de remplissage et d'accélération dans le LHC prendra environ 2 h, une fois l'opération du LHC bien maîtrisée, on prévoit d'avoir un taux de répétition d'un cycle LHC par période de 24 h. Pendant les premières années, le LHC fonctionnera avec des faisceaux d'intensité réduite, de l'ordre de 10 à 20% de l'intensité nominale.

Il faut noter que les pertes de particules dans les aimants supraconducteurs doivent être impérativement minimisées car elles induisent un apport de chaleur dans les bobines supraconductrices. Un apport excessif de chaleur peut déclencher une transition des aimants de leur état supraconducteur à leur état résistif normal, ce qui implique un arrêt d'urgence du LHC.

En plus des pertes systématiques et inévitables décrites ci-dessus, il peut y avoir des pertes accidentelles de faisceau dont l'effet serait catastrophique et dont on se protège par le système dit de décharge des faisceaux qui élimine de la machine toutes les particules circulantes en un tour au plus, ainsi que par des blocs absorbeurs placés à des endroits stratégiques dans la machine (voir chapitre III, paragraphe 3.6.6). Les pertes accidentelles possibles peuvent être:

- des pertes à l'injection dues à un mauvais guidage du faisceau sur sa trajectoire: des blocs absorbeurs en aval des points d'injection arrêteront les particules dont la trajectoire est hors tolérance.
- un déclenchement intempestif d'un module de l'aimant pulsé rapide du système de décharge des faisceaux: là encore, des blocs absorbeurs, placés dans la section droite longue où est installé le système de décharge des faisceaux, arrêteront les particules dangereuses et maintiendront le rayonnement induit à un niveau acceptable pour les éléments avoisinants de la machine.
- la transition brutale, «quench», d'un aimant de l'état supraconducteur à l'état résistif: quand une telle transition est détectée dans un aimant quelconque, le système de décharge des faisceaux est immédiatement déclenché.
- l'arrêt intempestif d'un convertisseur de puissance alimentant des aimants entraîne également le déclenchement instantané du système de décharge des faisceaux.
- la capture des particules injectées par le système radiofréquence, des instabilités dans les faisceaux peuvent aussi entraîner des pertes de particules qui sont détectées par un système mesurant en permanence le niveau de rayonnement tout autour de la machine: le système de décharge des faisceaux est déclenché par ce système de détection de perte de particules, en cas de niveau de rayonnement excessif.

Tous ces scénarios de perte accidentelle de particules sont analysés en détail dans le chapitre IV de ce rapport, tant du point de vue radioprotection que protection des éléments de la machine pour eux-mêmes.

2 DESCRIPTION DES INSTALLATIONS D'INJECTION

2.1 Description générale

L'un des grands atouts du projet LHC est la disponibilité de la chaîne d'injecteurs qui ne représente pas seulement une économie financière très importante, mais pratiquement une garantie pour ce collisionneur de disposer, dès le départ, de faisceaux immédiatement exploitables. Cependant, ces machines, optimisées pour la physique de cible fixe, doivent faire l'objet d'un certain nombre de modifications pour satisfaire aux exigences particulières du LHC.

Le LHC demandera, dès 2005, des faisceaux de protons, et des ions lourds ($_{208}\text{Pb}^{82+}$) à partir de 2006. Le schéma pour les protons est pratiquement figé, tandis que celui élaboré pour les ions est encore susceptible d'évoluer suivant les résultats de tests avec faisceau.

La chaîne des injecteurs du LHC^[1], protons et ions, est schématiquement représentée sur la figure III.4 (pas à l'échelle). La séquence d'injection pour les protons est: Linac 2 – PS Booster – PS – SPS – LHC, tandis que le faisceau des ions suit le chemin Linac 3 – Accumulateur d'ions (LEIR) – PS – SPS – LHC. Pour les protons, les modifications essentielles pour satisfaire le LHC sont:

- de nouvelles cavités RF dans le PS Booster et le PS ;
- l'augmentation de l'énergie du PS Booster de 1 à 1,4 GeV ;
- le remplissage du PS avec deux cycles du Booster et du SPS avec trois cycles du PS ;
- une réduction des impédances du SPS pour éviter des instabilités du faisceau ;
- l'amélioration du système RF à 200 MHz du SPS (maîtrise de la charge du faisceau) ;
- en option : un système RF à 400 MHz au SPS pour raccourcir les paquets ;
- la création de deux nouveaux systèmes d'éjection aux points 4 et 6 du SPS.

Pour les ions, les grandes modifications se concentrent autour du Linac 3 et du LEIR :

- l'augmentation du taux de répétition du Linac 3 à 10 Hz;
- la transformation de LEAR («Low Energy Antiproton Ring») en LEIR («Low Energy Ion Ring»), avec notamment la construction d'un système puissant de refroidissement à électrons.

Afin de pouvoir injecter les faisceaux au LHC dans les deux sens, il faut construire deux tunnels de transfert, TI2 et TI8, chacun d'environ 2,5 km. Ils seront équipés d'aimants classiques de petite ouverture. Pour plus de détails, se référer au chapitre III, paragraphe 2.4. Ces lignes représentent de loin le plus grand investissement pour les injecteurs.

Le faisceau de protons destiné au LHC est de faible dimension transversale (émittance) pour des intensités, certes appréciables, mais inférieures à celles déjà atteintes actuellement. De plus, le remplissage du LHC durant normalement moins d'une heure par jour, il en résulte que le niveau de radiation supplémentaire dans les injecteurs sera négligeable.

2.2 Les accélérateurs du PS

Le complexe PS est la source de toutes les particules pour les accélérateurs au CERN: protons, antiprotons, ions lourds (Pb), électrons, positons. Il fournira donc aussi, via le SPS, les faisceaux de protons et des ions lourds pour le LHC. Des petites émittances sont requises pour assurer que la taille du faisceau à l'injection dans le LHC soit compatible avec l'ouverture restreinte de cette machine et n'engendre pas de pertes dans les aimants supraconducteurs. De plus, l'intensité doit être suffisante pour atteindre des luminosités élevées. La «brillance» (rapport intensité/émittance) requise pour ces faisceaux dépasse les capacités actuelles des accélérateurs du complexe PS d'un facteur ~ 2 pour les protons, et ~ 30 pour les ions Pb.

2.2.1 Le complexe PS (partie hadrons)

La partie inférieure de la figure III.4 montre le complexe PS (CPS) qui consiste en :

- un Linac à protons (50 MeV, «Linac 2») mis en service en 1977 ;
- un Linac à ions lourds (4,2 MeV/u, «Linac 3») mis en service en 1993 (l'unité MeV/u est l'énergie cinétique de l'ion, par nucléon) ;
- le PS Booster (synchrotron qui fournit des protons à 1 GeV et des ions Pb à 95 MeV/u) mis en opération en 1972 ;
- le Proton Synchrotron (PS) qui fournit des protons jusqu'à 26 GeV et des ions Pb à 5.1 GeV /u à différents utilisateurs.

Le Linac 2 est un accélérateur linéaire qui comprend une source à protons de type duoplasmatron suivi d'un quadripôle radio-fréquence («radio-frequency quadrupole», RFQ) d'environ 2 m de longueur qui groupe et accélère les protons à 750 keV moyennant un champ électromagnétique à 200 MHz qui assure à la fois focalisation transversale et accélération. Le Linac lui-même, de type Alvarez, se compose de trois tanks d'environ 10 m de longueur chacun et de 1,50 m de diamètre, dans lesquels les protons sont accélérés par des champs électriques longitudinaux d'environ 1,5 MV/m qui oscillent aussi à 200 MHz. La focalisation transversale est assurée par des quadripôles magnétiques dans les tubes de glissement. Le Linac 2 accélère des protons à une énergie de 50 MeV et fournit un courant de 160-180 mA pendant 130 μ s chaque 1,2 s.

Le Linac 3, le plus récent des accélérateurs du CPS, est aussi un accélérateur linéaire. Des ions

lourds fortement ionisés sont créés par une source du type résonance cyclotronique à électrons (ECR), et accélérés par un RFQ (100 MHz) jusqu'à 250 keV/u. Trois tanks, d'une nouvelle structure de type «IH» permettant des champs électriques longitudinaux de 2-3 MV/m qui oscillent dans le premier (tank 1) à 100 MHz et dans les deux suivants (tanks 2 et 3) à 200 MHz, amènent l'énergie des ions à 4,2 MeV/u. Ces derniers sont ensuite «épluchés» par une feuille de carbone mince où ils perdent une vingtaine d'électrons, puis filtrés par un spectromètre. Le PS Booster accepte les ions Pb^{53+} , alors que le futur accumulateur LEIR sélectionnera les ions Pb^{54+} dont la durée de vie est supérieure. Les ions $^{208}Pb^{53+}$, d'une énergie de 4,2 MeV/u avec un courant 22 μA pendant 500 μs chaque 0,4 s, sortent du Linac 3 actuel.

Le PS Booster (PSB) est un synchrotron à protons/ions de 50 m de diamètre (1/4 du PS), avec quatre anneaux superposés séparés verticalement de 36 cm. Sa période magnétique comprend deux aimants de courbure (longueur 1,7 m, champ magnétique de 0,12 à 0,87 T) et trois quadripôles (maille à «fonctions séparées» à triplet). Deux cavités RF par anneau à 8 kV (0,6 à 1,9 MHz et 1,2 à 3,9 MHz) assurent l'accélération du faisceau à protons de 50 MeV à 1 GeV. La raison d'être de cette machine est de maîtriser la «charge d'espace» (phénomène causé par l'interaction coulombienne entre les particules du faisceau) qui limite son intensité ou, plus précisément, sa «brillance». Grâce à cet accélérateur, le PS a pu augmenter son intensité de protons d'un facteur 15. Dans le PSB, le faisceau circule dans une chambre à vide évacuée à environ 10^{-9} Torr (10^{-7} Pa) et est envoyé chaque 1,2 s du PSB au PS ou à ISOLDE (séparateur d'ions radioactifs en ligne) lorsque le PS n'en a pas besoin. Caractéristiques du faisceau à haute intensité de protons: $3 \cdot 10^{13}$ p/impulsion, en quatre ou huit paquets (un ou deux paquets par anneau) d'environ 170 ns chacun, longueur totale 1,2 ou 2,4 μs (voir aussi figure III.5).

Le Proton Synchrotron (PS), le premier synchrotron du CERN, est une machine de 200 m de diamètre, à «fonction combinée», où courbure de l'orbite et focalisation transversale des particules sont assurées par les mêmes aimants «à gradient». Leur champ magnétique moyen varie entre 0,08 et 1,25 T et le gradient de 0,25 à 4 T/m pendant le cycle d'accélération des protons de 1 à 25 GeV. Dans le cas des protons, huit ou 16 paquets sont accélérés par dix cavités RF capables de délivrer 20 kV chacune et dont la fréquence peut être variée de 3 à 10 MHz. La chambre à vide, dans laquelle circulent les particules, a un profil elliptique d'environ 140x70 mm et un vide de 10^{-9} Torr (10^{-7} Pa). Le cycle magnétique dure 1,2, 2,4 ou 3,6 s. Le PS est capable de livrer des faisceaux fort différents suivant les besoins des utilisateurs, et ceci de cycle à cycle, ce qui nécessite le changement de plusieurs milliers de paramètres dans l'espace de 1,2 s.

Ces utilisateurs sont:

- les expériences avec protons sur cible fixe du SPS, qui demande deux impulsions de protons, avec $2,5 \cdot 10^{13}$ ppi (particules par impulsion) chacune, à 14 GeV ;
- les expériences avec ions Pb sur cible fixe au SPS, qui demande quatre impulsions d'ions Pb^{82+} de $5 \cdot 10^8$ ppi chacune, à 5,1 GeV/u;
- la zone expérimentale du PS, qui reçoit des impulsions d'environ $3 \cdot 10^{11}$ protons à 24 GeV, distribués sur 1 s par «extraction lente» (tests de prototypes des détecteurs, physique de moyenne énergie).

Le CPS continuera à servir d'autres utilisateurs selon ce mode de fonctionnement tout en assurant le remplissage du LHC.

Le «Low Energy Ion Ring» (LEIR) est le nouveau nom d'un anneau de stockage existant dénommé LEAR (Low Energy Antiproton Ring), fermé en 1996, et qui sera transformé en accumulateur d'ions lourds à partir de 2001 pour le LHC. Parmi les paramètres de base conservés

figurent la circonférence de 78,5 m (1/8 du PS), les aimants, l'ouverture de la chambre à vide 140 x 55 mm et le système à vide ($<10^{-11}$ Torr, toute la machine étant étuvable). Cette machine comporte quatre dipôles magnétiques (0,25 à 1,1 T, longueur 6,5 m, déflexion 90°) et 16 quadripôles (gradient maximum 12 T/m, longueur 0,5 m). L'élément clé de LEIR est le refroidissement à électrons qui permettra de réduire les émittances transversales et la dispersion d'énergie d'un facteur 5-10 en 100-300 ms. Pour plus de détails voir aussi au chapitre III, paragraphe 2.2.4.

2.2.2 Pré-injecteur de protons: caractéristiques du faisceau, schéma de base^[2]

Le tableau III.2 montre les paramètres du faisceau protons pour LHC à la sortie du PS.

Les limites de charge d'espace dans le PSB et le PS actuels ne permettraient d'atteindre que la moitié de la «brillance» requise pour le faisceau «ultime». De plus, il est impossible de produire des paquets espacés de 25 ns.

Tableau III.2 - Paramètres du faisceau protons pour LHC à l'extraction du PS

Energie du faisceau protons	GeV	26
Impulsions PS par cycle SPS		3
Temps de répétition PS	s	3,6
Nombre de paquets PS par impulsion		84 (81 au SPS)
Espacement des paquets	ns	25
Protons par paquet – valeur nominale (ultime)		$1,05 \cdot 10^{11}$ ($1,7 \cdot 10^{11}$)
Emittance transversale normalisée (r.m.s)	μm	3
Emittance longitudinale (surface du paquet)	eVs	0,35
Longueur du paquet	ns	~4

Pour augmenter la «brillance» par un facteur ~2, le schéma suivant est adopté:

- le PSB remplit le PS en deux impulsions (plutôt qu'en une actuellement), allégeant ainsi la charge d'espace à l'entrée du PSB (50 MeV) d'un facteur 2;
- chaque anneau du PSB accélère un seul paquet (au lieu de cinq auparavant), ce qui permet de concentrer les quatre paquets issus des quatre anneaux du PSB dans la moitié du PS, laissant ainsi la place pour une deuxième impulsion de quatre paquets. Ceci n'est possible qu'avec un paquet par anneau (voir figure III.5);
- la première des deux impulsions venant du PSB doit attendre 1,2 s sur un palier magnétique du PS et est très sensible aux effets de charge d'espace. Puisque ceux-ci diminuent à plus haute énergie, une augmentation de l'énergie du PSB à 1,4 GeV atténue ce problème.

Pour obtenir les paramètres longitudinaux adéquats à 26 GeV ^[3], le schéma est le suivant:

- accélération de huit paquets à 3,5 GeV;
- coupure de chaque paquet en deux suivie d'accélération de 16 paquets à 26 GeV;
- dégroupage du faisceau sur le palier magnétique;
- recapture avec une cavité RF à 40 MHz pour créer 84 paquets espacés de 25 ns;
- raccourcissement des paquets à 4 ns à l'aide des cavités RF de 80 MHz.

Avant de lancer le projet de préparation pour le LHC, le schéma proposé pour augmenter la «brillance» fut testé fin 1993. Le test n'était pas complet puisque seulement un anneau du PSB était équipé de cavités RF capables de fonctionner sur $h=1$ et $h=2$. Néanmoins, l'énergie de transfert vers

le PS du faisceau venant de cet anneau a pu temporairement être augmentée à 1,4 GeV, le remplissage du PS avec deux cycles du PSB a aussi été testé, ainsi que les nombreux moniteurs de profil destinés à mesurer les émittances inhabituellement petites. Ce test fut concluant en permettant d'obtenir à 26 GeV des faisceaux conformes aux spécifications dans les plans transversaux (pour l'intensité «ultime», l'émittance était comprise entre 2,5 et 3 μm ; pour l'intensité «nominale», l'émittance était de l'ordre de 2 μm).

2.2.3 Pré-injecteur de protons: le projet des modifications du complexe PS ^[4]

Ce projet, appelé «PS pour LHC», englobe l'ensemble des modifications requises pour mettre en oeuvre le schéma esquissé ci-dessus. Les principaux nouveaux équipements et leurs dates d'installation sont les suivants:

- quatre nouvelles cavités RF capables de délivrer 8 kV (une par anneau) dans la gamme de fréquence de 0,6 à 1,9 MHz, pour permettre l'accélération d'un seul paquet par anneau (arrêt 1997-1998). Les anciennes cavités sont modifiées pour fonctionner sur $h = 2$. L'électronique de l'asservissement du faisceau est entièrement refaite (1997-1998);
- pour augmenter l'énergie cinétique du PSB jusqu'à 1,4 GeV (protons), des compensateurs de puissance réactive sont nécessaires afin de minimiser les perturbations du réseau 18 kV du CERN, et l'électronique des alimentations de l'aimant principal doit être modernisée (1997-1998). Dans le cadre de ces améliorations, les anciens transformateurs contenant du PCB sont éliminés;
- huit aimants à septum, dix dipôles, six quadripôles et leurs alimentations, ainsi que les générateurs d'impulsion de huit défecteurs rapides sont à remplacer pour que la ligne de transport entre le PSB et PS soit capable de transférer le faisceau à 1,4 GeV (champs magnétiques augmentés de 26%). Ces remplacements sont planifiés pour la plupart pendant l'arrêt 1997-1998. Les quelques éléments restants seront mis en place durant l'arrêt 1998-1999;
- les équipements bas niveau radio-fréquence au PS doivent être reconstruits pour assurer le fonctionnement sur les harmoniques 8 et 16 ainsi que le «bunch splitting» (1997-1998);
- pour créer l'espacement de paquets de 25 ns et leur raccourcissement à 4 ns, une cavité RF (300 kV) à 40 MHz, ainsi que deux cavités (300 kV chacune) à 80 MHz sont nécessaires (1997-1998). Deux cavités de réserve seront ajoutées en 1998-1999. L'impédance résiduelle de ces nouveaux systèmes, malgré les méthodes mises en oeuvre pour la minimiser, aura certainement un effet défavorable sur la stabilité des faisceaux de haute intensité. De plus, le processus de dégroupage-recapture sur le palier 26 GeV frôle la limite de stabilité et sera donc délicat. En 1998, débiteront les essais avec faisceau destinés à tester les performances possibles avec ces nouveaux équipements et à élaborer les moyens complémentaires éventuellement nécessaires pour atteindre les performances requises par le LHC;
- des instruments de diagnostic destinés à la mesure des caractéristiques du faisceau, notamment des fils volants dans chaque anneau du PSB, des cibles de mesure au PS, et des moniteurs de position à large bande dans la ligne de transfert vers le SPS.

Les positions géographiques de ces nouveaux équipements sont présentées sur la figure III.6.

Le but du projet «PS pour LHC» est de fournir le faisceau «nominal» au SPS au cours de l'année 1999 pour étudier le comportement du faisceau LHC suffisamment tôt et, si nécessaire, mettre en place des actions correctives avant la mise en service du collisionneur lui-même.

2.2.4 Le CPS comme pré-injecteur des ions lourds (Pb) ^[5]

La chaîne Linac 3 – PSB – PS fournit actuellement des ions $^{208}\text{Pb}^{82+}$ au SPS qui les accélère à

177 GeV/u (36,8 TeV par ion) pour la physique à cible fixe. Ce faisceau ne peut pas être envoyé au LHC parce que la «brillance» atteint seulement $1/30^{\text{ème}}$ de la valeur requise, ce qui se traduirait par une réduction d'un facteur 1000 de la luminosité. La solution envisagée consiste à injecter un grand nombre d'impulsions de faisceau du Linac 3 (Pb^{54+} à 4,2 MeV/u) dans un anneau accumulateur (LEIR) équipé d'un puissant système de refroidissement à électrons. Des tests sont encore nécessaires pour valider certaines options, et le descriptif du schéma proposé n'est donc pas encore définitif.

Les paramètres nominaux à la sortie du PS sont présentés dans le tableau III.3 ci-après.

Tableau III.3 - Paramètres du faisceau d'ions Pb pour LHC à l'extraction du PS

Energie (Quantité de mouvement) Pb^{82+}	4,27 (5,11)	GeV/u	après épluchage de Pb^{53+} à Pb^{82+}
Nombre de paquets par cycle PS	4		
Cycles PS pour remplir SPS	13		
Nombre des ions par paquet	$1,6 \cdot 10^8$		LHC: $9,4 \cdot 10^7$, pertes inévitables aux SPS et LHC
Emittance transversale normalisée (r.m.s)	1	?m	LHC: 1,5 car gonflement aux SPS et LHC
Espacement des paquets	125,3	ns	
Longueur des paquets	4	ns	
Surface du paquet	0,025	eVs/u	

Afin d'obtenir ces paramètres, le scénario ci-dessous paraît le plus prometteur:

- 20 impulsions ($22 \mu\text{A} \times 60 \mu\text{s}$) de Pb^{54+} du Linac 3 (à 10 Hz) sont injectées (remplissage par injection multitours transversale-longitudinale de chaque impulsion), accumulées, et refroidies dans LEIR, à 4,2 MeV/u;
- à la fin de ce processus, la cavité RF ($h = 4$) capture quatre paquets et les accélère à 14,8 MeV/u ($642,1 \text{ MeV/c/charge}$), énergie à laquelle ils seront transférés vers le PS, où ils occuperont quatre paquets RF adjacents des 32 disponibles;
- le PS accélère les quatre paquets à 258 MeV/u ($2,85 \text{ GeV/charge}$); l'harmonique du PS est changée, en plusieurs étapes, de $h=32$ à $h=17$, ce qui assure l'espacement requis entre les quatre paquets pour le LHC;
- accélération jusqu'à 4,267 GeV/u ($19,7 \text{ GeV/charge}$) et compression des ces quatre paquets à 4 ns. Ejection et passage du faisceau par une feuille d'épluchage (Al) qui transforme les ions Pb^{54+} en Pb^{82+} .

Une série de tests en 1997 a confirmé la validité de la technique d'accumulation dans LEIR, grâce en particulier au dispositif de refroidissement à électrons précédemment installé pour les besoins des expériences avec des anti-protons à basse énergie. Les temps de refroidissement mesurés furent de 100-300 ms et donc dans la gamme requise.

L'intensité accumulée maximale a atteint $7 \cdot 10^8$ ions, soit environ la moitié de la valeur visée pour le faisceau circulant dans LEIR ($1,2 \cdot 10^9$ ions, ou $3 \cdot 10^8$ ions par paquet, ce qui tient compte des

pertes inévitables d'accélération dans LEIR et au PS). Le projet de transformation du complexe PS pour les ions lourds n'est pas encore commencé, car il faut vérifier certains aspects du scénario proposé.

Références

- [1] The Large Hadron Collider (Conceptual Design), CERN-AC-95-05 (LHC), 1995
- [2] A.Blas et al., Conversion of the PS complex as LHC proton pre-injector, Proc. 1997 Part. Acc. Conf., Vancouver, Canada, 1997, CERN/PS/97-48 (DI)
- [3] R.Garoby, Longitudinal limitations in the PS complex for the generation of the LHC proton beam, Part. Accel., vol.58, Nr. 1-4 (1997), p. 121
- [4] K.Schindl, Conversion of the PS complex as LHC proton pre-injector: project proposal, PS/DI/Note 94-17
- [5] P.Lefèvre, D.Möhl, A low energy accumulation ring of ions for LHC (a feasibility study), CERN/PS/93-62 (DI), LHC Note 259

2.3 Le SPS

Le SPS est le dernier maillon de la chaîne d'injecteurs du LHC. Les protons injectés à 26 GeV sont accélérés dans le SPS à 450 GeV, et ensuite transférés dans le LHC via deux nouvelles lignes de transfert (TI2 et TI8). La ligne de transfert qui transporte le faisceau qui circule dans le sens des aiguilles d'une montre dans le LHC sera raccordée au système d'extraction actuel de la zone Ouest du site de Meyrin. Pour l'autre ligne de transfert, une nouvelle zone d'extraction sera construite au point 4 du SPS. Les changements principaux du SPS concernent la connexion des nouvelles lignes de transfert et la modification de l'équipement et l'instrumentation nécessaire pour obtenir la brillance du faisceau dans le LHC.

2.3.1 Brève description du SPS

Le SPS a été mis en service en 1976 et en opération régulière avec ses zones expérimentales en 1978. Depuis, il fournit des faisceaux pour les expériences à cible fixe avec protons et ions. En 1982, il a été modifié pour permettre des collisions entre proton et antiproton dans deux expériences souterraines positionnées sur l'anneau lui-même. Cette opération alternée, soit comme collisionneur, soit comme accélérateur pour expériences à cible fixe, a duré jusqu'en 1990. Le SPS a ensuite été modifié pour permettre l'accélération des électrons et positons à destination du LEP, et est entré en opération comme injecteur pour le LEP en 1989.

Le SPS est un anneau de 6,912 km de circonférence logé dans un tunnel de 4 m de diamètre interne, dont la profondeur varie entre 23 m et 65 m, en fonction de la topographie de la surface. La machine est constituée de six arcs et six sections droites longues de 128 m chacune. Chaque section droite est reliée à la surface par un puits d'accès autour duquel sont construits des bâtiments auxiliaires qui abritent les convertisseurs de puissance ainsi que les autres équipements nécessaires à l'opération de l'accélérateur et les services généraux.

Le SPS est une machine à fonctions séparées. Les aimants dipolaires sont utilisés pour guider les particules le long de l'anneau, alors que les quadripôles les focalisent. La maille régulière de la machine est divisée en cellules. Chaque cellule est formée de huit dipôles et de deux quadripôles. Il y a 108 cellules de 64 m de longueur dans le SPS. Au total, le SPS est constitué de 744 aimants

dipolaires et de 216 aimants quadripolaires. Il y a en outre quelque 300 autres aimants de correction (dipôles, sextupôles et octupôles) utilisés pour la correction de l'orbite fermée et pour les ajustements fins et la focalisation du faisceau. Chaque dipôle principal est long de 6 m et pèse 18 tonnes; son champ magnétique à 450 GeV est de 2,025 Tesla. Chaque quadripôle a 3,085 m de longueur et pèse 9 tonnes; son gradient de champ magnétique à 450 GeV est de 22,05 Tesla/m.

Le faisceau circule dans une chambre à vide en acier inox à perméabilité magnétique faible; la section de la chambre varie en fonction de sa position dans la machine. Aux extrémités, elle prend la forme soit d'un cylindre de 90 mm de diamètre, soit d'une ellipse de 160 mm x 40 mm. La pression interne dans la chambre est maintenue inférieure à 10^{-9} Torr (10^{-7} Pa) au moyen d'un système de pompage constitué d'environ 1000 pompes ioniques et 100 pompes turbomoléculaires.

Dans les sections droites longues (LSS), sont installés les systèmes principaux suivants:

- LSS1: système d'injection et d'arrêt des faisceaux;
- LSS2: système d'extraction vers la zone expérimentale Nord (via TT20);
- LSS3: système d'accélération radiofréquence;
- LSS4: nouvelle extraction vers LHC (via TI8);
- LSS5: caverne souterraine qui abritait précédemment l'expérience UA1 (collisions proton-antiproton);
- LSS6: extraction vers la zone expérimentale Ouest (via TT60) et vers le LHC (via TI2).

2.3.2 Le SPS et ses lignes de transfert

La figure III.7 représente schématiquement le SPS avec les nouvelles lignes de transfert vers le LHC (TI2 et TI8). Les faisceaux de proton produits dans le complexe PS sont transférés et injectés dans le SPS via la ligne de transfert TT10; pour l'opération à cible fixe, l'énergie des particules est de 14 GeV. Les éléments magnétiques actuels peuvent fonctionner pour les particules à une énergie de 26 GeV qui est celle du faisceau à destination du LHC. Une fois injecté, le faisceau est accéléré à 450 GeV. A cette énergie, le champ magnétique est gardé constant pour permettre au faisceau d'être lentement extrait vers les cibles de la zone Ouest et Nord via les lignes de transfert TT60 et TT20. Les cibles sont utilisées comme sources de particules secondaires par les expériences installées dans lesdites zones. La ligne de transfert TI2 vers LHC sera raccordée au tunnel de transfert actuel TT60 et utilisera les mêmes éléments d'extraction que ceux utilisés pour les expériences de la zone Ouest. La figure III.8 montre le plan schématique de TT60 ainsi que la partie initiale de TI2.

La ligne de transfert TI8 nécessitera un système d'extraction nouveau, installé dans la section droite longue LSS4 du SPS; la partie initiale de la ligne aura pour nom TT40. La figure III.9 montre le plan schématique de la zone d'extraction ainsi que TT40.

2.3.3 Caractéristiques du faisceau LHC dans le SPS

Le LHC demandera la disponibilité de quatre faisceaux différents en provenance des injecteurs : les faisceaux dits pilote, «de mise en service», nominal et ultime. Les intensités par paquet et le nombre de paquets correspondant à chacun sont donnés dans le tableau III.4.

Un remplissage normal du LHC consistera en 12 cycles d'injection du SPS par anneau LHC, chaque cycle SPS contenant trois trains de 81 paquets, chaque train étant obtenu par une seule injection venant du PS. Au total, les trois trains dans le SPS occuperont les $3/11^{\text{èmes}}$ de la circonférence de la machine. La figure III.10 montre la disposition des paquets dans les LHC, SPS

et PS pour le remplissage d'un anneau LHC.

Tableau III.4 - Intensités demandées dans le SPS pour les différents faisceaux du LHC

p ($\times 10^{11}$)	protons par paquet	nombre de paquets	intensité totale (A)
pilote	0,05	1	$2,0 \times 10^{-5}$
mise en service	0,17	243	0,029
nominal	1,05	243	0,177
ultime	1,7	243	0,287

Le faisceau pilote est utilisé pour vérifier l'injection et la capture par le système de radiofréquence du LHC; il est donc souhaitable d'utiliser l'intensité minimum de faisceau pouvant être mesurée par l'instrumentation du LHC. Un paquet unique de $5 \cdot 10^9$ protons a été retenu. Le faisceau de «mise en service» est utilisé pour la période initiale d'opération du LHC où une intensité faible de faisceau, produisant cependant une luminosité utile aux expériences, est souhaitable.

Pour les faisceaux nominaux et ultimes, les paramètres et conditions de faisceau sont présentés dans le tableau III.5.

Tableau III.5 - Paramètres des faisceaux SPS pour le LHC

Energie	GeV	26	450
Rayon machine	m	1 100	
Période de révolution	μ s		
Nombre de paquets		243	
Protons par paquet (nominal/ultime)	10^{11}	1,05/1,7	
Intensité totale (nominal/ultime)	A	0,177/0,287	
Espacement des paquets	ns	25	
Longueur totale des paquets	ns/mm	4/1 200	1,74/520
Emittance transversale normalisée	μ m	3,0	3,5
Taille moyenne du faisceau	mm	2,3	0,6
Emittance longitudinale	eVs	0,35	0,5-1,0
Fréquence du système d'accélération	MHz	200	

2.3.4 Cycles d'accélération du SPS pour le LHC

Le remplissage du LHC se fera à l'aide de cycles d'accélération spécifiques dans les injecteurs. L'injection dans le SPS sera à 26 GeV. Pendant le plateau d'injection, trois trains de particules venant du PS seront injectés, à 3,6 s d'intervalle. La rampe amenant les particules à 450 GeV débutera immédiatement après la dernière injection. L'accélération prendra 8,25 s. Une fois à 450 GeV, le champ magnétique sera maintenu constant 1 s environ, période pendant laquelle les équipements d'extraction seront préparés et les deux machines (SPS et LHC) synchronisées de façon à ce que le faisceau arrive en position azimutale correcte dans le LHC. Le faisceau sera ensuite extrait vers la ligne de transfert adéquate à l'aide d'aimants à déflexion rapide. L'extraction s'effectue en un tour du SPS (23 μ s). Une fois l'extraction terminée, la machine SPS est ramenée à son niveau d'injection pour le cycle de remplissage suivant. Un cycle complet de remplissage dure 18 s, comme illustré en figure III.11. Un total de 24 cycles sera nécessaire pour remplir les deux anneaux du LHC. Une fois le remplissage LHC terminé, la machine SPS commutera sur un cycle de

production pour les expériences à cible fixe des zones expérimentales Ouest et Nord.

2.3.5 Modifications du SPS comme injecteur du LHC

A cause de la particularité des faisceaux demandés pour le remplissage du LHC, quelques équipements installés dans le SPS doivent être modifiés. L'intensité du faisceau est comparable à celle de l'opération normale pour cible fixe, mais ce faisceau n'occupe que les $3/11^{\text{èmes}}$ de la circonférence de la machine, entraînant, par une intensité locale plus élevée, un effet important de charge dû au faisceau. De plus, les dimensions transversales du faisceau sont beaucoup plus faibles et doivent être impérativement contrôlées car tout accroissement de ces dimensions entraînerait une diminution de la luminosité dans le LHC.

L'injection du faisceau venant du PS dans le SPS est possible via la ligne de transfert actuelle TT10, avec quelques modifications mineures de l'instrumentation utilisée pour l'observation du faisceau. Cependant, des modifications importantes au niveau des aimants rapides d'injection seront nécessaires pour réduire le temps de montée du champ magnétique dans ces éléments et minimiser sa variation pendant le processus d'injection.

Concernant la machine SPS elle-même, des améliorations seront apportées à l'équipement d'observation du faisceau, ainsi qu'au système d'amortissement des oscillations transversales. Comme le faisceau pour le LHC est confiné dans une petite fraction de la circonférence du SPS, des améliorations des systèmes d'arrêt de faisceau et de la RF doivent être faites. Concernant l'absorbeur de faisceau, le coeur actuel en aluminium-cuivre sera remplacé par un nouveau bloc en carbone-aluminium-cuivre, plus résistant aux chocs thermiques générés par le faisceau absorbé lui-même. Les principaux changements du système d'accélération incluent une augmentation de la puissance pour fournir une tension maximum de 8 MV. Des améliorations seront effectuées sur les cavités accélératrices et leur électronique pour palier l'accroissement d'effet de charge dû au faisceau.

La haute intensité dans chaque paquet LHC et la faible distance entre les paquets peuvent causer des instabilités dans le faisceau, instabilités générées par le faisceau lui-même au travers des impédances de la machine, une partie de ces impédances provenant des changements de dimension de la chambre à vide du SPS. Les ports de pompage installés entre chaque élément magnétique se comportent comme des cavités résonantes et sont l'objet de toutes nos attentions; afin de réduire ces effets, un programme de blindage de ces ports de pompage sera entrepris et tout équipement installé pour l'opération du SPS comme injecteur du LEP sera enlevé.

L'extraction vers la ligne TI2 utilisera le canal d'extraction actuellement en place. Les aimants à déflexion rapide installés ici demanderont quelques améliorations et une nouvelle électronique de contrôle. De même, un nouveau système d'observation de faisceau sera nécessaire pour la ligne TT60. Après avoir parcouru 200 m environ, le faisceau entrera dans la caverne TCC6. A ce point, les dipôles de commutation actuels seront utilisés pour défléchir le faisceau dans TI2. L'agencement actuel des lignes de faisceau et la position de la cible T1 dans la caverne TCC6 seront modifiés pour permettre le passage de la ligne de transfert TI2. Environ 30 m après la cible T1, TI2 traversera le mur de la caverne et entrera dans le tunnel TI2 à construire. Le plan schématique du nouvel agencement de la caverne TCC6 est montré en figure III.8.

La modification majeure du SPS interviendra en LSS4 avec la construction d'un nouveau canal d'extraction. Quatre aimants à déflexion rapide et six aimants à septa DC seront installés dans la zone, ainsi que des aimants dipolaires créant une déflexion locale pour guider le faisceau

correctement vers la ligne de transfert TI8. Les premiers 50 m de la nouvelle ligne seront installés dans le SPS lui-même. Le faisceau traversera ensuite le mur du tunnel SPS et rejoindra la caverne TT40, nouvellement construite, comme montré schématiquement en figure III.9.

2.3.6 Ions lourds dans le SPS

Dans le projet LHC, est incluse la possibilité des expériences avec collisions d'ions lourds. Des ions lourds de plomb sont actuellement utilisés pour le programme de cible fixe du SPS. Pour l'injection dans le LHC, les ions suivraient le même chemin que les protons dans le SPS. Cependant, les caractéristiques du faisceau d'ions sont très sensiblement différentes de celles du faisceau de protons pour LHC, comme résumé dans le tableau III.6.

Tableau III.6 - Caractéristiques du faisceau $^{208}\text{Pb}^{82+}$ dans le SPS

Energie à l'injection/extraction	5,11/177	GeV/u
Nombre de paquets par injection	4	
Nombre d'injections PS par cycle SPS	13	
Nombre d'ions Pb par paquet	$1,6 \cdot 10^8$	
Emittance normalisée transverse	1	μm
Espacement des paquets à l'injection / extraction	125,3/124,75	ns

L'injection des ions de plomb se fera à une énergie de 5,11 GeV par nucléon, ce qui correspond à 12,97 GeV par charge ou 1,06 TeV par ion $^{208}\text{Pb}^{82+}$. Un total de 13 trains de faisceaux sera injecté dans le SPS pour chaque cycle d'accélération, ce qui nécessitera pour la machine SPS un palier magnétique de 43 s au niveau d'injection. Une rampe d'accélération normale et une extraction vers le LHC suivront. La longueur totale du cycle SPS pour injecter des ions dans le LHC sera de 54 s. Comme des intensités similaires d'ions sont déjà accélérées dans le SPS, la fourniture d'ions au LHC ne demande pas d'améliorations ou modifications spécifiques du SPS.

Références

- [1] The 300 GeV Program (SPS Design Report), CERN / 1050; 1972.
- [2] The Large Hadron Collider (Conceptual Design), CERN-AC-95-05(LHC); 1995.
- [3] The SPS as Injector for LHC (Conceptual Design), CERN-SL-97-07(DI); 1997.

2.4 Les lignes de transfert des faisceaux TI2 et TI8

Le transfert des faisceaux entre les SPS et le LHC se fait par les deux nouvelles lignes de transfert, TI2 et TI8 (voir figures III.12 et III.13). La ligne TI2 démarre dans la chambre de distribution TCC6 dans la zone Ouest du SPS et mène au point 2 du LHC pour injecter le faisceau dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'anneau 1 du LHC. Pour l'extraction du SPS, TI2 utilise l'extraction existante dans LSS6. TI8 commence au LSS4 du SPS, où une nouvelle extraction est construite et passe au point 8 du LHC pour injecter le faisceau dans l'anneau 2 du LHC dans lequel les particules circulent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. La longueur des lignes est de 2943 m pour TI2 et de 2694 m pour TI8. Les nouveaux tunnels ont une longueur de 2639 m pour TI2 et de 2436 m pour TI8.

La déflexion totale dans le plan horizontal dans le TI2 est de $50,4^\circ$, réalisé par un arc compact précédé et suivi de longues sections droites horizontales. Dans le plan vertical, TI2 doit adapter la différence d'altitude entre les deux accélérateurs qui est d'environ 10 m entre le début et la fin du tunnel. De plus, TI2 passe avec une marge de sécurité de 10 m en dessous d'un ancien lit de la rivière souterraine du Lion à Saint-Genis-Pouilly, pour rester sur toute sa longueur dans la molasse. Cet endroit forme le point bas de la ligne. Il est équipé d'un puits de pompage pour évacuer toute eau qui pourrait s'y accumuler. L'acheminement dans le plan vertical est achevé par trois groupes de dipôles verticaux qui totalisent une déflexion de $6,5^\circ$. La pente entre le début de TI2 et le point bas est de $-1,85\%$ et $2,45\%$ entre ce point la fin de la ligne.

La ligne TI8 possède une déflexion totale dans le plan horizontal de $106,5^\circ$, réalisé par un grand arc compact. Cet arc est précédé d'une partie droite relativement courte. La différence d'altitude entre le SPS et le LHC à cet endroit est d'environ 70 m et est surmontée par une pente de $-3,77\%$, avec des groupes de dipôles verticaux à son début et à sa fin. Le point bas de la ligne TI8 se trouve à sa jonction avec le tunnel LHC.

Le diamètre des deux tunnels est de 3 m. La hauteur du faisceau est à 1 m du sol. La ligne TI2 possède un puits d'accès, PMI2, au bout de la zone Ouest, sur le site de Meyrin. Ce puits sera utilisé, entre autre, pour passer les aimants du LHC, qui passeront aussi par la partie du tunnel TI2 entre PMI2 et le point 2 du LHC. Dans cette partie, la distance entre l'axe du faisceau et l'axe du tunnel est de 400 mm, afin de faciliter le passage des aimants LHC. Dans le reste du TI2 et dans toute la ligne TI8, cette distance est de 500 mm.

Tous les aimants de TI2 et TI8 sont des aimants conventionnels, refroidis à l'eau déminéralisée, à l'exception des petits dipôles de correction qui ne nécessitent pas de refroidissement particulier. L'injection dans le LHC se fait d'une façon classique, à l'aide des dipôles spéciaux de type septa, suivis par des aimants plus rapides. Les groupes d'aimants sont connectés aux alimentations, qui se trouvent en surface, à chaque bout des tunnels, pour optimiser la longueur des câbles. Cette connexion est faite par des câbles, refroidis ou non à l'eau, selon leur charge de courant.

Le faisceau est guidé dans une chambre à vide à section variable selon le type d'aimant et les besoins d'optique de faisceau. La section typique de cette chambre à vide dans les arcs principaux est de 58 mm x 25 mm. Le système de pilotage du faisceau dans les lignes de transfert est décrit dans le chapitre III, paragraphe 3.4.6.

Chacune des deux lignes possède des éléments de sécurité au début et à la fin sous forme d'absorbeurs de faisceau. Ces absorbeurs sont des blocs d'acier similaires aux absorbeurs utilisés dans le SPS. Ces éléments, mis dans le chemin des particules, garantissent que le faisceau ne peut pas être injecté dans le LHC quand celui-ci est accessible (voir chapitre III, paragraphe 3.6.3 «Les éléments importants pour la sécurité EIS»). Ils permettent également des tests et la mise au point de ces lignes de transfert.

L'installation des éléments des lignes se fait par le puits PMI2 pour TI2. La partie supérieure de TI8 (coté SPS) est installée par la galerie d'accès qui débute dans la caverne ECX4. Sa partie inférieure (coté LHC) est installée par le point 8 du LHC. L'accès aux lignes pour la maintenance peut se faire par les quatre côtés (début et fin pour TI2 et TI8), ainsi que par le puits PMI2 pour TI2.

3 DESCRIPTION DU LHC

3.1 Structure générale

L'anneau du LHC a une circonférence de 26,6 km et un diamètre intérieur de 3,80 m et se situe à des profondeurs variant de 50 m à 170 m sous la surface du sol. Ce tunnel est situé dans un plan incliné à 1,4 % environ, avec son point le plus bas près du point d'accès PA8.

L'anneau du LHC est constitué de huit arcs d'une longueur de 3,1 km environ et de huit sections droites d'environ 500 m de long chacune. Dans les parties courbes du tunnel, seront installés les éléments de l'accélérateur (aimants, chambres à vide, lignes cryogéniques, systèmes de pompage et contrôle du faisceau, services, etc.). Dans les sections droites, de part et d'autre du point de croisement des faisceaux, seront installées les quatre expériences: ATLAS au point 1, ALICE au point 2, CMS au point 5 et LHC-B au point 8. Les autres sections droites sont occupées par le nettoyage des faisceaux (points 3 et 7), le système d'accélération des particules (point 4) et l'extraction des faisceaux (point 6).

Deux halles souterraines (UD), de part et d'autre du point 6 du LHC, sont reliées à la section droite n°6 par un tunnel (TD) d'une longueur de 750 m et d'un diamètre de 3 m. Ces deux halles (longueur 25 m, largeur 9 m, hauteur 6 m) contiennent essentiellement les blocs absorbeurs des faisceaux (voir figures III.14 et III.15).

Les bâtiments de surface sont concentrés aux huit points d'accès au LHC. Ces bâtiments sont destinés à abriter les équipements des différents services (ventilation, refroidissement, cryogénie, stockage et distribution de gaz, sous-stations électriques, redresseurs, etc.), ainsi que les appareils de montage et de tests des équipements pour l'accélérateur et les expériences avant leur installation en souterrain.

3.2 Les ouvrages souterrains

Vingt-cinq puits relient les zones souterraines du LHC à la surface. Leurs dimensions sont données dans le tableau III.7.

Les puits sont de quatre types:

Les puits machines PM

Donnent accès au personnel et servent à la manutention des éléments de la machine et au passage des câbles, tuyauteries et gaines de ventilation.

Les puits PX

Servent à la manutention des équipements d'expérience.

Les puits PZ

Sont utilisés pour l'accès du personnel aux halls d'expérimentation.

Les puits PMI et PGC

Servent pour les travaux de génie civil (excavation des tunnels de transfert TI2 et TI8), ainsi que pour l'installation des éléments de la machine. Ils seront condamnés pour l'exploitation de l'accélérateur.

Les autres ouvrages souterrains du LHC sont:

Le tunnel LHC R (pouvant devenir RA, RB, RI, RJ, RM ou RZ à l'occasion d'un agrandissement de son diamètre)

Contient les éléments essentiels de l'accélérateur.

Les alvéoles électriques RE

A 711 m du point milieu de chacun des arcs et à 956 m d'un point de collision, sont implantées, creusées à 45° par rapport à l'axe du tunnel principal, des alvéoles électriques de 5 m de diamètre et de 25 m de long. Un mur coupe-feu sépare longitudinalement l'alvéole en deux parties, dont l'une abrite une sous-station électrique. La disposition des alvéoles ainsi que le blindage prévu à leurs entrées réduisent le rayonnement ionisant qui pourrait atteindre les équipements qui y sont installés.

Les galeries techniques UA et UR

Abriment essentiellement des alimentations électriques et leurs équipements de contrôle, ainsi que les aimants de référence (point 7).

Les halls des absorbeurs de faisceau UD

Abriment les blocs d'absorbeurs des faisceaux.

Les chambres de jonction UJ

Raccordent les différentes galeries auxiliaires au tunnel principal.

Les galeries de liaison UL

Permettent, à partir du fond des puits PM, l'accès direct au tunnel principal.

Les galeries de passage UP

Ces galeries de passage pour le personnel ont été nécessaires pour des raisons techniques ou des impératifs de sécurité.

Les halls d'expérimentation UX

Abriment les quatre expériences du LHC. Les expériences ALICE et LHC B utilisent les halls existants aux points 2 et 8. Pour les expériences ATLAS (point 1, UX15) et CMS (point 5, UX55), deux nouveaux halls seront construits avec les dimensions suivantes:

	UX15	UX55
Longueur (m)	53	53
Largeur (m)	30	26,5
Hauteur (m)	35	24

Les halls de service US

Sont essentiellement occupés par les équipements de service et de contrôle de la machine et des expériences. Comme pour les halls UX, deux nouveaux halls US sont prévus pour les expériences ATLAS (point 1) et CMS (point 5) avec les dimensions suivantes:

	USA15	USC55
Longueur (m)	62	85
Largeur (m)	20	18
Hauteur (m)	12,7	11,5

Les halls techniques UW

Raccordés aux halls US, ils contiennent les stations de pompage et autres équipements nécessaires au refroidissement des éléments de la machine et des expériences.

Les figures III.16 à III.23 montrent les ouvrages souterrains du LHC point par point.

Tableau III.7 - Dimensions des puits du LHC

Description	Nom de code de l'ouvrage	Hauteur (m)	Diamètre (m)
Puits d'accès machine pour matériel et personnel	PM15	82	9
	PM18	81	14
	PM25	45	9
	(PGC2)*	11	81
	PM32	73	7
	PM45	138	9
	PM54	80	12
	PM56	90	7
	PM65	95	9
	PM76	98	7
	PM85	99	9
Puits d'accès pour expériences	PX14	58	18
	PX15	58	9
	PX16	82	12.6
	PX24	51	23
	PX46	143	10
	PX56	80	20.4
	PX64	100	10
	PX84	104	10
	(PMI2)*	51	18
(PGC8)*	50	9	
Puits d'accès personnel	PZ33	100	5
	PZ45	143	5
	PZ65	100	5
	PZ85	104	5

*Puits utilisé pendant l'installation des équipements machine et condamné pour l'exploitation des installations.

3.3 Les ouvrages de surface

Tous les bâtiments de surface LHC sont montrés en vue axonométrique en figure III.24. Autour des neuf points d'accès (PA 1 à PA 8, plus le PA 1.8), on trouve une série d'ouvrages dont les caractéristiques et l'utilisation sont décrites brièvement dans ce qui suit:

Les bâtiments SA

Destinés à un usage général (assemblage, test et conditionnement des équipements machines).

Les bâtiments SD

Bâtiments en tête de puits desservant l'accélérateur. Leur rôle est d'abriter la tête de puits comportant la machinerie de l'ascenseur, les équipements de contrôle d'accès, le local pressurisé d'évacuation du personnel et le pont roulant desservant le puits. Ils servent également de local de stockage tampon du matériel à installer dans la machine et abritent les boîtes froides supérieures du système cryogénique, partie nommée SDH. Les câbles et tuyauteries venant des galeries techniques

et allant vers les puits machines et les autres ouvrages traversent ces bâtiments.

Les bâtiments SDX

Ont les mêmes fonctions que les bâtiments SD, mais desservent les halls souterrains des expériences.

Le bâtiment SDI

En tête du puits PMI2 ; est prévu pour l'installation des éléments de la machine.

Les bâtiments SE

Se classent en deux parties : les bâtiments SEM contenant les cellules 18 kV, les départs basse tension et leurs contrôles; les bâtiments SES regroupant les systèmes de sécurité, les ordinateurs et les alimentations assurées.

Les bâtiments SF

Regroupent les sous-stations de pompage et les réfrigérants atmosphériques.

Les bâtiments SG, SGX

Abriment le stockage des gaz neutres et inflammables pour les expériences ainsi que les équipements destinés aux systèmes de mélange, de purification et de distribution primaire de ces gaz.

Les bâtiments SH

Abriment les compresseurs d'hélium pour alimenter les éléments cryogéniques de la machine (SHM) et des expériences (SHX) ainsi que leurs alimentations électriques et une salle de commande.

Les plates-formes SHE

Destinées à stocker un nombre variable de réservoirs d'hélium gazeux d'un volume de 250 m³ sous une pression maximale de 2 MPa (20 bar).

Les galeries SL, SLU

Abriment les gaines de ventilation et servent de galeries de liaison pour les câbles et les tuyauteries.

Les bâtiments SM

Conçus pour le montage des éléments de la machine.

Les bâtiments SU, SUX

Bâtiments de ventilation et de conditionnement d'air. Ils abritent les systèmes de production de froid, de récupération de chaleur de la zone traitée et de production d'air comprimé.

Les bâtiments SW

Bâtiments prévus pour l'utilisation des différents services généraux.

Les bâtiments SX

Coiffent les puits PX desservant les halls d'expérimentation. Ils abritent des ponts roulants et servent également au déchargement des composants de détecteurs, à leur stockage provisoire ainsi qu'au montage de certains sous-ensembles. Ils contiennent des petits ateliers de mécanique et d'électronique nécessaires au montage et à la maintenance des éléments de l'expérience, ainsi que les équipements pour le contrôle d'accès.

Les bâtiments SXC

Abriment essentiellement des salles de commande et de comptage avec tous les instruments nécessaires pour le contrôle des différents systèmes de détection. C'est dans ces salles que travaillent les physiciens, ingénieurs et opérateurs chargés d'assurer le fonctionnement des détecteurs d'expérience.

Les bâtiments SXL

Destinés au montage et test de grands sous-ensembles des expériences.

Les bâtiments SY

Situés près de l'accès aux différents sites du LHC ; abritent les systèmes de contrôle d'accès, les systèmes de contrôle à distance et les synoptiques de visualisation des alarmes. Ils abritent également le bureau du surveillant du site et une petite infirmerie.

Les bâtiments SZ

Surmontent les puits d'accès du personnel (PZ) et abritent essentiellement les équipements du contrôle d'accès.

Les figures III.25 à III.34 donnent les détails d'implantation de ces bâtiments en surface sous forme de plans de masse simplifiés.

3.4 Les principaux éléments de l'accélérateur

3.4.1 Les cryoaimants

Description

Un cryoaimant (dipolaire ou quadripolaire) est composé principalement d'une masse froide, fonctionnant à 1,9 K et d'un cryostat pour l'isolation thermique de la masse froide par rapport à l'environnement (voir figure III.35). Il est conçu de manière à pouvoir être raccordé en série avec d'autres cryoaimants.

La masse froide

La masse froide est constituée d'une enveloppe, de bobinages supraconducteurs, de colliers de frettage non magnétiques, d'une culasse magnétique en acier à bas carbone et d'un tube échangeur en cuivre. Elle contient en outre des bus-bars principaux et auxiliaires pour la mise en série électrique des cryoaimants et différents capteurs pour le diagnostic et la surveillance des performances électriques, magnétiques et cryogéniques. L'enveloppe est composée d'un cylindre et de deux fonds d'extrémité en acier inoxydable austénitique.

Le cylindre est monté sur l'ensemble bobinage-collier-culasse par frettage pour constituer une structure mécanique capable de contenir les forces électromagnétiques et garantir la stabilité des bobinages. Les fonds d'extrémité sont traversés par deux tubes froids qui laissent un passage pour les faisceaux de particules et le tube échangeur. Les fonds d'extrémité ne participent pas à la rétention des forces électromagnétiques et ont pour seule fonction, avec les tubes froids, de contenir l'hélium liquide à l'intérieur de la masse froide. Le tube échangeur en cuivre est brasé sur des extrémités en acier inoxydable pour permettre de le souder dans les fonds d'extrémité et ainsi compléter l'étanchéité du réservoir à hélium. Les bobinages supraconducteurs, quand ils sont excités par un courant électrique, créent dans leurs

ouvertures un champ dipolaire à orientation verticale. La polarité du champ est opposée dans les deux ouvertures.

Les paramètres principaux de la masse froide sont les suivants :

longueur hors tout	:	15,25 m
diamètre extérieur	:	570 mm
poids total	:	25 000 kg
volume d'hélium liquide	:	225 l
température en fonctionnement normal	:	1,9 K
champ magnétique maximal	:	9 T
courant maximal	:	12'400 A
énergie magnétique maximale	:	7,1 MJ

Le cryostat

Le cryostat est composé de pieds supports, d'un premier écran thermique à 5 K, d'un second à 50-70 K, d'un tank à vide et de conduites cryogéniques. Sa fonction est de supporter et d'isoler thermiquement la masse froide par rapport à l'environnement. Les pieds support sont solidaires avec la masse froide, le pied support en milieu de la masse froide est fixé sur cryostat tandis que les deux autres sont libres de rouler pour tenir compte de la contraction thermique de la masse froide par rapport au cryostat. Ils sont fabriqués en matériaux composites à faible conduction de chaleur. Le premier écran thermique à faible émissivité, composé d'une isolation réfléchive multicouche, entoure la masse froide et les canalisations cryogéniques à basse température. Il est maintenu à une température de 5 K et sert d'isolation intermédiaire entre la masse froide et le deuxième écran. Ce dernier, en aluminium extrudé entoure la masse froide et le premier écran. Il est maintenu à une température de 50 à 70 K et intercepte le rayonnement thermique émis par la paroi intérieure du cryostat. Il est également recouvert d'une isolation réfléchive multicouche. Les conduites C' et E assurent la thermalisation de l'écran 5 K et celui de 50 K respectivement. La conduite N contient les bus-bars auxiliaires pour l'alimentation électrique des aimants correcteurs qui sont installés en dehors du cryoaimant et est indépendante de la masse froide. Les conduites X et Y sont respectivement le départ et le retour de l'alimentation en hélium du tube échangeur. Les conduites C' et E sont en aluminium, la conduite N en acier austénitique et les conduites X et Y en cuivre à très faible teneur en oxygène. Le tank à vide se compose d'un cylindre en acier de construction non allié d'une épaisseur de 12 mm et de brides en acier inoxydable. A l'endroit des pieds supports, il est renforcé et équipé pour des manutentions. A une extrémité, une manchette mobile composée de deux brides, d'un tube ondulé et d'un soufflet, le tout en acier inoxydable, permet le raccordement des cryoaimants l'un à l'autre. Le tank à vide supporte tous les autres éléments du cryoaimant, maintient le vide d'isolement à 10^{-6} mbar (pression absolue), et en cas de fuite cryogénique il sert d'enceinte de rétention de l'hélium.

Les paramètres principaux du cryostat sont les suivants :

longueur totale	:	15,5 m
diamètre extérieur	:	914 mm
poids du tank à vide	:	5 tonnes
nombre de pieds supports	:	3
niveaux de température nominale	:	5 K (1er écran)
		50 K à 70 K (2ème écran)
		300 K (tank à vide)

Modes de fonctionnement

Remarque importante

La masse froide décrite ci-dessus est prisonnière du cryostat avec le vide établi pour tous les modes de fonctionnement. Même dans l'hypothèse d'une fuite importante de la masse froide, la pression à l'intérieur du cryostat n'excédera pas 0,15 MPa (pression absolue) grâce à la présence d'un clapet de sécurité taré en dessous de cette valeur. Ainsi, le cryostat constitue une protection pour des personnes ou des équipements à proximité du cryoaimant.

Descente et remontée en température

Après établissement du vide à l'intérieur du cryostat ($<10^{-6}$ mbar), la descente en température est effectuée en faisant circuler de l'hélium sous pression dans les différentes conduites cryogéniques et le tube échangeur. En abaissant progressivement la température de l'hélium, la température de la masse froide descend et la masse froide se remplit finalement d'hélium condensé. Une fois la masse froide remplie avec de l'hélium liquide, la descente du bain statique jusqu'à 1,9 K est assurée par le tube échangeur seul. Celui-ci est alimenté en hélium à 1,8 K et 0,0016 MPa (pression absolue), il ramène et maintient la température de la masse froide à 1,9 K par échange thermique à travers la paroi en cuivre. La pression en fonctionnement normal dans le bain statique d'hélium est de 0,13 MPa (pression absolue). La durée totale de cette opération est de 20 h. Comme indiqué au dessus, la rétention des forces électromagnétiques est assurée par l'ensemble collier-culasse-cylindre de serrage.

En fonctionnement normal, les bobinages sont sujets à des forces électro-magnétiques créées par l'action de leur propre champ magnétique sur les courants qui les excitent (forces de Lorentz). La distribution des forces sur les différentes parties des bobinages est complexe mais la composante principale est située dans le plan de symétrie horizontal et orientée vers l'extérieur. Le cylindre de serrage est assemblé autour de la culasse avec une précontrainte azimutale déterminée (~ 150 MPa). Pendant la descente en température, à cause de la contraction différentielle des matériaux, la contrainte azimutale dans le cylindre de serrage augmente jusqu'à 300 MPa et produit une importante force de matage sur les surfaces de contact des demi-culasses. A la température de fonctionnement, la structure est très rigide et garantit que les colliers et les demi-culasses sont en contact dans le plan de symétrie horizontal. Ainsi, la composante horizontale des forces électromagnétiques et la force de matage sont telles que l'entrefer reste toujours fermé au champ magnétique maximum (9 T). Les mêmes contraintes et phénomènes se produisent en sens inverse pendant la remontée en température.

Fonctionnement normal

Une fois la température de fonctionnement atteinte (1,9 K), le courant électrique dans les bobinages (maximum 12 400 A) et le champ magnétique (maximum 9 T) sont établis. La composante horizontale des forces magnétiques (440 tonnes/mètre de longueur) décharge partiellement les surfaces de contact des demi-culasses mais l'entrefer restant fermé, la contrainte azimutale dans le cylindre de serrage ne change pas (300 MPa). Pendant le fonctionnement normal, les pertes cryogéniques sont limitées et la pression de l'hélium dans les conduites cryogéniques est faible.

Fonctionnement exceptionnel

Transition résistive de l'aimant (quench)

Pendant le fonctionnement, des perturbations peuvent entraîner une brusque transition résistive de l'aimant (quench) libérant sous forme de chaleur l'énergie magnétique

stockée inductivement dans l'aimant (7,1 MJ) dans le bain d'hélium avec les conséquences suivantes :

- Une partie du volume d'hélium va donc se vaporiser engendrant une montée de pression à l'intérieur du réservoir à hélium. La pression maximale mesurée sur des prototypes a été 1,2 MPa.
- Une vanne de sécurité appropriée, tarée à 2 MPa limitera la montée en pression.

Il est prévu de soumettre le réservoir à hélium à un essai pneumatique (azote) avec une pression de 2,5 MPa.

Rupture du vide d'isolement

La rupture de vide d'isolement peut être due à une fuite du cryostat, d'une fuite du réservoir à hélium ou des conduites cryogéniques. Dans tous les cas, l'apport de chaleur est fortement limité par les isolations multicouches et la vitesse de refroidissement du cryostat est donc modérée. Néanmoins les températures minimales atteignables asymptotiquement par le cryostat peuvent être suffisamment basses pour occasionner des risques de fragilisation pour le matériau (acier de construction non allié).

Des calculs de simulation sur un cryostat similaire et des essais sur un cryostat d'azote liquide (voir Note Interne LEP-MA/Ph.L. du 12 janvier 1989 «Essai de perte de vide d'isolement sur un cryostat d'azote liquide») ont montrés que la vitesse initiale de refroidissement de la paroi du cryostat est au maximum de quelques degrés/mn et que la formation de givre diminue le refroidissement à quelques degrés/h sitôt atteint le point de rosée. Des températures inférieures à 243 K ne sont atteintes qu'au bout de plusieurs heures. Dans le cas du cryoaimant, sous surveillance constante par la salle de contrôle, cela laisse suffisamment de temps pour prendre des mesures adéquates (vidange du réservoir à hélium, dégivrage et réchauffage du cryostat) pour éviter tout risque d'incident. En outre, un clapet de sécurité qui s'ouvre à 2 MPa (pression absolue) est monté sur le cryostat limitant ainsi la pression interne à cette valeur.

Conception et fabrication

Du point de vue de la sécurité, le cryoaimant est conçu, fabriqué, testé et déclaré comme «réceptacle à double paroi utilisé à l'emmagasinage de gaz liquéfié à basse température» conformément aux réglementations suivantes:

- Directive 97/23/CE du Parlement Européen et du Conseil du 29 mai 1997 concernant les équipements sous pression.
- Code de Sécurité, D2 Rev. CERN, Janvier 98 (Equipements sous pression).

Etudes et calculs

Le CERN a procédé, par des méthodes analytiques et par la méthode des éléments finis, à des vérifications de la stabilité du cryoaimant. Le comportement mécanique de l'ensemble bobinage-colliers-culasse-cylindre de serrage, des fonds d'extrémité et du cryostat a été analysé à l'aide du programme ANSYS (Réf. 1, 2 et 3).

Ensuite, il incombe aux constructeurs, mandatés par le CERN pour la réalisation des différentes parties du cryoaimant, de s'assurer que tous les calculs, analyses et essais nécessaires sont faits pour garantir un fonctionnement sûr et correct du cryoaimant pour tous les modes de fonctionnement. Tous les essais sont «protocoles» selon un plan d'assurance qualité.

Construction et assemblage

La construction et l'assemblage du cryoaimant sont définis dans des «spécifications techniques» éditées par le CERN. L'ensemble bobinage-colliers-culasse-cylindre de serrage est décrit dans Réf. 3 et le cryostat dans Réf. 4. La finition de la masse froide est décrite dans une note technique (Réf. 5).

Les constructeurs établissent sur la base de ces documents et en étroite collaboration avec le CERN des plans de fabrication et des documents techniques pour la construction en tenant compte des obligations résultant de l'application des documents de référence.

De plus, les dispositions suivantes seront respectées :

- toutes les jonctions de structure et d'étanchéité de la masse froide seront soudées ; l'emploi de brasure ou de soudure à l'étain n'est pas accepté. Le travail de soudage est exclusivement réalisé par des soudeurs qualifiés, et de préférence sur des machines automatiques.
- chaque mode opératoire de soudage fait l'objet d'une qualification spécifique basée sur l'étude métallurgique pour garantir la non fragilité des joints soudés.
- tous les raccords soudés et boulonnés doivent être étanches à l'hélium. Il incombe au constructeur de garantir l'étanchéité de la masse froide et du cryostat dans toutes les conditions de service et d'essai, et d'établir et appliquer à cette fin des procédures de contrôle de qualité adéquates.
- tous les composants du cryostat seront nettoyés de toute trace de contamination susceptible de dégrader le vide d'isolation, la faible émissivité des surfaces réfléchissantes et la pureté de l'hélium.

Choix des matériaux

Pour tous les composants on n'utilisera que des matériaux certifiés et appropriés aux conditions de température, de pression et de vide régnant dans le cryoaimant aux différents modes de fonctionnement. Un grand nombre de matériaux est utilisé pour la fabrication de cryoaimants dont les plus importants sont:

- pour les bobinages: alliage NbTi et cuivre et matériaux pour l'isolation électrique comme bandes et plaques de fibre de verre avec résine epoxy, rubans de polyimide;
- pour les colliers: acier austénitique 316 LN ou équivalent;
- pour la culasse: acier à très bas taux de carbone, recuit et non vieillissant;
- pour le réservoir à hélium et les tubes froids : acier inoxydable austénitique AISI 316 LN ou équivalent;
- pour les écrans thermiques : aluminium et film polyester aluminisé;
- pour les pieds supports : matériaux composites;
- pour le cryostat: acier de construction non allié type ISO F 430 ou équivalent et acier inoxydable AISI 304L pour les brides et la partie mobile;
- pour les conduites cryogéniques: aluminium extrudé;
- tube échangeur: cuivre.

Pour assurer la sécurité en cas de surpression, des dispositifs de sécurité seront installés (voir chapitre V, paragraphe 3.2):

En particulier, les tests suivants sont prévus dans les spécifications techniques et seront témoignés par le CERN et/ou un organisme notifié mandaté par le CERN :

- contrôle d'étanchéité : détection de fuites sur la masse froide, le cryostat et les conduites

- cryogéniques. Le taux de fuite devra être inférieur à 2×10^{-10} torr. l. s⁻¹ ;
- essai pneumatique de la masse froide à 25 MPa et des conduites cryogéniques à 1,25 x la pression de calcul. Le gaz utilisé sera l'azote propre.

Tests et contrôles

Certification

L'identification des matériaux, la qualification du mode opératoire de soudage, les contrôles non destructifs et destructifs des joints soudés sur les assemblages de qualification et sur les coupons témoins de production seront conformes aux instructions de la note technique mentionnée plus haut.

Le tableau III.8 indique les pressions et les températures dans les différentes parties du cryoaimant pour les différents modes de fonctionnement décrits.

Références

- [Réf. 1] R. Perin « Finite Element structural analysis of LHC bending Magnet », LHC Project Note 10, 1995-10-11.
- [Réf. 2] J.C. Brunet and T. Kurtyka « Strength analysis of the LHC dipole magnet ends », Technical Note MT-ESH/91-26 .
- [Réf. 3] T. Kurtyka « Strength analysis of the LHC cryostat vacuum vessel » Technical Note MT-ESH/91-22.
- [Réf. 4] J.C. Brunet « Design of the second serie of 15-m LHC Prototype Dipole Magnet Cryostat » LHC Project Report 133.
- [Réf. 5] Note AT/MA/BSZ/fm-453/v.o datée de février 1993.

Tableau III.8 - Pressions (relatives) pendant les différents modes de fonctionnement (en bar)

Elément	Pression de calcul (293 K)	Pression d'essai (293 K)	Descente et remontée en température	Fonctionnement normal (2 K)	Transition résistive
Masse froide	2	2,5	1,2	0,13	2
Conduite C' (écran thermalisation à 5 K)	2	2,5	1,65	0,36	0,36
Conduite E (écran à 55 K)	2,2	2,75	1,95	1,95	1,95
Tube échangeur G	IP = 0,4 OP = 2	IP = 0,5 OP = 2,5	IP = 0,2 OP = 1,2	IP = 0,0016 OP = 0,13	IP = 0,0016 OP = 2
Tubes froids	IP = 0 OP = 2	IP = 0 OP = 2,5	IP = 0 OP = 1,2	IP = 0 OP = 0,13	IP = 0 OP = 2
Cryostat (à 293 K)	0,15	N/A	VIDE	VIDE	VIDE

IP = pression intérieure
EP = pression extérieure

3.4.2 L'alimentation électrique des cryoaimants

L'alimentation électrique des cryoaimants est subdivisée en huit circuits indépendants pour les dipôles et les quadripôles, comme montré schématiquement dans les figures III.36 et III.37.

Les courants nécessaires varient entre 60 A et 13 kA (tensions < 180 V) pour les différents éléments. Les convertisseurs de puissance générant les courants DC sont installés dans des ouvrages souterrains (points pairs) et à l'intérieur du tunnel principal du LHC. Ceci permet de réduire la longueur des câbles et les bus-bars de connexion au minimum. Les câbles et bus-bars longent le haut du tunnel et sont bien protégés au niveau de leur connexion aux cryoaimants pour éviter toute possibilité de court-circuit par contact de personnes ou d'objets. Les convertisseurs de puissance sont conçus et construits selon les normes en vigueur pour les équipements électriques de puissance.

Afin d'éviter que les énergies stockées dans les chaînes d'aimants formées par les dipôles et les quadripôles principaux (respectivement 1,33 GJ et 25 MJ par octant) soient dissipées dans les aimants après une transition résistive («quench»), le schéma de protection suivant est prévu: chaque aimant a en parallèle une diode de «by-pass» installée dans le bain d'hélium à 1,9 K. Celle-ci fera le court-circuit de l'aimant en cas de résistance se propageant à l'intérieur des bobines. De cette façon, en cas de «quench», seule sa propre énergie est dissipée à l'intérieur de l'aimant.

Des résistances de décharge sont insérées dans les circuits d'alimentation aux extrémités des secteurs. Dans le circuit où une transition résistive est apparue, l'énergie des autres aimants est extraite par ces résistances après ouverture de disjoncteurs mécaniques. Pendant la procédure d'extraction d'énergie, dont la constante de temps est d'environ 100 s pour les dipôles et environ 50 s pour les quadripôles, des tensions allant jusqu'à 1300 V par rapport à la terre peuvent apparaître. Des détecteurs de transition résistive sont installés le long des aimants principaux (et dans d'autres cas en tête des circuits). Quand une transition est détectée dans un aimant, des chaufferettes en contact avec les bobines supraconductrices sont alimentées par de courtes impulsions de courant; elles font ainsi transiter l'énergie dans un grand volume à l'intérieur de l'aimant.

Par conséquent, les températures et tensions électriques développées à l'intérieur des bobines transitées sont plus basses. Les tensions électriques dans les alimentations des bandes chaufferettes peuvent aller jusqu'à plus ou moins 400 V. Détecteurs, bandes chauffantes et alimentations attachées sont disposés dans le tunnel suivant des règles de redondance précises.

3.4.3 Le système cryogénique

Pour refroidir et maintenir les quelque 2000 électroaimants supraconducteurs à une température de 1,9 degrés Kelvin, le LHC sera équipé d'un système cryogénique à l'hélium superfluide qui devra produire et distribuer, autour de l'anneau LHC, une puissance cryogénique totale de 150 kW de réfrigération à 4,5 K. La puissance de réfrigération demandée sera fournie par huit réfrigérateurs à hélium de 18 kW de capacité équivalente à 4,5 K. Chaque réfrigérateur alimente un secteur de la machine d'une longueur de 3,3 km environ. Le schéma d'alimentation en fluide cryogénique par cinq points est montré sur la figure III.38.

Quatre réfrigérateurs, déjà implantés aux points 2, 4, 6 et 8, et actuellement utilisés pour le LEP, seront ultérieurement adaptés aux besoins cryogéniques du LHC. Quatre nouveaux réfrigérateurs seront ajoutés aux points 1.8, 4, 6 et 8. Les sites pairs autour de l'anneau étant faciles d'accès et dotés d'une infrastructure existante, tout l'équipement cryogénique actif y est regroupé à l'exception du réfrigérateur implanté au point 1.8 pour des raisons d'espace limité au point 2 et

d'utilisation de ces équipements pour tester des composants cryogéniques avant leur installation dans le LHC. L'architecture du système cryogénique du LHC est illustrée dans la figure III.39.

L'hélium gazeux, stocké dans des réservoirs à pression (voir chapitre III, paragraphe 3.7.5), est aspiré et comprimé à l'aide de compresseurs à vis, situés dans des stations de compression (QSC) aux bâtiments SH. Après la compression, il est refroidi par des refroidisseurs eau/hélium à la température ambiante et est acheminé par une tuyauterie appropriée vers les boîtes froides (QSR et QSRI), installées dans les bâtiments SD. Ces boîtes contiennent tous les éléments du circuit cryogénique, tels que les échangeurs, les turbines de détente, les vannes de régulation, les éléments de purification de l'hélium, l'instrumentation, équipement nécessaire au refroidissement du fluide cryogénique.

L'hélium liquide à 4,5K est produit en surface pour les nouveaux réfrigérateurs (QSRI) et en deux étapes pour les réfrigérateurs existants (QSR et QUR), pour lesquels une coupure à 20 K était nécessaire lors de leurs utilisation pour le LEP. Les deux réfrigérateurs sont ensuite connectés à la boîte cryogénique d'interconnexion (QUI) qui alimente les deux secteurs adjacents. Ceci permet aussi une redondance partielle par une alimentation en puissance cryogénique des deux réfrigérateurs vers l'un ou l'autre des secteurs.

A travers les lignes cryogéniques d'interconnexion qui descendent par les puits d'accès en souterrain, l'hélium à 20 K passe par la boîte froide inférieure (QUR) où il est refroidi à 4,5 K, avant d'entrer dans la boîte cryogénique d'interconnexion (QUI). Par contre, l'hélium venant de la QSRI, déjà à 4,5 K, entre directement dans la QUI. A partir de celle-ci, des secteurs adjacents sont alimentés en hélium liquide. Ceci permet une redondance partielle par une alimentation en puissance cryogénique par les deux réfrigérateurs vers l'un ou l'autre des secteurs.

La réfrigération de puissance inférieure à 2 K implique l'utilisation de compresseurs traitant l'hélium gazeux à très basse température. Ces compresseurs cryogéniques à centrifuges sont logés avec leur infrastructure dans des boîtes de compresseurs froids (QURC), interconnectées à la QUI par des lignes de transfert cryogénique.

La puissance cryogénique, la distribution d'hélium liquide super-critique et la récupération de l'hélium évaporé vers les réfrigérateurs sont transmises par la ligne de distribution séparée (QRL). Cette ligne de 25 km de longueur environ est installée dans le tunnel LHC, parallèlement aux cryostats d'aimants, et est interconnectée à des cellules composées de deux quadripôles, six aimants dipolaires tous les 107 m environ et d'autres équipements supraconducteurs.

La mise en froid de l'ensemble des parties froides du LHC dans un temps raisonnable (deux semaines environ), tout en limitant les gradients de température et les contraintes thermiques qui en résultent dans la structure des électro-aimants, requiert l'extraction d'une puissance considérable à partir de la température ambiante. Cette opération est réalisée par la circulation forcée d'hélium gazeux sous pression à travers la chaîne des aimants. Cet hélium gazeux est refroidi par évaporation de l'azote liquide dans les échangeurs de chaleur des boîtes froides situées à la surface.

La masse froide des cryoaimants, travaillant à une température de 1,9 K, est immergée dans un bain statique d'hélium superfluide pressurisé à 1 bar. La chaleur générée ou déposée dans les conducteurs est transportée par conduction thermique vers un tube échangeur de chaleur dans lequel circule de l'hélium II, saturé à une pression sous-atmosphérique et à une température quasi-constante. Cet état d'équilibre est maintenu par pompage de l'hélium gazeux froid grâce aux compresseurs froids (QURC).

L'alimentation continue d'hélium liquide compense l'hélium évaporé par la charge thermique de la boucle. La figure III.40 montre le principe de refroidissement des aimants supraconducteurs et la figure III.41 présente le schéma d'une boucle de refroidissement pour une cellule standard du LHC. Le réchauffage de l'ensemble d'une cellule se fait par une circulation forcée de l'hélium gazeux en augmentant graduellement sa température. Ce réchauffage est accéléré par des résistances électriques situées dans la masse froide des aimants. Du point de vue de la sécurité, la conception du système cryogénique a trois caractéristiques qui sont à souligner:

- la présence d'un collecteur (ligne D en figure III.41) incorporé dans la ligne cryogénique de distribution séparée (QRL) d'un volume de 60 m^3 par secteur, travaillant normalement à basse pression et à une température de 20 K. En cas de transition résistive (quench) d'un aimant, l'hélium froid s'échappe par des vannes de quench vers ce collecteur (pression de travail 20 bar) qui peut absorber des décharges importantes d'hélium qui sera récupéré par les réfrigérateurs. Ce collecteur est aussi utilisé pour récupérer l'hélium évaporé à la suite d'une détérioration du vide d'isolement des aimants ou de la QRL;
- l'absence d'azote liquide ou gazeux dans tous les circuits du système cryogénique au souterrain du LHC;
- l'absence de tout élément mécanique pour assurer la circulation de l'hélium liquide dans les boucles de refroidissement, donnant un comportement statique au fluide en cas de rupture d'un collecteur.

De plus, tous les matériaux utilisés pour le système cryogénique sont adaptés à l'utilisation à basse température. Le code de sécurité D2 (équipement sous pression), qui est essentiellement basé sur la Directive européenne 97/23/CE et le code de construction CODAP est appliqué pour la conception, la fabrication, les essais, l'installation et l'utilisation de toutes les parties du système cryogénique soumis à la pression.

3.4.4 Le système de pompage pour vide

Le système à vide du LHC se subdivise en deux parties, chacune d'elles devant respecter des spécifications techniques particulières.

Le vide d'isolation

Les systèmes cryogéniques nécessitent un vide d'isolation afin de réduire au maximum les échanges thermiques entre les parois à la température ambiante et les parois froides par conduction à travers le gaz. Pour ce faire, des pressions inférieures à 10^{-6} mbar sont nécessaires. Le vide d'isolation de la machine^[1] sera subdivisé suivant l'axe longitudinal en tronçons de 107 m de long avec un volume proche de 100 m^3 en utilisant des membranes fines placées transversalement. Celles-ci sont communément appelées les «barrières vide». De cette manière, le pompage pourra être réalisé à partir de la pression atmosphérique avec une combinaison de pompes roots et de pompes turbomoléculaires. De plus, l'importante surface des parois froides due à la présence des aimants constituera un cryopompage important. Ainsi, une fois la machine refroidie, aucun pompage extérieur ne sera nécessaire pour maintenir le niveau de pression. Lors du premier cycle de refroidissement de la machine, la pression dans le vide d'isolation devra être inférieure à 10^{-2} mbar. Cette opération nécessitera plusieurs jours de pompage. Les cycles suivants seront plus rapides dans la mesure où les mises à la pression atmosphérique seront réalisées avec de l'azote sec et dépourvu de toute contamination. Le pompage de tout autre système cryogénique comme, par exemple, les lignes cryogéniques (QRL), sera obtenu par l'utilisation de systèmes de pompage similaires à ceux décrits précédemment. La mesure de la pression dans le vide d'isolation dans la gamme de la pression atmosphérique jusqu'à 10^{-6} mbar sera obtenue par l'utilisation combinée d'une jauge Pirani

et d'une jauge Penning dont le contrôleur pourra être piloté à distance.

Le vide faisceau

Les spécifications pour le vide faisceau du LHC ^[2] découlent de l'analyse des phénomènes suivants:

- taux de perte des particules du faisceau suite à des interactions avec le gaz résiduel qui détermine la durée de vie du faisceau;
- augmentation de la taille transversale du faisceau par diffusions élastiques sur le gaz résiduel ce qui entraîne une diminution du faisceau et, par conséquent, une diminution de la luminosité;
- dépôt d'énergies dans les masses froides des aimants par diffusion élastique de particules à 7 TeV qui n'auront pas été interceptées localement par les équipements destinés à cet usage. Ces particules diffusées contribueront de manière non négligeable aux dépôts de chaleur dans le système cryogénique à 1,9 K.

Pour les paramètres nominaux du LHC, c'est le dernier effet qui s'avère être le plus contraignant pour les performances du vide, car il équivaut à une densité moyenne de 10^{15} molécules d'hydrogène/m³ ou à une pression ambiante de 10^{-9} mbar.

La chambre à vide du LHC et l'écran du faisceau

La chambre à vide dans les sections arcs du LHC constitue également la paroi interne de la masse froide des aimants. A une température d'exploitation de 1,9 K, ces surfaces froides se comportent comme de parfaites cryopompes pour tous les gaz, à l'exception de l'hélium. Une étanchéité parfaite entre le vide faisceau et l'hélium présent dans la masse froide constitue le défi majeur du design.

Afin de réduire le dépôt de chaleur dans la masse à 1,9 K provenant de diverses sources liées à la présence du faisceau, un écran de chaleur travaillant à des températures comprises entre 2 et 5 K, appelé l'écran de faisceau, sera inséré sur toute la longueur de tous les éléments froids. La figure III.42 est un schéma montrant la paroi de l'aimant avec son écran de faisceau. L'écran de faisceau est constitué d'un tube en acier inoxydable d'1 mm d'épaisseur avec un dépôt interne de cuivre de 50 µm et deux tubes permettant un refroidissement par circulation d'hélium. L'écran est percé de petits trous dont la surface est équivalente à 2% de la surface totale, de sorte que les molécules de gaz désorbées à l'intérieur de l'écran de faisceau puissent diffuser la paroi froide de la chambre à vide.

Les diverses sources de dépôts d'énergie dans l'écran de faisceau sont ^[3] :

- le rayonnement synchrotronique produit par les protons de haute énergie;
- les pertes résistives dues aux courants image circulant dans la couche de cuivre de l'écran de faisceau;
- les photos-électrons générés par le rayonnement synchrotronique et accélérés par le champ électrique induit par le faisceau de protons et qui vont déposer leurs énergies sur les parois froides.

Dans les conditions normales d'opération avec faisceaux, la somme de toutes les pertes de chaleur dans l'écran de faisceau s'élève à environ 1 W/m d'arc pour les deux faisceaux. Ce dépôt de chaleur sera extrait par les deux tubes de refroidissement à l'hélium, montés sur l'extérieur de l'écran de faisceau.

Pompage du vide faisceau

Le vide faisceau sera obtenu, pour une gamme allant de la pression atmosphérique à 10^{-6} mbar, par une utilisation combinée de pompes primaires, pompes turbomoléculaires et pompes ioniques. Pendant le fonctionnement normal du LHC, toutes les pompes mécaniques peuvent être isolées du vide faisceau par des vannes; les pompes ioniques et les cryopompages du gaz par les parois froides de l'aimant sont suffisamment élevés pour maintenir un bon vide. Les connexions des pompes extérieures sont situées sur les sections courtes à environ 53 m en moyenne les unes des autres.

Système à vide pour les sections à température ambiante et pour les zones extérieures

Une partie du système à vide à la température ambiante sera pompée à l'aide de pompes classiques du type pompes à sublimation et pompes getter. Ces sections seront étuvées à des températures entre 150 et 300°C, de manière à réduire le taux de dégazage. L'étuvage sera réalisé par l'utilisation de jacquettes électriques chauffantes montées à l'extérieur des chambres. Cependant, dans les expériences, l'étuvage nécessitera le développement de nouveaux systèmes de chauffage qui n'affecteront pas la transparence du tube faisceau.

Les chambres standard à température ambiante seront des profilés de cuivre extrudés d'une épaisseur d'environ 2 mm. Le cuivre est indispensable afin de réduire la résistance électrique du tube faisceau. Les chambres seront assemblées par des brides et des soufflets. Le système à vide du LHC est subdivisé en secteurs de longueurs adaptées aux performances des systèmes de pompage par des vannes entièrement métalliques afin de faciliter l'installation initiale des composants, ainsi que les interventions à venir. Des interlocks sur les signaux de pression provoqueront une fermeture des vannes en cas de remontée brutale de la pression dans une partie du système à vide.

Références

- [1] P. Cruikshank, G. Engelmann, W. Koelemeijer, N. Kos, A.G. Mathewson : «Insulation vacuum system of the LHC, Vacuum», 48, 7-9, p. 759-762, 1997
- [2] O. Gröbner : «Technological problems related to the cold vacuum system of the LHC, Vacuum», 47, 6-8, p.591-595, 1996
- [3] O. Gröbner : «The LHC vacuum system», LHC Project report 181 and PAC 97, Vancouver, 12-16 May 1997

3.4.5 Le système d'accélération et ses alimentations

Le système de haute fréquence (400 Mhz) est destiné à accélérer les protons et les maintenir groupés en paquets. La tension HF, intégrée sur la circonférence de la machine, est de 16 MV. Cette tension est fournie par un ensemble de huit cavités supraconductrices par faisceau, soit un total de 16 cavités pour la machine. Ces cavités sont situées de part et d'autre du point d'interaction n°4. A cause des dimensions des cavités, la séparation des deux faisceaux est augmentée de 194 mm à 420 mm dans cette section de la machine.

Etant donné que le courant des protons qui circule dans l'accélérateur est très élevé, (0,53 A par faisceau), des cavités supraconductrices qui travaillent à une température de 4,5 K et qui permettent d'avoir une grande énergie HF stockée ont été choisies. Dotées d'une grande ouverture (300 mm) pour le passage des faisceaux, les cavités sont beaucoup moins sensibles que les cavités

conventionnelles en cuivre aux variations brusques de l'intensité des faisceaux, dues en particulier aux longs intervalles (3 μ s) entre les trains de paquets. De plus, grâce à leur géométrie particulière, les inévitables modes parasites des cavités n'ont pas besoin d'être très fortement amortis pour assurer la stabilité des faisceaux de protons circulants.

La puissance HF est fournie par des klystrons d'une puissance de 1 MW chacun. Ils sont installés dans les tunnels klystrons (UA), distants de 8 m du tunnel principal. Chaque klystron est connecté à deux cavités par des guides d'ondes de puissance logés dans des forages de 900 mm de diamètre qui relient le tunnel klystron au tunnel machine. Les cinq alimentations à courant continu de haute puissance (100 kV, 40 A) sont placées dans le bâtiment SR 4 en surface. Le système HF est complété par des systèmes d'amortissement qui assurent la stabilité des paquets de protons et qui minimisent les pertes du faisceau, à l'injection notamment. Le système longitudinal comprend trois cavités par faisceau (fréquence centrale 200 MHz, longueur 0,8 m, température ambiante). Chaque cavité est fortement couplée à une tétrode d'une puissance de 60 kW, ce qui donne une large bande à l'ensemble. Les alimentations à courant continu des tétrodes (12 kV/10 A) se trouvent dans le tunnel klystron (UA).

Le système transversal est basé sur des déflecteurs électrostatiques comportant une paire de plaques d'une longueur de 1,5 m chacune. Il y a trois déflecteurs par plan (horizontal et vertical) et par faisceau, soit 16 au total. Chacun d'entre eux est équipé d'une tétrode d'une puissance de 30 kW, nécessaire pour engendrer une tension allant jusqu'à 7,5 kV entre les plaques. Les préamplificateurs sont installés dans le tunnel machine et les alimentations à courant continu dans le tunnel klystron.

3.4.6 Le pilotage du faisceau et les éléments de correction

Le long des lignes de transfert de faisceau du SPS vers le LHC, dans les lignes conduisant chaque faisceau vers leur système de décharge, et sur chacun des deux anneaux, divers moyens de diagnostics vont permettre la mesure et le contrôle, grâce aux éléments de correction, des paramètres essentiels au bon fonctionnement de tout le complexe. Parmi les plus importants de ces paramètres, on compte:

- la trajectoire dans les lignes de transfert que le faisceau ne traverse qu'une fois et, dans les anneaux, celle que les particules empruntent au cours de leurs révolutions successives (orbite fermée);
- les pertes de particules survenant à l'intérieur de la chambre à vide lorsque le faisceau atteint une limite d'ouverture géométrique;
- les dimensions transversales du faisceau;
- la population de chacun des 2835 paquets composant un faisceau circulant ainsi que le courant total;
- les oscillations qu'effectuent les particules autour de leur orbite d'équilibre, ou oscillations bétatroniques, qui, si elles ne sont pas maîtrisées, donnent lieu à des instabilités entraînant des pertes de faisceau.

Trajectoire et orbite fermée

A l'aide d'écrans que l'on place dans l'ouverture de la chambre à vide et qui émettent un rayonnement dans le spectre de la lumière visible lorsqu'ils sont traversés par des particules chargées, il est possible, en collectant ce rayonnement et en l'analysant avec une caméra, de visualiser à la fois la position et les dimensions transversales du faisceau. Le principe utilisé est soit la phosphorescence du matériau qui compose les écrans, soit le rayonnement de transition au

passage entre deux milieux d'indice de réfraction différent. Cette dernière technologie est en plein essor dans le domaine des accélérateurs car elle permet d'utiliser des couches très minces, de l'ordre de quelques millièmes de millimètre. Une dizaine d'écrans est prévue en des points particuliers dans chaque ligne de transfert et dans chaque anneau du LHC pour les réglages préliminaires. Ces écrans ne peuvent être ni trop nombreux, car ils auraient alors un effet perturbateur, ni traversés par le faisceau pendant un grand nombre de tours car ils seraient détériorés.

L'acquisition de la trajectoire et de l'orbite fermée s'effectuera avec précision à l'aide de stations de mesure, distribuées régulièrement et totalement transparentes pour les particules. Un tel détecteur de position est associé à chaque aimant quadripolaire qui focalise le faisceau, et au centre duquel, dans un système d'optique magnétique dit «à focalisation forte»; les excursions maximales de trajectoire sont attendues dans le plan perpendiculaire au mouvement longitudinal des particules. La distance entre deux aimants quadripolaires étant de l'ordre de 50 m, environ 50 stations de mesure de position sont prévues dans chacune des lignes de transfert entre le SPS et le LHC, alors qu'un millier de telles stations, 500 par anneau, seront installées sur la machine LHC.

A chaque moniteur de position, les deux composantes de l'excursion du faisceau, horizontale, située dans le plan médian de la chambre à vide, et verticale, perpendiculaire à ce plan médian, peuvent être mesurées. Des aimants correcteurs dipolaires, fournissant une force magnétique constante à travers l'ouverture dans l'une ou l'autre des deux directions considérées, sont associés à chaque moniteur de position et permettent d'appliquer les corrections s'avérant nécessaires selon les observations et les calculs théoriques.

L'excursion du faisceau dans une direction est déterminée en comparant les signaux fournis par deux senseurs disposés symétriquement par rapport à l'axe de la chambre à vide. Quatre senseurs, ou électrodes, placés à 90° l'un de l'autre, comme le montre la figure III.43, sont donc nécessaires à chaque station d'observation pour mesurer les deux composantes intéressantes. Dans les lignes de transfert TI2 et TI8, les électrodes utilisées seront les boutons électrostatiques équipant actuellement la machine LEP, alors que pour les anneaux du LHC, un type nouveau de boutons est à l'étude, épousant parfaitement la section circulaire de la chambre à vide, (figure III.43), pour éviter tout phénomène parasite susceptible de perturber le faisceau.

Dans les anneaux du LHC, la grande majorité des détecteurs de position, environ 950, devra fonctionner à la température des aimants quadripolaires auxquels ils sont associés à l'intérieur du cryostat. Des problèmes particuliers sont donc posés. Une grande fiabilité est requise en raison du manque d'accessibilité et également du coût que nécessiterait une remise de tout le secteur à température ambiante pour pouvoir pratiquer l'intervention. Des câbles spéciaux, d'une longueur d'environ 1 m, sont à l'étude pour amener le signal électrique de chacune des quatre électrodes d'une station de mesure à l'extérieur du cryostat de la machine. Ces câbles, au nombre de 3800, doivent satisfaire à un compromis entre une bonne conductivité électrique et une faible conductivité thermique, afin de limiter les apports de chaleur au système de cryogénie. Il s'agit en effet d'extraire le signal avec le minimum de perte, mais aussi d'importer une quantité de chaleur la plus réduite possible par conduction thermique depuis l'extrémité du câble qui est à température ambiante à l'extérieur du tank.

Les pertes électriques ont, quant à elles, pu être minimalisées par l'adoption de senseurs de type bouton, d'un diamètre de 24 mm, et qui fournissent un signal beaucoup plus faible que les senseurs à géométrie longitudinale initialement prévus. Ceci a été rendu possible grâce à l'installation de l'électronique de traitement dans le tunnel même de la machine, à une distance moyenne d'environ 25 m, sous les aimants de courbure principaux qui la protègent, lors du

fonctionnement de la machine, d'un taux de radiations prohibitif.

Cette option a été adoptée tout en garantissant l'utilisation du système de mesure de position sur toute la plage d'intensité de faisceau prévue, de l'impulsion pilote de $5 \cdot 10^9$ particules utilisée pour les tests et réglages préliminaires sans risque de provoquer une transition des aimants supraconducteurs à l'état normal, jusqu'à la charge ultime de $1,66 \cdot 10^{11}$ particules par paquet circulant. Dans cette gamme d'intensité, la position du faisceau est donnée à chaque détecteur avec une précision comprise, selon le courant par paquet, entre 0,3 mm et 1 mm pour la mesure d'une trajectoire sur un seul passage, alors qu'elle est meilleure de 0,1 mm lorsque l'on mesure l'orbite fermée en faisant la moyenne des acquisitions sur plusieurs tours.

Pour établir sans trop de difficultés, lors de la période de démarrage du LHC, les premières trajectoires et orbites fermées du faisceau, il est important de garantir un bon alignement de chaque station de mesure de position par rapport à l'aimant quadripolaire qui lui est associé. Par simulation, on montre qu'une tolérance de 0,5 mm est en moyenne permise pour bâtir une orbite fermée dont les excursions transverses maximales sont de quelques millimètres. Les estimations montrent que lorsque l'on additionne toutes les sources d'erreurs rencontrées au cours de la construction, de l'assemblage et de l'installation des moniteurs de position, cette exigence sera satisfaite. Plus tard, afin d'affiner le réglage de l'orbite fermée, un système d'asservissement permettra d'évaluer et de corriger le centrage du moniteur de position par rapport à l'aimant quadripolaire associé avec une précision de 0,05 mm.

Pertes de particules

Les pertes de particules doivent être strictement surveillées dans un accélérateur tel que le LHC dont la plupart des électroaimants supraconducteurs fonctionnent à la température de 1,9 K. A l'énergie d'injection de 450 GeV, les calculs montrent qu'un taux de perte de 10^{10} particules/s contre la paroi de la chambre à vide des aimants supraconducteurs peut induire une transition à l'état normal. Les réglages préliminaires s'effectueront à l'aide de paquets pilotes ayant une population inférieure d'un facteur 2 à ce niveau et de nombreux instruments sont spécifiés pour fonctionner à ce courant. A l'énergie nominale de 7 TeV, le taux de perte suffisant pour provoquer une telle transition s'abaisse à 10^7 particules/s. Il est donc vital de se situer en amont et de pouvoir diagnostiquer des pertes d'un niveau très inférieur afin de prévenir tout incident.

L'ouverture géométrique transversale sera définie dans deux régions dédiées de la machine laissées à température ambiante. Dans ces zones, la partie périphérique et peu dense du faisceau sera rabotée en permanence par une série de blocs collimateurs répartis sur 500 m, qui sont prévus pour absorber toutes les particules instables dont les oscillations transverses ont une amplitude trop élevée. Des détecteurs de pertes seront donc installés au voisinage de ces collimateurs pour déceler un taux de perte anormal ou une instabilité soudaine du faisceau. A raison d'un détecteur par bloc, un minimum de 50 est requis dans ces zones.

Cependant, entre deux tours consécutifs sur les 26 km restants, une probabilité existe que certaines particules instables s'écartent de l'ouverture définie dans les régions des collimateurs. Les excursions transverses maximales d'orbite et les plus grandes dimensions de faisceau étant attendues au centre de chaque aimant quadripolaire, des simulations incluant des hypothèses réalistes sur les erreurs d'alignement des différents composants de la machine ont montré que le risque potentiel de telles pertes existe sur une distance s'étendant de -5 m à +5 m de ce point. Chaque anneau sera par conséquent surveillé à chaque quadripôle le long de cette zone de 10 m. Toute perte de particules contre la paroi interne de la chambre à vide va générer une gerbe de

particules secondaires, se propageant transversalement à travers des divers composants du cryostat, et dont les effets seront mesurables sur la surface externe du tank à vide.

La sensibilité de détection est relativement constante sur une longueur d'environ 2 m. Ainsi, quatre détecteurs placés à cette distance l'un par rapport à l'autre sont requis de part et d'autre du cryostat, au niveau de chaque quadripôle, pour surveiller dans les deux anneaux la zone à risque; au total, un minimum de 4000 détecteurs est donc nécessaire. La position radiale choisie pour ces détecteurs est celle qui offre la meilleure sensibilité en fonction des différents éléments composant l'intérieur du cryostat. Des simulations révèlent qu'elle se situe à environ 20° par rapport au plan médian, comme le montre la figure III.44. Le choix du type de senseurs pour ces détecteurs est encore à l'étude entre diodes, scintillateurs, ou chambres à ionisation. En tout état de cause, ils devront mesurer des niveaux de pertes inférieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux susceptibles de générer une transition des aimants à l'état normal.

Le profil des faisceaux

La connaissance de la répartition des particules dans le plan perpendiculaire à leur orbite de révolution est essentielle pour juger du bon réglage de la machine. Dans les lignes de transfert et de décharge, que le faisceau n'emprunte qu'une fois, les écrans, qui ont déjà été mentionnés pour la mesure de position, peuvent être utilisés pour visualiser et analyser les dimensions transversales du faisceau, de l'ordre du millimètre. D'autres méthodes doivent être employées dans les anneaux où le faisceau effectue un grand nombre de révolutions. Les instruments utilisés ne doivent avoir que peu, sinon aucun, effet perturbateur.

Les détecteurs à fil entrent dans cette catégorie. Leur principe est de balayer transversalement le faisceau avec un fil dont le diamètre, de l'ordre de quelques centièmes de millimètre, est suffisamment fin pour ne pas le perturber de façon significative. En analysant le signal qui résulte du passage du faisceau, à chaque tour, à travers le fil, on peut reconstituer la distribution des particules dans la direction, horizontale ou verticale, de déplacement du fil. Ce type de détecteur donne des résultats très précis et peut être également utilisé pour calibrer les autres instruments fondés sur d'autres principes et donnant le même genre d'informations. Cependant, une de ses limites est le niveau de courant de faisceau que le fil peut supporter avant détérioration par échauffement. Dans le cas du LHC, les calculs montrent que cette limite se situe à environ $1/10^{\text{ème}}$ de l'intensité nominale. Il est prévu d'installer au moins un détecteur à fil par plan transversal et par anneau, soit un minimum de quatre.

Des télescopes analysant le rayonnement synchrotronique sont également à l'étude. Ils utilisent la propriété qu'ont les particules chargées d'émettre un rayonnement électromagnétique lorsqu'elles subissent une force, par exemple dans un champ magnétique dipolaire. Les dimensions de ce signal sont directement liées à celles du faisceau. Cet effet variant inversement à la masse des particules, il est très important et utilisé de façon intensive dans les machines à leptons telles que le LEP, et restait marginal dans les accélérateurs à protons. Dans la gamme d'énergie prévue du LHC, il est cependant exploitable dans les longueurs d'onde allant de l'infrarouge à l'ultraviolet. Une station suffit dans chaque anneau car elle fournit des informations à deux dimensions et permet de reconstituer horizontalement et verticalement la taille et le profil du faisceau. Un chemin optique approprié doit être mis en oeuvre afin d'extraire la lumière émise sans perturber les particules qui circulent, et de l'envoyer pour analyse vers une caméra. Plusieurs sites possibles sont à l'étude pour ces télescopes.

D'autres outils permettant de reconstituer dimensions et distributions transversales du

faisceau sont l'objet d'investigations. L'un consiste à extraire et à analyser en un point de la machine les particules secondaires, ions ou électrons, résultant de l'ionisation du mélange de gaz résiduel présent dans la chambre à vide, au passage du faisceau. La largeur du signal recueilli est caractéristique de celle du faisceau. Un modèle de moniteur fonctionnant sur ce principe, fourni par le laboratoire allemand de DESY, où il est utilisé sur la machine HERA, est actuellement testé au SPS, l'injecteur du LHC. La possibilité d'utiliser un moniteur développé à l'université d'Orsay analysant également les ions émanant du gaz résiduel est aussi étudiée. Une autre méthode est testée, reprenant le principe du détecteur à fil métallique, mais en remplaçant ce dernier par un jet gazeux d'ions qui balaie transversalement l'ouverture de la chambre, permettant ainsi d'observer à chaque révolution, par réactions nucléaires, un signal proportionnel à la densité locale de particules. Si les tests sont concluants, l'instrument aurait l'avantage de ne pas souffrir de limitation en courant de faisceau.

L'intensité du faisceau circulant

La charge contenue dans chaque paquet pourra être mesurée en permanence par des transformateurs rapides de courant, fonctionnant sur toute la gamme d'intensité prévue, du paquet pilote de 5.10^9 particules, au faisceau circulant au courant ultime, constitué de 2835 paquets de $1,66.10^{11}$ protons chacun. Pour un paquet pilote, une précision sur la mesure de l'ordre de 1% sera atteinte.

Dans chaque anneau, des transformateurs à courant continu, atteignant une résolution de l'ordre de $1 \mu A$, permettront en outre de mesurer l'intensité totale de chaque faisceau et de vérifier les données fournies par les transformateurs rapides. Des transformateurs rapides sont prévus aux extrémités de chaque ligne amenant le faisceau du SPS dans le LHC pour juger de l'efficacité du transfert. Un tel transformateur peut également être placé dans chaque ligne de décharge. Par comparaison avec les moniteurs de courant présents dans chaque anneau, on pourra donc évaluer à tout moment l'efficacité des processus d'injection et de décharge des faisceaux.

Des transformateurs rapides et à courant continu sont prévus en deux, voir trois exemplaires dans les anneaux, afin d'avoir suffisamment de redondance en cas de mauvais fonctionnement de l'un des instruments. La résolution élevée des transformateurs à courant continu permettra d'échantillonner sur quelques secondes le taux de perte et la durée de vie des faisceaux avec une précision de l'ordre de 1%. Le courant de faisceau circulant pourrait aussi être mesuré tout autour de la machine grâce au signal que fournissent les moniteurs de position. Toutefois, ces moniteurs sont sensibles aux pertes de faisceau accidentelles qu'ils peuvent éventuellement subir, ce qui les rend, pour cette mesure, moins précis et moins fiables que les transformateurs de courant.

Les oscillations bétatroniques

Sous l'action d'effets perturbateurs, tels que mouvements sismiques ou bruits électriques dans les alimentations des électroaimants, le faisceau de particules en rotation est excité et oscille en permanence autour de son orbite d'équilibre. Ces oscillations transversales, ou oscillations bétatroniques, entraînent des pertes de faisceau si leur amplitude excède l'ouverture définie de la machine. Un système d'asservissement, composé dans chaque plan transversal d'un détecteur sensible couplé à un déflecteur électrostatique, mesure et amortit continuellement ces oscillations.

Cependant, le nombre d'oscillations bétatroniques effectuées par tour dans chacun des plans horizontal et vertical doit être rigoureusement contrôlé et ajusté pour interdire certaines valeurs qui, sur plusieurs révolutions, conduiraient à des phénomènes de résonance et donc à des pertes

importantes de faisceau. La mesure de ce paramètre exige d'exciter le faisceau de façon cohérente, et de mesurer les oscillations qui en résultent et dont l'amplitude doit rester de l'ordre de 0,1 mm, pour perturber au minimum les particules qui circulent. Les oscillations sont induites par un aimant pulsé, suffisamment rapide pour n'agir que sur un train de 81 paquets circulants. Des détecteurs, deux par plan transversal, seront installés sur chaque anneau pour les besoins de cette mesure. Ces détecteurs sont analogues à ceux utilisés par les boucles d'asservissement mentionnées plus haut. Leur principe est celui d'un moniteur de position mais leur sensibilité est accrue grâce à l'adoption d'une géométrie différente pour leurs électrodes.

Lorsque la mesure est effectuée, le nombre d'oscillations bétatroniques par révolution peut être ajusté, si nécessaire, en modifiant l'excitation des aimants quadripolaires. Cette revue des différents diagnostics envisagés pour le LHC n'est pas exhaustive. Les systèmes qu'elle décrit sont parmi les plus fondamentaux. D'autres instruments sont prévus avec des fonctions plus spécifiques, notamment pour analyser, à très hautes fréquences, des phénomènes d'instabilité qui peuvent affecter le faisceau.

Mis à part le système de mesure d'orbite, dont la majorité des détecteurs sera installée à l'intérieur du cryostat à proximité de chaque aimant quadripolaire, les autres instruments seront situés dans des zones où la chambre à vide est à température ambiante. Ils n'auront donc pas d'interférence avec le système de cryogénie et seront, en outre, aisément accessibles. Lorsque leur position n'est pas dictée logiquement, soit par leur fonctionnalité, soit par la configuration de la machine, les instruments seront regroupés dans la zone de l'insertion n°4. La séparation entre les deux faisceaux y est maximale et les diverses causes de perturbation y sont les plus réduites.

3.4.7 Le système de contrôle de la machine.

Introduction

Le système de contrôle du LHC devra prendre en compte l'évolution technologique des équipements, des communications et de la supervision des systèmes. Les problèmes de contrôle du LHC seront importants, compte tenu du nombre de composants impliqués, des très grandes distances à couvrir et des systèmes complexes à contrôler. Pendant la construction et la mise en route du LHC, il faudra assurer la sécurité des personnes et donner la possibilité d'effectuer des contrôles locaux indépendamment de l'infrastructure de contrôle final. En fonctionnement normal, le système de contrôle devra fournir des moyens commodes et flexibles pour la surveillance et la commande de tous les équipements de la machine et des services techniques depuis un centre de contrôle commun (PCR) et il devra être possible d'exploiter, de surveiller et de commander des systèmes de type industriel à partir de centres spécialisés, distants de ce centre de contrôle.

L'expérience acquise et les principes conceptuels de base adoptés pour le LEP seront encore valables pour le LHC quoique des techniques industrielles nouvelles et d'importants développements ont vu le jour en matière d'informatique. Une nouveauté cependant, sera le besoin d'une boucle de contrôle en temps réel fournissant une contre-réaction entre l'acquisition des paramètres de l'orbite du faisceau et le courant dans les aimants supraconducteurs [Réf. 1]. Une évolution technologique notable sera l'introduction massive de systèmes industriels qui contrôleront la majorité des équipements de l'accélérateur et les services techniques associés. Ces systèmes industriels se composent d'Automates Programmables Industriels (API) connectés soit à des bus de terrain, soit au réseau de communication des accélérateurs, soit aux deux en même temps. Le problème technique majeur sera l'intégration de ces ensembles, tant du point de vue de leur communication avec le système de contrôle global que de leur supervision à partir d'une salle de

contrôle commune, tout en offrant pour chaque système toutes les facilités fournies d'origine par les industriels pour leurs systèmes [Réf. 2, 3, 4, 5].

La communication sur les longues distances du LHC fera vraisemblablement appel aux techniques de commutation ATM (Asynchronous Transfer Mode) ou de multiplexage SDH (Synchronous Data Hierarchy) sur fibre optique de haute qualité. Un réseau de fibres optiques à large bande passante reliera en surface les huit points d'accès du LHC au centre de contrôle PCR. D'autres liaisons souterraines par fibre optique relieront également les huit fonds de puits et les 16 alvéoles (RE) à ce centre de contrôle commun.

L'évolution des logiciels est rapide et il est difficile de prédire quels seront les langages qui seront retenus pour le projet LHC. Cependant, un effort de convergence et d'unification pour homogénéiser le concept d'accès aux équipements et adopter une approche commune pour la supervision et l'exploitation des accélérateurs au CERN est prévu. Pour la mise en route du LHC, les programmes d'application profiteront largement de cet effort de convergence technique [Réf. 6]. Pour réaliser l'intégration des systèmes industriels, une méthode de communication homogène, ainsi que le partage des données et des commandes, sera développée.

Concernant les alarmes, et plus particulièrement celles qui exigent l'intervention des secours, un système informatique spécifique, probablement basé sur des automates programmables industriels adaptés aux fonctions de sécurité, assurera la redondance avec le système informatique des services techniques pour garantir le niveau de sécurité maximum requis. Autant que possible, les réseaux de transmission correspondants devront éviter les modes communs, par exemple, emprunter des chemins différents dans le tunnel et en surface.

L'architecture du système de contrôle

Elle sera basée sur l'utilisation de matériels et de logiciels conformes aux standards internationaux et, pour les systèmes de contrôle industriels, elle utilisera les produits offerts par les grands fabricants d'automates. Le système de contrôle du LHC sera «ouvert» et capable d'intégrer les produits se conformant aux normes internationales et industrielles.

L'approche «Client-Serveur» sera l'une des caractéristiques essentielles de cette architecture qui devra aussi gérer le flux des données au travers du système de contrôle. Un modèle «Producteur-Consommateur» est prévu, offrant un bon découplage entre le producteur et le consommateur. Ce concept permettra au système de contrôle d'optimiser ses performances, d'être modulaire et d'accepter les changements introduits par les groupes responsables pour les équipements (les producteurs).

Le niveau de radiation, relativement faible dans le LHC, fait que les équipements de contrôle pourront et seront placés à proximité du faisceau. Ceci entraînera une architecture très distribuée avec pour conséquence un impact important sur les réseaux de communication. L'architecture du système de contrôle aura trois niveaux:

- au niveau supérieur, se trouveront les serveurs centraux et les stations de travail des opérateurs des salles de contrôle PCR et les points de contrôle des équipements spécifiques (cryogénie, électricité etc.). La place de travail d'un opérateur étant très exigeante en termes de capacité graphique et de facilité d'interaction, elle devra offrir une interface-opérateur fiable et conviviale. Les serveurs centraux fourniront les services de base de données, le stockage des fichiers, la coordination des diverses tâches de contrôle, la modélisation et le traitement des

alarmes. Les communications par le Web seront utilisées tant par les ingénieurs des accélérateurs que par les physiciens pour l'échange de leurs informations.

- au niveau intermédiaire, se trouveront les ordinateurs de contrôle de processus réalisés en majorité par des automates programmables industriels mais aussi par des châssis VME contenant des microprocesseurs puissants et rapides et par des électroniques spécifiques pour certains équipements du LHC. Les automates programmables industriels piloteront des bus de terrain (Profibus ou WorldFIP) auxquels seront connectés des grappes d'automates pilotant des sous-ensembles d'équipement. Les châssis VME serviront plutôt à l'acquisition rapide de données et pour le contrôle en temps réel. L'interconnexion entre le niveau supérieur et le niveau intermédiaire se fera par un réseau de communication utilisant le protocole TCP/IP.
- au niveau inférieur, se trouveront les interfaces spécifiques aux équipements du LHC. Ces interfaces pourront prendre des formes très différentes selon les besoins de contrôle et de surveillance: de simples modules d'entrée/sortie, avec ou sans intelligence intégrée, des contrôleurs industriels élaborés gérant des processus autonomes, ou encore des capteurs intelligents. Toutes ces interfaces seront connectées aux bus de terrain Profibus et WorldFIP.

Réseaux de communication

La transmission à longue distance des communications du LHC, sauf pour le réseau de sécurité, sera réalisée par des fibres optiques avec des techniques de commutation ATM et/ou de multiplexage SDH [Réf. 7]. La bande passante disponible sur fibre optique est à ce jour quasi illimitée et ne sera plus un facteur limitatif dans le futur. Cependant, le problème qui se posera sera l'indépendance et la séparation des services. Les services techniques et les alarmes de sécurité nécessitent une transmission continue assurée 24/24 h et 365 jours/an et supportent mal l'interruption ou l'interférence dues, par exemple, à une réparation ou une reconfiguration requise pour l'un des services assurés pour le contrôle de la machine. Pour le LHC, il y aura un réseau dédié aux alarmes de sécurité et probablement un réseau dédié au contrôle en temps réel, entre l'acquisition des moniteurs du faisceau et le contrôle des alimentations des aimants supraconducteurs, soit requis.

Réseau pour les alarmes de sécurité

Pour la transmission des alarmes de sécurité classées «niveau 3» (voir chapitre V, section 9), destinées au service de secours (SCR) des pompiers, un réseau dédié est envisagé et devra fonctionner 24/24 h, 365 jours/an. La sécurité et la fiabilité maximales seront assurées en alimentant les éléments critiques par des systèmes secourus par batteries, en prévoyant une redondance partielle des équipements et en dupliquant la transmission des alarmes par une voie alternative: celle du réseau des services.

Réseau pour les services

Ce réseau doit fonctionner en permanence 24/24 h, 365 jours/an, pour tous les services techniques tels que la distribution d'électricité et d'eau, le chauffage, la climatisation, la ventilation, la cryogénie, le contrôle des accès du personnel, la vidéo, le téléphone et la surveillance des radiations sur les sites du CERN. Toute interruption sur ce réseau peut entraîner des perturbations sur un ou plusieurs services connexes.

Réseau pour la machine LHC

Ce n'est que lorsque le LHC sera en opération et pendant la période préparatoire à l'opération que ce réseau sera indispensable. Sa fonction principale est de contrôler les équipements propres à l'accélérateur tels que la radio-fréquence, le diagnostic des faisceaux, l'alimentation des aimants, le système de synchronisation et les systèmes de transfert de faisceaux. Il sera

nécessaire de pouvoir reconfigurer ce réseau pour l'adapter à de nouvelles exigences d'exploitation ou pour intégrer de nouveaux équipements dans les contrôles. Ces modifications sont faites pendant la période hivernale d'arrêt des accélérateurs ou à la demande expresse d'un groupe d'utilisateurs des accélérateurs.

Réseau temps réel

Sa réalisation n'est pas encore décidée à ce jour. Le cas échéant, il s'agirait d'un réseau dédié à une fonction très importante du LHC: le guidage précis du faisceau. Ce guidage précis serait obtenu par l'observation des deux faisceaux circulants et le contrôle du champ magnétique créé par le courant fourni aux aimants. Pour que l'effet de contre-réaction soit efficace, il faudrait une transmission rapide, sans délai et un protocole de communication aussi direct que possible entre les moniteurs de faisceau et toutes les alimentations électriques concernées. Ce réseau à caractéristique temps réel serait connecté au réseau machine par une passerelle spécifique.

Réseau de bureautique

Comme son nom l'indique, ce réseau dessert les bureaux et les laboratoires du CERN; il est relié aux réseaux des services et des accélérateurs par des passerelles filtrantes ne permettant que des accès autorisés à ces derniers.

Management des réseaux

Tous les réseaux décrits ci-dessus, à l'exception du réseau pour les alarmes de sécurité, seront reliés à la salle de contrôle centrale (PCR) au moyen de passerelles «switch-routers» assurant l'isolation des différents trafics et permettant un schéma d'adressage cohérent. Le protocole de communication des réseaux des services, des machines et de la bureautique sera en conformité avec la suite des protocoles TCP/IP. Un logiciel de gestion de réseau utilisant les protocoles standard de management, aujourd'hui SNMP et RMON (Simple Network Management Protocol et Remote Monitoring), permettra la surveillance et l'affichage par représentation graphique de l'état des réseaux ainsi que la transmission vers un ordinateur central de traitement des alarmes de sécurité et les événements concernant des défauts de fonctionnement des équipements. Une gestion intégrée et homogène pour l'ensemble des équipements reliés à ces réseaux, y compris les Automates Programmables Industriels devra être réalisée.

Afin de pouvoir redémarrer à distance n'importe quel ordinateur connecté à l'un des réseaux mentionnés ci-dessus, une infrastructure indépendante basée sur un réseau de terrain adapté sera réalisée (Profibus ou WorldFIP).

Contrôle des équipements

La grande majorité des équipements LHC sera contrôlée par des systèmes basés sur des automates programmables industriels (API) sauf certains systèmes spéciaux tels que l'acquisition des paramètres des faisceaux de particules qui nécessite une électronique rapide et spécifique. Le problème principal pour les contrôles résidera dans l'interfaçage et l'intégration fonctionnelle de ces systèmes industriels.

Équipements industriels

L'offre des fabricants d'automates programmables s'est largement diversifiée ces dernières années et couvre aujourd'hui de manière satisfaisante les besoins des contrôles conventionnels du LHC et tout particulièrement les services techniques. Les fabricants abandonnent

progressivement leurs «systèmes propriétaires» pour se conformer plus fréquemment aux «standards ouverts», notamment d'architectures client-serveur basées sur des stations de travail modernes et des standards de communication comme TCP/IP [Réf. 8]. Les fabricants proposent également des systèmes industriels complets, très évolués, livrés avec tous les programmes d'application et de supervision associés ainsi que des contrats de maintenance à long terme pour leur matériel et leur logiciel. Les spécialistes de ces équipements trouveront des solutions toutes faites et bien adaptées à leur besoin, particulièrement pour le contrôle de processus lents. Pour le contrôle du LHC, le challenge principal sera de réussir l'intégration homogène d'offres industrielles disparates et de systèmes de contrôles spécifiques. Une intégration réussie devra offrir une interface-opérateur cohérente et une méthode d'accès standard à toutes les données pertinentes de ces systèmes.

Equipements spéciaux

Dans cette catégorie, on retrouve tous les systèmes spécifiques à l'accélérateur LHC pour lesquels aucune solution industrielle complète n'existe actuellement et n'existera probablement dans un futur proche. Il s'agit d'une part, des équipements d'acquisition ultra-rapide de la position, de la forme et de l'intensité des faisceaux de particules, des systèmes de synchronisation de la radio fréquence et d'autre part, du contrôle à très haute précision des références des alimentations pour les aimants supraconducteurs. Pour l'acquisition des paramètres des faisceaux, le standard VME continuera à être employé. L'équipement spécifique sera réalisé par des ensembles de modules électroniques adaptés aux signaux à traiter et associés à des processeurs puissants et rapides. Un logiciel système conforme au standard POSIX sera préféré parce qu'il est bien adapté au développement et à l'intégration des équipements d'entrée/sortie et aux extensions temps-réel. Le développement d'une électronique spécifique sera requis pour servir de référence précise aux alimentations de puissance destinées aux dipôles supraconducteurs. Pour des raisons de sécurité et de fiabilité, chaque équipement de référence sera connecté en deux points à un bus de terrain WorldFIP à double redondance.

Bus de terrain

Pour le contrôle du LHC, l'usage de trois bus de terrain est proposé: CAN, Profibus et WorldFIP ([Réf. 9]. Compte tenu des distances à couvrir pour la machine LHC, les bus de terrain Profibus et WorldFIP seront utilisés de préférence, le bus CAN étant plutôt réservé aux expériences et aux contrôles à courte distance. Le support à long terme est assuré par les fabricants de ces produits utilisés en masse par l'industrie.

Synchronisation

Le LHC comportera un grand nombre d'éléments répartis géographiquement sur tout le site: les alimentations électriques, le système d'injection, la radio-fréquence, les éléments d'observation du faisceau. Le système de synchronisation permettra de coordonner avec une grande précision les actions de contrôle de ces éléments. L'ensemble de la chaîne des accélérateurs du PS, du SPS et du LHC seront synchronisés par ce système. Des messages courts dits «événements» seront diffusés à tous les équipements connectés au réseau de synchronisation [Réf. 10]. Un train d'événements sera généré au centre de contrôle et envoyé à chaque site du LHC par des fibres optiques. Tous les temps de propagation seront compensés à l'émission de sorte que chaque site du LHC soit parfaitement synchronisé avec les faisceaux de particules. L'interface de synchronisation dans l'équipement de chaque utilisateur recevra tous les événements et les comparera avec un sous-ensemble préchargé et, le cas échéant, déclenchera une action locale. La précision, la fiabilité de la génération et l'émission des événements devront être très bonnes, réduisant ainsi considérablement les exigences de contrôle

en temps réel de l'équipement des utilisateurs.

Supervision et contrôle-commande

La supervision et le contrôle-commande se feront principalement à partir d'une salle d'opération, mais aussi à partir des salles de supervision spécialisées réparties sur le site. La communication entre les opérateurs de la machine et ceux des services techniques devra être très bonne, considérant le fort couplage qui existera entre les aimants cryogéniques et l'opération du faisceau. Cette communication sera facilitée par l'usage systématique d'un protocole standard et ouvert comme TCP/IP et par une méthode d'échange de données homogène entre les divers systèmes. Les liaisons «privées» entre les systèmes industriels seront évitées.

Stations de travail

Le choix des stations de travail pour le contrôle du LHC sera fait ultérieurement, considérant que les performances de ce type d'équipement progressent d'année en année et qu'il est préférable d'attendre le dernier moment pour fixer le choix de ce type de matériel. Cependant, des standards bien établis, tels que TCP/IP et SNMP, permettront une intégration cohérente de plates-formes UNIX et WINDOWS dans les réseaux de contrôle.

Logiciel d'application

Des outils logiciels tels que JAVA et les protocoles Web, qui sont indépendants des systèmes d'opération et des plates-formes utilisées, fourniront un environnement stable pour le développement du logiciel d'application pour le LHC.

Comme les programmes d'application constituent l'interface entre les opérateurs et les différents composants du LHC, leur définition et leur élaboration se fera en étroite collaboration avec les équipes chargées de l'opération, des études physiques de la machine et des groupes responsables des équipements. L'expérience acquise dans ce domaine sur les accélérateurs actuels du CERN servira grandement pour la définition des programmes d'exploitation destinés aux opérateurs du LHC. Il faudra aussi veiller à fournir une ergonomie adéquate à toutes les interfaces homme/machine.

Traitement des alarmes

Une partie essentielle du système de contrôle du LHC réside dans l'acquisition, l'analyse, le traitement et la présentation des alarmes lorsqu'un élément quelconque ne fonctionne pas de façon correcte. On peut distinguer deux grandes catégories d'alarmes: celles qui concernent directement la sécurité des personnes et la protection de l'environnement et celles qui signalent des défauts de fonctionnement des équipements et des logiciels associés. L'un des problèmes à résoudre est l'analyse des conditions de défauts multiples apparaissant lorsque qu'un grand nombre d'éléments signalent un défaut au même instant alors qu'il n'y a qu'une seule faute primaire et que les autres n'en sont que les conséquences. Cette situation est compliquée par le fait qu'un accélérateur de particules évolue et que c'est un outil de recherche continuellement amélioré et modifié. Bien qu'une solution totalement satisfaisante n'ait été trouvée jusqu'à présent, l'expérience acquise dans ce domaine au SPS et au LEP servira pour le développement du système d'alarme du LHC [Réf. 11]. La recherche d'une solution industrielle satisfaisante pour le traitement global des alarmes du LHC sera entreprise.

Alarmes pour la sécurité

Pour les alarmes de «niveau 3» (voir chapitre V, section 9), le maximum de rigueur, de

précision, de rapidité et de fiabilité doit être apporté à leur analyse, à leur traitement et à leur transmission. Ces alarmes de sécurité seront directement envoyées au service de secours du CERN (SCR) par deux voies séparées et indépendantes, évitant ainsi les modes communs en utilisant un cheminement différencié des câbles.

La voie offrant la plus haute fiabilité sera la voie directe vers le service de secours, elle utilisera un système de sécurité de type industriel. Il existe aujourd'hui des Automates Programmables Industriels (API) standards, conçus et développés spécialement pour les systèmes à très haute sécurité qui offrent des possibilités de redondance du traitement et de la transmission des alarmes. L'information donnée sera synthétique et portera essentiellement sur le type d'alarme et sur le lieu géographique précis de l'événement permettant aux pompiers de réagir immédiatement et de se diriger vers le lieu indiqué. Un archivage complet du contexte de ces alarmes sera réalisé.

La voie alternative empruntera le réseau informatique des services techniques et apportera les compléments d'information et les précisions nécessaires sur le type de danger, le lieu et le contexte. Cette voie permettra l'analyse détaillée des alarmes, la reconstruction séquentielle de leur occurrence et leur archivage. Elle permettra aussi au service secours d'affiner et de préciser les conditions de leur intervention.

Alarmes de défaut d'équipement

Ce sont les alarmes les plus nombreuses et les plus fréquentes; elles sont définies comme alarmes de niveaux 2 et 1 (voir chapitre V, section 9) concernant les équipements de l'accélérateur. Selon son origine, une alarme sera aiguillée vers les opérateurs de la machine, vers les opérateurs des services techniques en salle de contrôle TCR et/ou vers l'expert du système en cause. En principe, les opérateurs pourront souscrire au sous-ensemble des alarmes qui les concerne. Les opérateurs en salle de contrôle (TCR) seront présents 24/24 h, 365 jours/an et pourront intervenir ou faire appel aux experts techniques.

Chaque équipement sous surveillance sera susceptible de créer une alarme de défaut de fonctionnement. Lorsque plusieurs équipements utilisent des services communs comme l'électricité, la climatisation, un bus de terrain ou encore un tronçon du réseau informatique, une avalanche d'alarmes consécutives peut être déclenchée. L'intelligence et la puissance du système d'alarme devront être suffisantes pour réduire la majorité de toutes les alarmes créées dans un tel cas et les opérateurs ne recevront qu'un résultat d'analyse synthétique clair et sans ambiguïté.

Fiabilité du système de contrôle

Le système de contrôle du LHC organisera une surveillance systématique de son infrastructure de communication et de commande par l'intermédiaire d'un processus s'exécutant à intervalles réguliers dans toutes les parties du réseau de contrôle, des ordinateurs de processus, des automates programmables et des serveurs du logiciel de supervision. Les défauts de fonctionnement seront affichés sur des écrans à l'usage des opérateurs et des experts techniques. Les composants essentiels du système de contrôle seront alimentés par des systèmes recourus ayant une autonomie suffisante pour maintenir leur fonctionnement pendant un temps minimum, nécessaire à la sauvegarde des informations importantes. Pour atteindre une fiabilité compatible avec une exploitation efficace de la machine LHC, tous les moyens seront mis en oeuvre et feront appel à des solutions techniques générales et conformes à des normes internationales. Par contre, pour la protection du personnel et pour assurer sa sécurité, des solutions spécifiques seront adoptées; elles seront fournies et installées par des sociétés expertes dans ces domaines.

Références

- [Réf. 1] R. Lauckner, R. Rausch, «SPS and LEP Controls, Status and Evolution Towards the LHC Era», International Conference on Accelerators and Large Experimental Physics Control Systems, ICALEPCS'95, 30 Octobre - 3 nov. 1995, Chicago, USA.
- [Réf. 2] M. Rabany, «Interfacing Industrial Process Control Systems to LEP/LHC», ICALEPCS'91, 11-15 nov. 1991, Tsukuba, Japon.
- [Réf. 3] M. Rabany, «Industrial Control Solutions in Research Laboratories» ICALEPCS'95, 30 oct. - 3 nov. 1995, Chicago, USA.
- [Réf. 4] R. Lauckner, P. Liénard, R. Rausch, «Data Communication Infrastructure Available at CERN for Interconnection of Industrial Control Systems» CERN-SL 97-14 CO, mars 1997.
- [Réf. 5] R. Lauckner, R. Rausch, «Integration of Industrial Equipment and Distributed Control Systems into the Control Infrastructure at CERN», ICALEPCS'97, 3-7 nov. 1997, Péking, Chine.
- [Réf. 6] SL/PS convergence - PS Note 98-03 (CO), SL Note 98-21 (CO).
- [Réf. 7] L. Guerrero, P. Liénard, «A New LAN Concept for LEP Machine Networks, a Step Towards LHC», ICALEPCS'95, 30 oct. - 3 nov. 1995, Chicago, USA.
- [Réf. 8] D. Blanc, D. Brahy, W. Heinze, J-M. Maugain, R. Rausch (Chairman PLC-WG), O. Van Der Vossen, S. Waeffler, «Recommendations for the Use of Programmable Logic Controllers (PLCs) at CERN», CERN EP/98-071, LHC/98-001, PS/98-006, SL/98-007, ST/98-096, avr. 1998.
- [Réf. 9] G. Baribaud (Chairman FB-WG), R. Barillère, A. Bland, D. Brahy, H. Burckhart, R. Brun, E. Carlier, W. Heubers, L. Jirden, F. Perriollat, D. Swoboda, P. Vande Vyvre, «Recommendations for the Use of Fieldbuses at CERN», CERN-ECP/96-11, SL/96-58, juin 1996.
- [Réf. 10] G. Beetham, R. Lauckner, C. Saltmarsh, «Overview of the SPS/LEP Fast Broadcast Message Timing System» Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference, March 16-19, Washington, USA, 1987.
- [Réf. 11] M. Tyrrell, «The LEP Alarm System», ICALEPCS'91, 11-15 nov. 1991, Tsukuba, Japon.

3.5 Les expériences

3.5.1 Généralités

Quatre ensembles expérimentaux distincts sont actuellement prévus pour observer les collisions entre particules de haute énergie dans le LHC. Deux expériences sont conçues pour étudier une grande variété de phénomènes et sont relativement polyvalentes: ATLAS au point 1 et CMS au point 5. ALICE, située au point 2, est adaptée à la mesure des interactions entre ions lourds. LHC-b, qui occupe le point 8, est optimisée pour l'observation de particules contenant le quark b appelé «beauté». De petits détecteurs très spécialisés viendront probablement effectuer des mesures spécifiques pendant un temps limité, mais ceux-ci ne nécessiteront pas d'infrastructure supplémentaire. ATLAS et CMS sont les plus grandes installations de physique des hautes énergies jamais construites, et nécessitent l'excavation de nouvelles zones expérimentales. ALICE et LHC-b utilisent par contre les cavernes existantes et ne demandent que des aménagements limités. Les figures III.45 à III 48 montrent schématiquement les quatre expériences du projet LHC.

Le principe des expériences est de trier électroniquement, parmi la masse des collisions qui se présentent, les événements recherchés pour leur potentiel à mettre en évidence un phénomène nouveau. Lorsque ces événements sont très rares, il faut augmenter leur taux de production par un accroissement de la probabilité de collision des faisceaux, ce que l'on appelle la «luminosité»: on obtient alors un flot intense de particules secondaires qui risquent de saturer les détecteurs si ces derniers n'ont pas une granularité, c'est à dire un nombre de canaux, suffisante. Il est également nécessaire d'augmenter la probabilité d'observer ces événements rares en construisant des détecteurs dont l'acceptance couvre le plus grand angle solide possible. La taille des expériences ATLAS et CMS provient de la nécessité de répondre simultanément à ces deux contraintes. Les collisions entre ions lourds ont la particularité de créer un très grand nombre de traces secondaires (plusieurs milliers par collision) et ALICE possède un équipement adapté à cette observation. L'étude du quark b ne demande pas une très grande luminosité, mais le dispositif expérimental doit être capable de mesurer finement chacune des traces produites dans un espace proche du vertex de la collision, ce qui est un des points forts de LHC-b. Les assemblages de détecteurs ont donc des caractéristiques très différentes, mais tous sont susceptibles d'évoluer au fur et à mesure des découvertes et en fonction des progrès techniques. Ils sont donc composés d'éléments modulaires indépendants les uns des autres, conçus pour être complétés ou améliorés avec un maximum de souplesse.

3.5.2 Les zones expérimentales UX 15 et UX 55

Les deux zones expérimentales (UX 15 pour ATLAS et UX 55 pour CMS) représentent chacune près du tiers des travaux souterrains entrepris pour le LHC. Il s'agit de grandes cavernes conçues pour permettre l'installation et la maintenance des détecteurs, tout en conservant la géométrie la plus compacte possible.

La zone expérimentale UX 15 a une longueur de 53 m et une largeur de 30 m. Sa voûte de forme cylindrique culmine à une hauteur de 34,9 m. Elle est creusée le long de l'axe du tunnel principal. Elle est équipée de deux ponts roulants d'une capacité de 65 tonnes chacun, avec une hauteur sous crochet de 24,6 m. La hauteur des faisceaux accélérés par le LHC est de 11,3 m par rapport au sol de la caverne. Deux puits verticaux de 58 m de hauteur, de diamètre respectif de 18 m et 12,6 m et espacés de 31,2 m, relient la zone expérimentale à la surface pour amener et installer les éléments des détecteurs. Le centre du grand puits est proche du centre de la caverne, permettant ainsi d'utiliser le pont roulant de surface lors de l'assemblage de l'aimant central du dispositif expérimental. L'accès du personnel se fait par des galeries qui relient la zone expérimentale à la caverne technique USA15 où aboutit un ascenseur d'une capacité de 33 personnes, doublé par une montée d'escaliers. Les parois de la zone expérimentale sont garnies de passerelles et d'escaliers afin d'accéder aux différents étages de l'expérience. On a veillé de façon systématique à ce qu'il y ait toujours au moins deux accès et sorties possibles à partir d'un point quelconque de la zone souterraine. La température et l'humidité ambiantes sont maintenues à des valeurs stables par une installation de traitement de l'air qui assure également un renouvellement régulier de l'atmosphère pour l'hygiène du personnel et l'évacuation de fuites éventuelles de gaz. Une particularité d'ATLAS est la présence d'un grand volume d'argon liquide dans les calorimètres, et un système placé au ras du sol évacue le gaz froid et lourd en cas de fuites accidentelles. Les deux puits sont fermés par des couvercles métalliques placés au sommet de la caverne une fois achevée l'installation de l'équipement expérimental. En outre, pendant le fonctionnement du LHC, les puits sont recouverts à leur sommet par un blindage en béton d'1 m d'épaisseur afin d'absorber les rayonnements ionisants. Les galeries sont munies d'un système d'accès contrôlé pour interdire la présence de personnel dans la zone expérimentale pendant que des faisceaux circulent dans le LHC.

La zone souterraine expérimentale UX 55 a des proportions similaires, avec une longueur de 53 m et une largeur de 26,5 m. Elle est reliée à la surface, pour la descente du matériel, par un seul puits de 20,4 m de diamètre et de 73 m de haut. Elle est équipée de deux ponts roulants de 20 tonnes. L'accès du personnel se fait à partir de la halle technique USA 55 qui est située à proximité de la zone expérimentale et qui contient les équipements liés à l'exploitation et au contrôle des détecteurs. Un ensemble de passerelles, qui font le tour de la caverne sur trois niveaux, permet d'atteindre le dispositif expérimental. Quatre séries d'escaliers, offrent en permanence un choix de sorties en cas d'urgence. La structure géologique, la qualité de la roche et la présence de nappes d'eau ont fait l'objet d'études détaillées qui ont fortement conditionné le dessin des installations souterraines. Il en résulte entre autre une épaisseur de 7 m pour le mur de séparation entre les cavernes UX 55 et USA 55, épaisseur bien supérieure à ce qui est nécessaire pour se protéger des radiations ionisantes. Les galeries de transfert qui mènent à la zone expérimentale UX 15 sont bloquées lorsque les faisceaux circulent dans le LHC. La fermeture du puits d'accès, les conditions de renouvellement de l'air et les mesures générales de prévention des risques d'accident sont semblables à celles mises en œuvre dans la zone expérimentale UX 15.

3.5.3 Les zones expérimentales UX 25 et UX 85

Les expériences ALICE au point 2 et LHC-B au point 8 réutilisent les ouvrages souterrains construits pour abriter les détecteurs L3 et DELPHI actuellement en exploitation sur le LEP.

La zone UX 25 est un cylindre dont l'axe est parallèle au tunnel principal du LHC et qui mesure 49 m de long et 21,4 m en diamètre. Elle est équipée de deux ponts roulants jumelables de 40 tonnes chacun, à chariots asymétriques pouvant être retournés afin d'approcher les parois latérales dans les meilleures conditions. L'aimant central de L3, qui fournit un champ axial de 0,5 Tesla dans un volume cylindrique de 11,6 m de long et de 11,2 m de diamètre, reste en place pour être utilisé par ALICE. Les manutentions à l'intérieur de l'aimant se font par les extrémités qui peuvent être ouvertes comme la porte d'un immense coffre. L'acheminement, depuis la surface, des pièces polaires de cet aimant a demandé le forage d'un puits de 23 m de diamètre sur une profondeur de 50 m environ. Une ouverture aussi large n'est plus nécessaire depuis l'installation du dispositif expérimental de L3: la salle technique qui contient l'électronique d'acquisition de l'expérience peut ainsi occuper une large fraction de la partie basse du puits d'accès du matériel. Les ouvrages souterrains au point 2 conviennent parfaitement aux besoins d'ALICE et les modifications à entreprendre ne concernent que le blindage et le contrôle d'accès que nécessite l'intensité des rayonnements ionisants au LHC. L'épaisseur de la dalle en béton qui ferme le puits à sa base n'est plus suffisante et il est prévu de monter un mur autour du faisceau. Avec ce blindage supplémentaire, le personnel se trouvant dans la salle technique est protégé en cas de perte accidentelle des faisceaux et peut travailler de façon régulière et prolongée auprès de l'électronique d'acquisition pendant le fonctionnement du LHC.

L'accès à la caverne expérimentale s'effectue par un ascenseur initialement prévu pour la maintenance d'éléments techniques du LEP, situés dans une galerie de service qui communique avec la zone UX 25. Cet accès est strictement contrôlé et il est interdit lorsque des faisceaux circulent dans le LHC. En cas d'urgence, l'ascenseur et l'escalier situés dans le grand puits d'accès du matériel offrent une seconde sortie de secours. La ventilation, les systèmes de détection de gaz, de fumée, d'eau et tous les éléments de sécurité en général reprennent les concepts mis en place pour le LEP mais sont bien entendu revus et complétés en fonction des risques associés à la nouvelle situation.

La zone expérimentale UX 85 est une caverne de forme cylindrique d'un diamètre utile de 21

m et d'une longueur d'environ 70 m, avec un axe horizontal perpendiculaire au tunnel principal du LHC qui le traverse à 15 m d'une des extrémités. Elle est équipée de deux ponts roulants, l'un de 40 tonnes et l'autre ayant deux chariots de 40 tonnes chacun, qui peuvent être jumelés pour soulever des pièces pesant jusqu'à 80 tonnes. Le transport des pièces lourdes ou encombrantes depuis la surface se fait par un puits d'accès du matériel de 10 m de diamètre, décalé par rapport à la zone UX 85 et desservi par une halle de surface SX équipée d'un pont roulant de 80 tonnes. La modification majeure de la zone expérimentale liée à l'opération du LHC est l'édification d'un mur de blindage afin d'isoler la partie de la caverne qui abrite l'électronique d'acquisition de données.

Suivant les règles de sécurité mentionnées précédemment, ce blindage est efficace en cas de perte accidentelle des faisceaux et permet un accès prolongé pendant l'opération du LHC: il s'agit d'un assemblage de blocs de béton d'une épaisseur totale de 3 m sur une hauteur de 12,5 m, puis de 2 m jusqu'au faîte de la caverne. L'accès du personnel se fait par un ascenseur rapide qui relie la surface à une zone de sécurité (ventilation en surpression, portes anti-feu) située aux abords immédiats de l'électronique d'acquisition de l'expérience. Une porte avec accès contrôlé, située dans une chicane du blindage, permet le passage vers le dispositif expérimental lorsque les faisceaux ne circulent pas dans la machine. Un deuxième ascenseur dessert les halles techniques souterraines où se trouvent logés les appareillages auxiliaires de la machine (circuits de refroidissement, alimentations électriques, etc.) qui sont situées dans le prolongement de la zone d'expérience: il offre ainsi une seconde sortie possible en cas d'urgence. La ventilation et les systèmes de sécurité de gaz mis en place pour le LEP restent bien adaptés pour le LHC.

3.5.4 Techniques employées dans les expériences LHC

Les détecteurs ATLAS et CMS sont polyvalents, mais leur objectif principal est de mettre en évidence et d'étudier les bosons de Higgs, en particulier par les électrons et muons qu'ils produisent lorsqu'ils se désintègrent. Les éléments principaux de ces dispositifs expérimentaux doivent donc être capables:

- de mesurer les traces de particules chargées, ce qui est fait à l'aide de trajectographes;
- de déterminer l'impulsion de ces particules en mesurant la courbure de leurs trajectoires dans un champ magnétique produit par de grands électroaimants;
- de mesurer l'énergie des produits d'interaction, qu'ils soient neutres ou chargés, ce qui est le rôle des calorimètres électromagnétiques et hadroniques;
- d'identifier les muons qui sont des particules chargées capables de traverser de grandes quantités de matière tels que les calorimètres et qui seront mesurés par de vastes réseaux de détecteurs que l'on nomme les chambres à muons;
- de reconnaître rapidement les événements intéressants afin de déclencher l'électronique d'acquisition de l'expérience.

ALICE et LHC-b utilisent ces mêmes éléments de base dans leur dispositif expérimental, mais ceux-ci sont optimisés en fonction des caractéristiques des événements que l'on veut observer. L'utilisation d'un trajectographe du type «chambre à projection temporelle» permet de bien mesurer le très grand nombre de traces secondaires qui émergent des collisions entre ions lourds dans ALICE. LHC-b a besoin de mesurer la position du point d'interaction avec une résolution de quelques microns: le détecteur de vertex de LHC-b, le premier étage du trajectographe, utilise une technique de semi-conducteur qui offre une extrême précision avec une grande granularité. Ces deux expériences veulent également pouvoir identifier la nature des traces secondaires à l'aide de compteurs Cerenkov.

Une description générale de ces détecteurs, sans entrer dans les détails techniques de chacun

des ensembles expérimentaux du LHC, permet de mieux comprendre les risques qu'ils engendrent. Les mesures de prévention de ces risques seront détaillées dans le chapitre V.

Aimants expérimentaux

Chaque expérience est dotée d'un ou de plusieurs électroaimants qui peuvent être du type dipôle, solénoïde ou toroïde. Ces aimants créent un champ magnétique intense afin de courber les traces de particules chargées dont l'impulsion (ou quantité de mouvement) est très élevée. Ces électroaimants utilisent des bobines supraconductrices refroidies à l'hélium liquide, à l'exception d'ALICE qui reprend l'aimant du détecteur L3 en lui adjoignant un dipôle «classique» avec un conducteur résistif. Il leur est donc associé d'importantes installations cryogéniques comprenant des liquéfacteurs d'hélium et d'azote, des réservoirs tampons, des échangeurs de chaleur et une tuyauterie complexe. Les gaz utilisés sont inertes et non toxiques. Les cryostats, réservoirs et lignes de transfert, qui subissent des contraintes mécaniques importantes liées à l'utilisation de gaz sous pression ou liquéfiés, sont systématiquement protégés par des soupapes de sécurité ou des disques de rupture. Le système de ventilation est dimensionné pour éviter qu'une fuite importante puisse avoir un effet asphyxiant par déplacement de l'oxygène de l'air. Les courants électriques intenses et les effets mécaniques qui résultent de champs magnétiques forts impliquent également la mise en oeuvre de mesures de sécurité adaptées. Les principales caractéristiques des aimants supraconducteurs expérimentaux sont résumées dans les tableaux III.9 et III.10 ci-après.

Tableau III.9 – Aimants de l'expérience ATLAS

	Toroïde Barrel	Toroïde End-Caps (deux aimants)	Solénoïde
Diamètre externe (m)	20	10	2,5
Longueur totale (m)	25	5x2	5,3
Champ magnétique (T)	4	4	2
Courant nominal (kA)	20	20	8
Energie stockée (GJ)	1,1	0,5	0,04
Masse froide (t)	365	280	6
Méthode de refroidissement	Circulation forcée par pompes centrifuges		Thermosiphon

Tableau III.10 – Aimants des expériences CMS et LHC-B

	<u>CMS</u> Solénoïde	<u>LHC-B</u> Dipôle
Diamètre externe (m)	7	3,6
Longueur totale (m)	12	4,3
Champ magnétique (T)	4	1,1
Courant nominal (kA)	20	20
Energie stockée (GJ)	12,5	0,1
Masse froide (t)	220	Etude en cours
Méthode de refroidissement	Thermosiphon	Etude en cours

Trajectographes

De nombreuses méthodes ont été développées pour observer les traces secondaires produites lors de collisions de particules de haute énergie. Il s'agit dans tous les cas de mesurer les signaux correspondant à l'ionisation produite lorsque des particules chargées traversent un milieu bien défini. Ce milieu peut être un semi-conducteur et les signaux sont alors directement enregistrés par des circuits électroniques comparables aux CCD (Charge Coupled Device) d'une caméra vidéo. Cette technique est appliquée pour les détecteurs de vertex car elle apporte une excellente résolution spatiale. Elle est cependant très onéreuse et ne peut être utilisée pour traiter de grands volumes. On utilise alors une enceinte remplie d'un gaz qui servira à la fois à créer des paires ion-électron le long des trajectoires secondaires et à amplifier le signal correspondant près des électrodes de mesure. Dans les cas les plus simples, c'est un fil métallique qui produit le champ de capture des électrons et qui reçoit le signal électrique correspondant: c'est le principe des «chambres à fils» développées par G. Charpak. On peut également créer un champ électrique homogène et laisser les charges libérées dériver vers les fils de mesure: le temps de dérive est enregistré avec précision afin d'évaluer la distance entre les traces et les fils de mesure dans ce que l'on appelle les «chambres à dérive». Il est possible de mesurer les signaux induits par les ions sur des électrodes situées à proximité des fils: on a alors l'avantage de pouvoir dessiner la forme de ces électrodes en fonction de la géométrie du détecteur ou du taux de comptage prévu, et l'on obtient ce que l'on appelle des chambres à strip (chambres à «bandes») ou des chambres à pad (chambres à «damiers»). Les détecteurs les plus sophistiqués combinent toutes ces techniques, ce qui permet de mesurer directement des points dans l'espace (fils, strip et temps de dérive mesurent chacun une coordonnée): c'est le principe des «chambres à projection temporelle» qui sont bien adaptées lorsque la luminosité n'est pas trop élevée. Les mélanges gazeux doivent être d'une très grande pureté afin de ne pas absorber les électrons produits le long des trajectoires que l'on veut mesurer. Il s'agit typiquement d'un gaz inerte (argon ou CO₂) auquel on doit ajouter un carbure d'hydrogène (méthane, éthane ou isobutane) qui «stabilise» l'amplification du signal le long des fils de mesure. Le bon fonctionnement des détecteurs nécessite un contrôle minutieux de ces mélanges qui sont en général en dessous du seuil d'inflammabilité.

Compteurs Cerenkov

La vitesse de la lumière dans le vide représente, pour la théorie de la relativité, une limite absolue. Il est par contre tout à fait possible que des particules se déplacent plus vite que la lumière dans un milieu dont l'indice de réfraction est différent de l'unité. La lumière Cerenkov est émise lorsque de telles particules sont chargées: il s'agit d'un rayonnement ultraviolet le long d'un cône dont l'angle d'ouverture est fonction de la vitesse de la particule observée. Les compteurs Cerenkov de type RICH (Ring Imaging Cerenkov ou Compteurs Cerenkov à image annulaire) ont un système optique qui focalise cette lumière sur des anneaux: la mesure de leurs rayons permet d'évaluer l'angle d'émission de la lumière Cerenkov, et de connaître la vitesse des particules. Les impulsions de ces particules sont également connues grâce au trajectographe plongé dans un champ magnétique, et on peut donc en déduire leurs masses, ce qui permet de les identifier. Les milieux transparents où la lumière Cerenkov est émise ont un indice de réfraction minutieusement contrôlé. Ce sont souvent des mélanges gazeux. Les détecteurs de la lumière ultraviolette du rayonnement Cerenkov sont assez semblables aux chambres à fils décrites précédemment. Les mesures de sécurité que nécessitent les compteurs Cerenkov sont donc équivalentes à celles mises en place pour les trajectographes.

Calorimètres

Il s'agit de détecteurs capables d'arrêter les particules par interactions multiples et d'en mesurer l'énergie totale. On distingue les calorimètres électromagnétiques (pour la mesure des électrons et des photons) des calorimètres hadroniques (pour la mesure des hadrons, c'est-à-dire protons, mesons et autres particules à interaction forte).

Calorimètres électromagnétiques

Ils fonctionnent par formation de «gerbes», aboutissant à une absorption totale des électrons et des photons dans des matériaux qui ont un nombre atomique Z élevé (par exemple, le plomb). Une gerbe contient un nombre croissant de paires électron-positon, et c'est l'énergie de l'ensemble de ces particules que l'on mesure, soit par ionisation en milieu gazeux ou liquide (argon liquide par exemple pour ATLAS), soit par émission de lumière Cerenkov ou de scintillation dans des monocristaux.

Calorimètres hadroniques

L'absorption des hadrons a lieu dans des matériaux qui présentent un bon compromis entre une densité élevée et une courte longueur d'interaction. Il s'agit en général du fer des culasses qui forment les circuits de retour du flux magnétique des aimants des expériences. Ces culasses sont feuilletées, ce qui permet de constituer des sandwichs avec des «tuiles» de scintillateur associées à des guides de lumière et à des photomultiplicateurs. La somme des signaux observés est alors proportionnelle à l'énergie libérée par la particule lors de son absorption par formation d'une cascade hadronique (constituée surtout de mesons chargés et neutres).

Le calorimètre d'ATLAS utilise de grandes quantités d'argon, qui est un gaz plus lourd que l'air. En cas de fuite, ce qui perturberait immédiatement le fonctionnement de l'appareil, l'argon serait canalisé dans une grande fosse puis évacué vers l'extérieur. La fosse de récupération est considérée en permanence comme un espace confiné dont l'accès est strictement réglementé.

Chambres à muons

L'épaisseur de matière que représentent les calorimètres hadroniques permet d'absorber les particules produites lors des collisions à haute énergie, à l'exception des muons et des neutrinos qui sont les seules particules capables de traverser l'ensemble des détecteurs. Les muons sont chargés (alors que les neutrinos, comme leur nom l'indique, ne le sont pas) et ils peuvent donc être mesurés à l'aide de chambres à fils, de chambres à dérive ou de chambres à strip. Ces détecteurs sont généralement de très grande dimension et leur surface totale peut atteindre plusieurs milliers de m^2 lorsqu'ils enveloppent l'ensemble du dispositif expérimental. Les chambres à muons utilisent donc de larges volumes de mélanges gazeux et ceux-ci sont constamment maintenus en dessous du seuil d'inflammabilité.

Systèmes d'acquisition

Le taux d'interaction prévu au LHC est excessivement élevé, pouvant atteindre près d'un milliard de collisions par seconde pour chacune des deux expériences de haute luminosité (ATLAS et CMS). Cependant, la plupart de ces collisions correspondent à des processus bien connus et ne présentent que très peu d'intérêt. Un filtrage rapide des événements est donc mis en place afin de ne pas se trouver submergé par un flot d'informations inutiles. Des circuits électroniques permettent ainsi de sélectionner les événements potentiellement intéressants et de déclencher l'acquisition des

expériences. Ces circuits doivent être placés le plus près possible des détecteurs pour minimiser le temps nécessaire à la propagation des signaux: ceci permet de raccourcir l'ensemble des câbles d'interconnexion et d'en diminuer le coût ainsi que la masse, source potentielle de fumées et de chaleur en cas d'incendie. L'électronique de déclenchement et de lecture doit également être accessible pendant le fonctionnement du LHC pour des contrôles, réglages ou dépannages, et se trouve ainsi placée dans des salles techniques souterraines (US) situées à proximité des zones expérimentales. La conduite même des expériences est cependant effectuée à partir de terminaux situés dans des locaux au niveau du sol, ce qui réduit considérablement le nombre de personnes amenées à travailler régulièrement en souterrain.

3.5.5 Le système de supervision générale

Chaque expérience a sa propre salle de contrôle locale. La surveillance et le contrôle des expériences et des zones expérimentales sont concentrés dans ces salles, placées dans les bâtiments SXC1 (ATLAS), SX2 (ALICE), SXC5 (CMS) et SX8 (LHC-B). A partir de ces salles de contrôle locales, sont essentiellement contrôlés les alimentations électriques des détecteurs (HT, BT), les fluides utilisés dans les détecteurs, les aimants des expériences ainsi que les différents systèmes pour l'acquisition et le traitement des données. Les alarmes de sécurité, ainsi que les autres alarmes techniques ou informations sur les différents services généraux ou sur l'accélérateur, sont également disponibles dans ces salles de contrôle locales des expériences via les réseaux de communications du LHC (voir chapitre III, paragraphe 3.4.7)

Pendant le déroulement d'une expérience, une présence permanente dans les salles de contrôle est requise. Dans chaque équipe, une personne est désignée chef d'équipe en matière de sécurité (SLIMOS = Shift Leader In Matter Of Safety). Les SLIMOS reçoivent une formation de sécurité approfondie sur tous les détecteurs et les systèmes auxiliaires d'une expérience. Ce sont aussi les SLIMOS qui organisent et coordonnent les premières interventions sur une expérience en cas d'alerte ou de mauvais fonctionnement d'un équipement avant l'arrivée du service de secours. Les différents systèmes de contrôle des expériences, ainsi que le choix du matériel sont actuellement en cours d'étude.

3.6 Contrôle d'accès et verrouillage de sécurité

3.6.1 Définition des zones d'accès au LHC

Le cheminement jusqu'aux tunnels de la machine et aux expériences du LHC nécessite le passage successif à travers différentes zones équipées de systèmes d'accès contrôlés, adaptés aux niveaux de risque de ces zones. Le concept retenu pour tous les contrôles d'accès du LHC assure une cohésion depuis l'arrivée sur un site jusqu'à l'accès à la machine et aux expériences en souterrain. Les mesures pour garantir la sûreté de chaque zone sont définies et répertoriées après une analyse des risques. La classification des différentes zones avec leurs contrôles d'accès appropriés est la suivante (figure III.49).

Les sites et les bâtiments de surface du LHC

L'accès à ces zones correspond à l'accès général au domaine du CERN et à l'accès aux bâtiments techniques, y compris les bâtiments en tête de puits desservant les zones en souterrain (bâtiments SD, SX, SZ). En surface, il n'y a pas de risques de radiation et le contrôle d'accès doit satisfaire les aspects liés à la protection de la propriété et du patrimoine, ainsi qu'aux risques

industriels classiques que l'on rencontre dans les bâtiments techniques

Les zones souterraines sans verrouillage des faisceaux du LHC

Ce sont des zones souterraines accessibles pendant le fonctionnement de la machine pour les personnes porteuses d'un film-badge. Il s'agit de:

- certains puits d'accès (PX24, PZ85) ;
- certaines cavernes de service des expériences (USA15, USC55) ;
- une partie du hall d'expérience UX85.

Dans ces zones, se trouvent les équipements de service et les salles de comptage des expériences.

Les zones souterraines avec verrouillage des faisceaux du LHC

Il s'agit des zones non accessibles pendant le fonctionnement de la machine, mais sans risque de radioactivité induite :

- les puits d'accès (PM, PX, PZ);
- les galeries klystrons (UA);
- les zones de service techniques (US, UW, UL);
- des portions de tunnels (UJ).

Tous les éléments importants de sûreté de l'accès - EIS-accès (points d'accès, portes, grilles de secteur etc.) localisés dans ces zones font partie du système d'interverrouillage de la machine. Lorsque les conditions d'accès à ces zones sont satisfaites, les personnes porteuses d'un film-badge peuvent demander l'accès. La salle de contrôle, chargée de la supervision, délivre les commandes ainsi qu'un équipement de verrouillage personnel permettant de franchir les portes de contrôle de la zone. La détention de cet équipement de verrouillage personnel assure le verrouillage des faisceaux en positions sûres.

Les tunnels et cavernes expérimentales du LHC

Il s'agit des zones dans lesquelles circulent les faisceaux et, de ce fait, constituent des zones dont l'accès est interdit pendant le fonctionnement de la machine, à savoir :

- le tunnel principal;
- les halls d'expérience (UX);
- les tunnels d'injection (TI2, TI8);
- les tunnels d'éjection (TD62, TD 68) et les chambres d'absorbeurs de faisceau (UD 62 et UD 68).

Tous les EIS-accès localisés dans ces zones font partie du système d'interverrouillage de la machine. Lorsque la machine est arrêtée et que l'accès à ces zones est autorisé, les personnes porteuses d'un film-badge et, le cas échéant, d'un dosimètre opérationnel, peuvent franchir les EIS-accès au moyen d'un équipement de verrouillage personnel spécifique.

Concept, définitions

Les zones décrites ci-dessous s'inscrivent dans le concept avec chaque zone associée à un système de contrôle d'accès adapté et spécifié comme suit (figure III.50):

Systemes d'accès contrôlé de type 0 - AC0

Ces systèmes sont chargés de vérifier la validité d'autorisation d'accès au moyen de la lecture du numéro d'identification (ID) inscrit sur la carte d'accès CERN. A l'entrée des sites LHC, cette vérification permet d'activer des portails et des barrières de trafic. A l'entrée des bâtiments SD, SX, et SZ, elle déclenche les dispositifs d'ouverture des portes contrôlées.

Systemes d'accès contrôlé de type 1 - AC1

Ils sont chargés de vérifier la validité d'autorisation ID+FB (film-badge personnel) détenus par les utilisateurs accédant aux zones souterraines sans verrouillage des faisceaux du LHC. Ces contrôles automatiques (à titre d'exemple, au moyen de tourniquets horizontaux), permettent de franchir et d'enregistrer le passage.

Systemes d'accès contrôlé de type 2/type3 - AC2/AC3

En mode «accès», ces systèmes permettent d'accéder aux zones souterraines avec verrouillage des faisceaux du LHC. La validité d'autorisation ID+FB permet à l'opérateur de la salle de contrôle de délivrer individuellement un élément physique appelé «verrouillage personnel de type 2 - VP2». Celui-ci permet de franchir les EIS-accès localisés dans la zone et interdit la mise en route des EIS-machine. A ce niveau, il sera également possible d'obtenir directement un «verrouillage personnel de type 3 - VP3», permettant d'accéder aux tunnels et expériences du LHC, via les zones souterraines avec verrouillage des faisceaux du LHC, à condition que la détention d'un dosimètre opérationnel soit contrôlée. Tous les EIS-accès des zones souterraines avec verrouillage des faisceaux sont munis d'un dispositif de passage d'urgence.

Systemes d'accès contrôlé de type 3 - AC3

Deux catégories de systèmes sont prévues:

- systèmes d'accès contrôlé de type 3 - principaux - AC3p,
- systèmes d'accès contrôlé de type 3 - secondaires - AC3s.

Les systèmes AC3p permettent aux utilisateurs d'accéder aux tunnels et expériences du LHC depuis les zones souterraines sans verrouillage des faisceaux. La validité d'autorisation ID+FB (film-badge personnel) autorise l'opérateur à libérer un «verrouillage personnel de type 3 - VP3» permettant de franchir les EIS-accès localisés à la périphérie et à l'intérieur des tunnels et des expériences. Les systèmes AC3s sont des EIS-accès (typiquement les grilles de secteur), dont le déverrouillage nécessite l'utilisation d'un VP3.

Systemes d'accès contrôlé de type 4 - AC4

Ce sont tous les EIS-accès faisant partie du système d'interverrouillage qui servent à empêcher quiconque d'emprunter les passages exclusivement réservés à la pose et à l'installation d'équipements (typiquement les passages de câbles et de canalisations). Ces EIS sont verrouillés en permanence mais disposent néanmoins d'un dispositif de passage d'urgence en cas d'évacuation. Le principe d'implantation des systèmes AC0 à AC4 définis ci-dessus est représenté à la figure III.51.

Classification

Le concept appliqué à chaque site du LHC permet d'établir une classification de l'ensemble des ouvrages. L'implantation exacte des EIS-accès découle de l'étude approfondie des critères de trafic (personnel, matériel), d'encombrement et des zones de tests à prévoir dans le tunnel principal. A titre d'exemple, pour le site 1 du LHC, la classification, ainsi que le principe d'implantation, sont illustrés dans la figure III.52.

Les risques

Hormis les risques d'irradiation pendant le fonctionnement de l'accélérateur, les équipements de la machine et des expériences présentent une grande variété d'autres risques potentiels qui sont pris en considération pour la classification des différentes zones:

- risques électriques;
- risques électromagnétiques (aimants);
- risques d'incendie (gaz inflammables);
- risques d'asphyxie (hélium);
- le bruit;
- risques d'inondation;
- risques liés au rayonnements non ionisants (laser, RF).

3.6.2 Mode d'accès à l'accélérateur

Les modes de fonctionnement du LHC sont répertoriés comme suit :

Mode «machine» (faisceaux présents/équipements machines alimentés) «Beam ON – BO»

- les faisceaux sont injectés et circulent dans les tunnels;
- l'accès est interdit et verrouillé en position sûre;
- l'activation du dispositif de passage d'urgence entraîne la disparition et le maintien à l'arrêt de tous les faisceaux injectés et circulant dans le LHC.

Mode «Accès contrôlé restreint» (faisceaux absents/équipements machines spécifiques alimentés) – «Arrêt technique» («Technical Stop – TS»)

- les faisceaux injectés et circulants sont arrêtés et maintenus à l'arrêt dans les tunnels mais des équipements spécifiques restent activés;
- l'accès à des secteurs définis est autorisé à un nombre restreint de personnes;
- le franchissement d'une porte verrouillée vers un secteur non autorisé, entraîne la mise en position sûre des équipements spécifiques et le passage de la patrouille pour rétablir les conditions de sûreté à l'accès;
- lorsque les conditions d'accès sont respectées, il n'est pas nécessaire de refaire une patrouille.

LA DUREE D'UN ARRET TECHNIQUE EST DE L'ORDRE DE 1 H PAR TRANCHE DE 24 H.

Mode «accès contrôlé» (faisceaux absents/équipements machines à l'arrêt)

- les faisceaux injectés et circulants sont arrêtés et maintenus à l'arrêt en positions sûres dans les tunnels du LHC;
- l'accès à l'ensemble de la machine est autorisé en fonction des risques intrinsèques et s'effectue soit en mode automatique, sous la supervision d'un opérateur depuis la salle de contrôle;
- à la fin de l'accès, il sera nécessaire que la patrouille rétablisse les conditions de sûreté d'accès de certains secteurs, voire de la totalité de la machine en cas de long arrêt.

LES ARRETS SONT PLANIFIES POUR UNE DUREE DE L'ORDRE D'UNE SEMAINE (ARRET COURT) A PLUSIEURS MOIS (ARRET LONG).

L'accès contrôlé sera maintenu en permanence dans le LHC, même pendant les périodes d'arrêt.

3.6.3 Les systèmes de sécurité et les éléments importants de la sûreté

Le concept de sûreté de l'accélérateur est basé sur l'application des règles de sécurité fondamentales suivantes:

- les tunnels de l'accélérateur LHC doivent être vides de toute personne lorsque les faisceaux circulent;
- l'injection des faisceaux ou les faisceaux circulants doivent être arrêtés et maintenus à l'arrêt. Les niveaux de radiation résiduelle et ceux d'autres risques doivent être acceptables. A ces conditions, le personnel peut accéder aux tunnels de l'accélérateur.

Ceci s'effectue de la manière suivante:

- I. Assurer, par un triple verrouillage, l'absence de faisceaux circulant dans l'anneau par:
 - extraction des faisceaux à partir du point 6 du LHC via les tunnels TD vers les blocs absorbeurs dans les halls UD confirmant la position sûre par:
 - * un signal électronique de fonctionnement des déflecteurs rapides (MKD);
 - * un signal d'un moniteur d'intensité (BCM, transformateur de courant rapide), dans chaque ligne d'éjection (TD);
 - * un signal provenant du bloc absorbeur indiquant l'arrivée des faisceaux;
 - fermeture des collimateurs dans l'axe des faisceaux aux points 3 et 7 du LHC pour obturer le passage;
 - fermeture des vannes à vide pour obturer les faisceaux dans chaque octant de la machine.
- II. Assurer, par un triple verrouillage (voir figures III.53 et III.54) sur chacune des lignes de transfert (TI2, TI8), l'impossibilité d'injecter de nouveaux faisceaux par:
 - la mise à l'arrêt et la consignation des alimentations des aimants dipolaires (BH, BV) assurant les déviations horizontale et verticale des faisceaux injectés;
 - la mise en place d'arrêts de faisceaux (TED) en amont de chaque ligne de transfert avec interdiction de les retirer;
 - la mise en place d'arrêts de faisceaux (TED) en aval de chaque ligne de transfert avec interdiction de les retirer.

La sécurité des personnes intervenant dans le LHC est garantie par les systèmes suivants:

Le système de contrôle d'accès (Access Control System - ACS)

Il caractérise le système de contrôle et de commande de l'ensemble des points d'accès, des portes, des grilles et des murs de blindage délimitant l'accès aux ouvrages souterrains de l'accélérateur et constituant la famille des éléments importants de sûreté de l'accès (EIS-access).

Le système de verrouillage de faisceaux (Machine Interlock System - MIS)

Il est construit de manière à contrôler et commander la mise à l'arrêt et l'injection des faisceaux au moyen d'équipements spécifiques (ex.: arrêts de faisceaux, collimateurs, alimentation des aimants, cavités RF ou divers autres éléments pouvant engendrer des risques). Ces équipements constituent la famille des éléments importants de sûreté de la machine (EIS-machine).

Le concept de sûreté de l'accélérateur LHC est basé sur le verrouillage mutuel des systèmes ACS et MIS. Lorsque l'accélérateur est exploité par le système de contrôle d'accès, tous les

éléments importants de sûreté de la machine (EIS-machine) doivent se trouver dans une position sûre (SAFE) avec une commande de verrouillage VETO interdisant tout changement d'état de ceux-ci garantissant ainsi l'absence des faisceaux et l'impossibilité de les injecter dans l'accélérateur (figure III.55). De même, lorsque l'accélérateur est exploité par le système de verrouillage de faisceaux, tous les éléments importants de sûreté de l'accès (EIS-accès) doivent se trouver dans une position sûre (SAFE) avec une commande de verrouillage VETO interdisant toute procédure d'accès (figure III.56).

3.6.4 Etats et acheminement des signaux de sûreté EIS

Tous les éléments constituant l'élément important pour la sûreté, sont munis de deux voies de signalisation d'état (signaux de sûreté):

⇒ La voie de position sûre «SAFE»

- exemple pour ACS: porte fermée; faisceaux possibles;
- exemple pour MIS: faisceaux arrêtés; accès possible.

⇒ La voie de position non sûre «UNSAFE»

- exemple pour ACS: porte ouverte; faisceaux impossibles;
- exemple pour MIS: faisceaux possibles; accès impossible.

Ces voies sont captées par des micro-rupteurs ou des contacts indépendants placés et activés directement par la position dans laquelle se trouve l'élément. La convention utilisée au sein du système de contrôle d'accès pour définir l'état des EIS est la suivante:

⇒ Position sûre: présence simultanée des signaux SAFE et \overline{UNSAFE} ;

⇒ Position non sûre: présence simultanée des signaux UNSAFE et \overline{SAFE} .

Une voie de commande ou d'inhibition prioritaire (VETO) agit sur les organes de contrôle/commandes de l'élément pour le forcer ou le maintenir en position sûre. Ce signal est à manque de tension, l'ouverture des contacts ou la déconnexion du câble, entraîne la mise et le maintien en position sûre de l'élément. La présence du VETO empêche le mouvement en position non sûre. Les signaux de sûreté sont raccordés par des fils directs acheminés par deux voies physiques indépendantes vers les modules d'interface avec le réseau de contrôle. Les anomalies signalées par les indications ci-dessous sont également prises en compte par le système de contrôle d'accès:

- FAULT = présence simultanée des signaux SAFE et UNSAFE. La présence simultanée des deux signaux de position sûre et position non sûre est interprétée comme une faute;
- MOVING = absence des signaux \overline{SAFE} et \overline{UNSAFE} . L'absence simultanée peut être interprétée comme le mouvement de l'élément d'une position vers l'autre ou la déconnexion du système.

Les signaux ci-dessus entraînent soit la mise en position sûre des éléments de sûreté, soit leur immobilisation. Un circuit de vérification de raccordement du câble permet de lever le doute si les signaux d'état sont absents. L'informatique du système enregistre les changements d'état du signal concernant le raccordement du câble. Lorsque celui-ci est, ou a été, déconnecté, il est signalé par la mention DISCONNECT.

3.6.5 Le système d'interverrouillage

Les résultantes des EIS-accès et des EIS-machine dans un site sont acheminées par des voies physiques indépendantes jusqu'au système d'interverrouillage centralisé dans la salle de contrôle. Ce système est chargé de constituer les chaînes de sécurité de la machine. Une chaîne de sécurité associe un ensemble d'EIS-accès (portes, grilles, murs de blindage etc.) à un ensemble d'EIS-machine (collimateurs, alimentation d'aimants, arrêts faisceaux etc.). Chaque chaîne est caractérisée par une clé de sécurité centrale et deux modules de clés (cylindres de clé), un cylindre pour le système ACS et un cylindre pour le système MIS.

Lorsque l'accélérateur est en mode «accès», la clé de sécurité centrale reste captive dans le cylindre correspondant au système ACS. Tant que les EIS-accès de la chaîne de sécurité ne se trouvent pas en position sûre et qu'une commande de libération de la clé n'est pas activée, celle-ci ne peut être libérée. La commande de VETO reste appliquée sur les EIS-machine de la chaîne correspondante. De la même manière, en mode «machine», la clé de sécurité centrale reste captive dans le cylindre de clé correspondant au système MIS. Tant que les EIS-machine de la chaîne de sécurité ne se trouvent pas en position sûre et qu'une commande de libération de la clé n'est pas activée, celle-ci ne peut être libérée. La commande de VETO reste appliquée sur les EIS-accès de la chaîne correspondante.

En mode «machine» et dans le cas d'un passage d'urgence au niveau d'un quelconque EIS-accès d'une chaîne de sécurité, la position non sûre de l'EIS-accès entraîne, au travers du système central, l'application d'un VETO sur les EIS-machine correspondants. Si la mise à l'arrêt dans la position sûre de l'EIS-machine n'est pas confirmée dans un délai fixé, le système d'interverrouillage est capable d'agir sur les chaînes de sécurité situées en amont de sorte à arrêter les faisceaux du LHC. Là encore, si la position sûre des EIS-machine n'est toujours pas confirmée dans un délai fixé, le système agit sur les chaînes de sécurité de l'accélérateur injecteur, en l'occurrence le SPS, et ainsi de suite. Cette fonction du système d'interverrouillage est appelée «effet de parapluie».

On distingue trois types de chaînes de sécurité:

Chaînes de sécurité principales

Ce sont les chaînes de verrouillage contenant les EIS-machines (voir paragraphe 3.6.3 ci-dessus), impliqués dans l'arrêt des faisceaux circulants et injectés, ainsi que l'ensemble de tous les EIS-accès du LHC (ensemble des résultantes de chaque site).

Chaînes de sécurité locales

Ce sont des chaînes de verrouillage destinées à protéger les équipements locaux de la machine. Il s'agit, après que les faisceaux injectés et/ou circulants sont arrêtés et maintenus à l'arrêt, d'activer l'ensemble des EIS-accès pour former une chaîne de verrouillage locale associée à ces secteurs. Dans ces secteurs se trouvent les portes, grilles, murs de blindage, ainsi que l'ensemble des EIS-machine, les commandes d'alimentation des aimants et des systèmes RF, etc. Tous les EIS-machine d'une chaîne de sécurité «tests» doivent être arrêtés et maintenus à l'arrêt dans le cas d'un accès contrôlé ou d'un passage d'urgence. Durant les tests, les zones adjacentes restent en mode «accès contrôlé».

Chaînes de sécurité «tests»

Le même principe est appliqué que pour les chaînes locales. Il s'agit de l'ensemble des EIS-accès délimitant plusieurs secteurs ou des portions élargies de la machine, ainsi que

l'ensemble des EIS-machine associé à ces secteurs destinés à faciliter des tests d'équipements. Il est dès lors possible d'activer les EIS-machine d'une chaîne de sécurité «tests». Tous les EIS-machine d'une chaîne de sécurité «tests» doivent être arrêtés et maintenus à l'arrêt dans le cas d'un accès contrôlé ou d'un passage d'urgence. Durant les tests, les zones adjacentes restent en mode «accès contrôlé». L'ensemble des dispositifs constituant les systèmes ACS et MIS est à sécurité positive. En particulier, la défaillance d'une alimentation équivaut à une ouverture de circuit et place le système MIS en position sûre.

3.6.6 Le système d'arrêt des faisceaux

Le but du système d'arrêt des faisceaux est d'extraire rapidement les faisceaux de l'anneau et de les absorber en toute sécurité. Cette opération d'élimination intervient normalement en fin de chaque cycle de stockage ou d'étude, mais également en cas de déclenchement des systèmes de surveillance et de sécurité ou de dysfonctionnement d'éléments vitaux de l'accélérateur comme les aimants supraconducteurs. Le système d'arrêt permet d'éliminer les faisceaux sur un seul tour quelques millièmes de seconde après le déclenchement de la commande. Cette commande est soit actionnée par un opérateur, soit provoquée automatiquement par les appareils de contrôle qui surveillent en permanence l'état des faisceaux et des divers sous-systèmes de l'accélérateur. Chaque anneau a son propre ensemble d'extraction et d'absorption. Ces deux ensembles, indépendants l'un de l'autre, sont installés symétriquement de part et d'autre du point 6. Chaque ensemble consiste en une série d'aimants de déflection qui dirigent le faisceau sur le bloc absorbeur situé à 750 m. Le trajet entre les aimants de déflection et le bloc absorbeur s'effectue à l'intérieur d'une chambre à vide (figure III.57). La fiabilité du système d'éjection et d'arrêt des faisceaux est évoquée dans la section 3 du chapitre VIII.

Aimant défecteur rapide

Les deux faisceaux doivent pouvoir être extraits correctement à tout moment pendant les phases de remplissage, d'accélération ou de collision. La fiabilité du système d'éjection et d'arrêt des faisceaux est discutée dans le chapitre VIII, section 3 de ce rapport. L'installation des aimants pulsés d'extraction composés de 14 systèmes par faisceau, doit donc être conçue avec une fiabilité extrêmement élevée. L'architecture de ces systèmes, leur contrôle et leurs circuits d'interlock, tout comme leurs composants principaux, ont été choisis de façon à répondre à ces exigences. Chaque système est composé d'un générateur d'impulsions situé dans une galerie pour l'équipement et connecté par une ligne de transmission à un aimant défecteur rapide dans le tunnel du collisionneur. L'aimant défecteur est conçu pour une déflection horizontale. Son circuit magnétique est composé de noyaux faits de fines bandes de fer-silicium laminées et bobinées.

Le générateur d'impulsions produit dans l'aimant une impulsion de courant de 20 kA avec un temps de montée de 3 μ s et un plateau d'une durée de 90 μ s. Le courant dans l'aimant doit être proportionnel à l'énergie du faisceau pour une large gamme dynamique, de l'injection à 0,45 TeV au maximum de 7 TeV. Pour cela, la tension de charge des générateurs est en permanence adaptée à la quantité de mouvement du faisceau circulant. Pendant toute la durée d'un cycle de la machine, environ 10 h, le générateur d'impulsion est donc continuellement sous tension, jusqu'à 30 kV à l'énergie maximale des faisceaux. Une attention particulière a été portée aux commutateurs de puissance pour assurer disponibilité et insensibilité aux fautes. Des commutateurs à état solide (semi-conducteurs) sont utilisés car leur taux de déclenchement spontané est intrinsèquement bas. Les générateurs d'impulsions sont démarrés par des modules de déclenchement de puissance. Un système de commande et de synchronisation du démarrage distribue les signaux aux modules de déclenchement de puissance de façon synchrone avec l'espace vide du faisceau circulant. Un

système de redéclenchement détecte tout démarrage spontané de l'un des générateurs d'impulsions et redistribue cette information avec un délai minimal à tous les autres sous forme d'une impulsion de déclenchement. Enfin, un système de surveillance a la charge d'émettre une demande d'élimination du faisceau quand une faute importante est détectée.

Aimant à septum

Les deux aimants à septum, un pour chaque faisceau, sont installés dos à dos au point d'intersection n°6 et occupent une longueur totale de 73,2 m. Ils sont composés chacun de quinze modules de trois types différents. Un champ dipolaire horizontal dans un entrefer défléchit verticalement le faisceau extrait, tandis que le faisceau circulant passe dans une ouverture cylindrique percée dans la culasse. Le champ dans l'entrefer dépend de l'épaisseur du septum qui le sépare de cette ouverture cylindrique. Suivant le type de module, cette épaisseur est de 6,13 ou 20 mm, et le champ correspondant à l'énergie maximale de 0,8, 1 ou 1,17 T respectivement. La chambre à vide du faisceau circulant est blindée par une couche de 0,5 mm de Permalloy™ contre le champ résiduel dans l'ouverture cylindrique.

Aimant dilueur

Afin d'éviter un échauffement instantané excessif et ponctuel du bloc absorbeur, l'énergie déposée par le faisceau est diluée grâce à un ensemble d'aimants orthogonaux à déflexion rapide. Le profil de dilution ressemble sommairement à une lettre « e » inscrite dans un cercle d'environ 20 cm de rayon. Les paramètres des systèmes de dilution assurent une vitesse minimale de balayage du faisceau sur la surface du bloc absorbeur de 10 mm/μs. Chaque système est composé de quatre aimants à déflexion horizontale et six à déflexion verticale. Un générateur haute tension alimente chaque aimant avec une impulsion de forme sinusoïdale de 30 kA d'amplitude et d'environ 13 kHz de fréquence de base. Le déphasage entre les courants des aimants à déflexion horizontal et vertical est de 90°. Les générateurs haute tension sont essentiellement composés d'un condensateur de décharge et d'un commutateur à semi-conducteur connectés à l'aimant par une ligne transmission à basse impédance.

Bloc absorbeur

Chaque bloc absorbeur doit être capable d'intercepter à tout moment sans dommage un faisceau dont l'intensité nominale peut atteindre $2,9 \cdot 10^{14}$ protons avec une énergie maximum de 7 TeV. C'est donc une énergie proche de 333 MJ qu'il doit pouvoir absorber en 86 μs. Les matériaux et les dimensions du bloc sont choisis de manière à contenir la chaleur et la radioactivité induite. Le noyau central en graphite, de 7 m de long et 0,7 m de côté, absorbe la plus grande partie de l'énergie du faisceau. Il est contenu dans une enveloppe en aluminium de 12 cm d'épaisseur. L'ensemble repose sur une plaque de base en aluminium refroidie à l'eau en circuit fermé, et est entouré d'un blindage en acier d'épaisseur moyenne de 1 m. Le bloc absorbeur pèse environ 14 tonnes. Le blindage est constitué d'éléments de 25 tonnes environ, dont le total représente plus de 800 tonnes. Chaque absorbeur est logé dans une caverne souterraine (UD) située au bout d'un tunnel TD et tangentielle au tunnel principal. Les deux cavernes sont équipées d'un pont roulant télécommandé de 30 tonnes. La figure III.58 montre schématiquement comment sont construits les blocs absorbeurs.

3.7 Les équipements auxiliaires

3.7.1 Les systèmes de télécommunication

Les systèmes de télécommunication du LHC comprennent des systèmes de téléphones câblés et mobiles, d'interphones et d'avertissements de mise en route de l'accélérateur et de télévisions en circuit fermé.

Téléphones câblés

En parallèle avec la distribution câblée du téléphone, un système de téléphones mobiles de type GSM assure une couverture des ouvrages en surface et dans la plupart des ouvrages souterrains du LHC.

Téléphones rouges

Pour compléter les dispositifs de sécurité en matière de télécommunication, l'ensemble des ouvrages du LHC sera équipé de téléphones rouges comme pour les autres ouvrages du CERN. Ces téléphones seront branchés sur le réseau téléphonique du CERN, mais, en plus, seront liés par un réseau indépendant au poste central des services de secours et du feu (SCR). Le fait de décrocher un combiné indiquera automatiquement au SCR la localisation de l'appel. Un appel provoquera le départ immédiat d'une équipe de secours (alarme de niveau 3)

Télévisions en circuit fermé

Un système de télévisions en circuit fermé sera mis en place pour assurer la surveillance des points d'accès aux ouvrages en surface et souterrains du LHC.

Signal d'évacuation

Par ailleurs, l'ensemble des ouvrages souterrains sera équipé d'un système sonore d'évacuation indiquant l'arrivée des faisceaux ou déclenché par des boutons sous glace à briser en cas d'urgence.

3.7.2 Le système de refroidissement par eau

A plein régime, le LHC consomme une énergie de l'ordre de 140 MW, essentiellement dissipée dans les aimants des lignes de transfert, le système accélérateur RF, les expériences, les compresseurs et échangeurs de chaleur nécessaires à la compression de l'hélium et au traitement de l'air etc. Cette chaleur est évacuée par différents circuits d'eau, primaire ou déminéralisée. Tous les équipements à refroidir installés dans le tunnel machine et les zones souterraines, tels que les convertisseurs de puissance et les câbles refroidis à l'eau, sont alimentés par un circuit d'eau déminéralisée. Pour des raisons d'exploitation et de localisation, des circuits indépendants alimentent les aires expérimentales, les équipements RF et les lignes d'injection. Les échangeurs eau déminéralisée/eau primaire sont logés dans les halls techniques UW pour limiter les pressions dans ces circuits. L'eau primaire des réfrigérants atmosphériques circule en circuit fermé, passant par les échangeurs mentionnés ci-dessus. Ces réfrigérants nécessitent une alimentation continue en eau d'appoint grâce à un circuit appelé circuit d'eau brute. Ce réseau permet également la protection contre l'incendie des locaux souterrains et ceux de surface en alimentant les RAI.

Circuits d'eau brute

Circuits de distribution d'eau brute

Pour des raisons d'économie, la consommation d'eau brute du LHC est limitée aux pertes par

évaporation et aux opérations de déconcentration des circuits primaires des tours de réfrigération. L'eau provient des réservoirs de la Berne, situés au point 1 du LHC, lesquels sont alimentés par un pompage dans le lac Léman, au Vengeron (Suisse). La distribution de l'eau brute, aller et retour (environ 50 km de conduites), se fait à partir du point 1 du LHC à travers des canalisations noyées dans le radier du tunnel de la machine (voir coupe du tunnel en figure III.59).

La topographie particulière du tunnel LHC contenu dans un plan incliné à 1,4% et celle du terrain en surface sont représentées sur la figure III.60. Il ressort clairement des cotes relatives la nécessité de placer des pompes à l'entrée des circuits d'alimentation au point 1 et des pompes de surpression en pied des autres puits, sauf au point 8. La distribution est assurée par deux demi-boucles, l'une allant du point 1 au point 4, l'autre du point 1 au point 5 (voir figure III.60). Cette distribution en tunnel passe par un point bas situé à 1180 m du point 8 en direction du point 7 et par un point haut situé à 1180 m du point 4 en direction du point 3. Des piquages sont disponibles en pied de chaque puits, dans les US, les UX, les UJ, ainsi qu'au droit des alvéoles électriques pour couvrir les besoins sanitaires et de sécurité incendie (dévidoirs).

Lorsque la pression donnée par les pompes du point 1 est insuffisante, des pompes de surpression établissent une pression minimum de 4 bar dans le réseau de surface. Au point 8, la pression minimum en surface est de 3 bar environ. Par contre, en souterrain, aux points où cette pression excède une valeur normale d'utilisation, des réducteurs de pression (60 environ) permettent de la ramener aux valeurs demandées pour l'utilisation de lances haute pression (supérieure à 10 bar) ou basse pression (inférieure à 4 bar). Les pressions statiques et dynamiques en pied de puits sont données dans le tableau III.11 ci-après. Des vannes de sectionnement télécommandées permettent d'isoler, en cas de besoin, les tronçons d'alimentation à chaque pied de puits. Les conduites placées dans les puits sont par ailleurs maintenues en eau grâce à des clapets de non retour placés à leurs bases. L'eau est remontée en surface à partir de pompes de surpression situées en pied de puits. Ces pompes (au total 18 pompes sur le circuit de distribution y compris les pompes de réserve) sont alimentées par des alimentations électriques secourues. Les besoins en eau brute du LHC sont reportés dans le tableau III.12.

Tableau III.11 - Alimentation en eau brute - pressions en pieds de puits

Points	Pressions en m CE			Points	Pression en m CE		
	Statiques	Dynamiques			Statiques	Dynamiques	
		min.	max.			min.	max.
1M	88	115	141	1B	93	122	159
2	49	75	87	8	115	143	157
32	18	38	50	7	109	135	143
33	14	32	46	6	71	79	104
4	6	16	38	5	26	28	59

Tableau III.12 - Besoins en eau brute

Points	Fonctions	Alimentation (m ³ /h)				Rejet	
		Réfrigération		Incendie ¹⁾		Boucle 1-4	Boucle 1-5
		Boucle 1-4	Boucle 1-5	Boucle 1-4	Boucle 1-5		
1	Réfrigérants atmosphériques	66			120	22	
2	Réfrigérants atmosphériques	66		120		22	
32	Services			60			
33	Services			0			
4	Réfrigérants atmosphériques	44		120		15	
5	Réfrigérants atmosphériques		44		120		15
6	Réfrigérants atmosphériques		44		120		15
7	Services				60		
8	Réfrigérants atmosphériques		66		120		22
Alvéoles électriques	Boucle 1-4 Boucle 1-5						
	Total boucle 1-4	176				59	
	Total boucle 1-5	154				52	
	Total	330				111	

¹⁾Prioritaire non cumulable

Le volume stocké dans la demi-boucle d'alimentation 1-4 est de 670 m³ et dans la demi-boucle 1-5 de 860 m³.

La partie du débit aller qui ne se retrouve pas dans le circuit de retour est due à l'eau évaporée par les réfrigérants atmosphériques, évaluée à 219 m³/h. Le débit de l'eau incendie qui est de 120 m³/h aux points 1, 2, 4, 5, 6 et 8 et de 60 m³/h aux points 3 et 7 n'est pas comptabilisé pour le rejet total. Le débit de l'eau incendie est prioritaire et non cumulatif avec le débit d'eau brute grâce à un système de régulation automatique de débit. Cette eau, qu'elle soit utilisée en sous-sol puis ramenée en surface ou directement utilisée en surface, est recueillie par le drainage gravitaire du site conduisant aux cours d'eau environnants.

Circuits de rejet d'eau brute

Les débits de rejet figurent dans le tableau III.10. Suivant le même tracé que celui de la distribution, le circuit de rejet passe par le tunnel et se trouve lui aussi partagé en deux demi-boucles, de 1 à 4 et de 1 à 5 (voir figure III.61). Collectant les eaux de retour en neuf points du LHC, le circuit les conduit jusqu'au point 1 où ces eaux sont rejetées, après analyse, dans les circuits d'eaux usées ou d'eaux claires (Nant d'Avril).

Le circuit de rejet, en charge à des pressions variables suivant les conditions de fonctionnement, comporte 12 pompes de refoulement assurant une évacuation en fonction des niveaux mesurés sur les bassins de récupération des réfrigérants atmosphériques (contenance des bassins de 10 à 40 m³ selon les points). La régulation du système est faite au niveau de chaque point par des pompes à vitesse variable ou des vannes de régulation de débit placées en pied de puits et

maintenant le réseau en permanence en charge. Des vannes de sécurité placées au point 1 se ferment si le niveau bas est franchi en un quelconque point des bassins des réfrigérants atmosphériques, la pompe correspondante étant arrêtée. Le volume stocké dans la demi-boucle 1-4 est de 350 m³; celui de la demi-boucle 1-5 est de 640 m³. En cas de nécessité, le réseau peut être sectionné. Les pressions statiques et dynamiques en pied de puits sont données dans le tableau III.13 ci-après.

Tableau III.13 - Rejets - Pressions en pieds du puits

Points	Pressions en m CE		Points	Pressions en m CE	
	Statiques ¹⁾	Dynamiques max.		Statiques ¹⁾	Dynamiques max.
1M	88	112	1B	89	99
2	49	132	8	111	132
32	18	192	7	105	141
33	14	195	6	67	129
4	6	216	5	22	103

1) Vannes en pied de puits fermées

Dans la demi-boucle 1-4, le pied du PM 15, constitue le point bas du réseau. Selon toutes les hypothèses de marche, la pression dynamique en ce point varie entre un minimum de 123 mCE et un maximum de 153 mCE. Sur l'autre demi-boucle 1-5, la pression dynamique maximum s'exerce au bas du PM 15 et varie entre 117 mCE et 160 mCE. Il convient de noter la singularité du point 4 où les réfrigérants atmosphériques ont été placés, pour sauvegarder l'environnement, à une distance d'environ 500 m du site et à 35 m en contrebas. Un circuit intermédiaire séparant le circuit d'eau primaire du circuit d'eau des tours a été spécialement conçu dans ce cas particulier.

Circuits d'eau déminéralisée

Circuits existants

L'ensemble des pompes et des déioniseurs (cartouches de résine, échangeurs d'ions) des circuits d'eau déminéralisée se trouvent dans les halls UW en souterrain, y compris les échangeurs eau primaire/eau déminéralisée, ceci pour limiter la pression sur les équipements à refroidir. La production des 2500 m³ d'eau déminéralisée nécessaires pour remplir la totalité des circuits est assurée par une installation existant sur le site de Meyrin. L'acheminement se fait par le puits PM 15 et de là par l'intermédiaire de deux conduites de 1 à 4 et de 1 à 6 alimentant les circuits en chaque point pair.

Ces circuits d'eau déminéralisée se divisent en:

- circuits de la machine, c'est-à-dire convertisseurs de puissance, câbles refroidis, services etc.;
- circuits des équipements RF d'accélération;
- circuits des aires expérimentales;
- circuits des lignes d'injection.

Circuit de la machine

Tous les équipements sont connectés en parallèle entre un collecteur d'aller et celui de retour (voir figure III.61). A chaque point pair, on trouve dans le hall UW les pompes de circulation, les échangeurs etc. alimentant les deux octants adjacents. Le volume d'eau déminéralisée stocké dans un octant est de l'ordre de 280 m³. La pression maximum est de 16 bar.

Arrêt de faisceau

Au point 6 du LHC, deux circuits auxiliaires permettent le refroidissement autonome des équipements de l'arrêt des faisceaux. Ces circuits comprennent un échangeur, des pompes et leurs accessoires. L'échange thermique s'effectue entre le circuit secondaire et le circuit d'eau déminéralisée machine. Le volume interne du circuit secondaire est de 10 m^3 et la pression de service de 10 bar.

Alvéoles électriques (RE)

Le traitement d'air des alvéoles électriques nécessite une alimentation en eau de refroidissement. Le circuit de chaque alvéole est connecté au circuit d'eau déminéralisée machine selon le même concept que ceux des arrêts de faisceau. Le volume interne est de 4 m^3 et la pression de service de 8 bar.

Services points 3 et 7

Les condenseurs des groupes frigorifiques aux points 3 et 7 seront refroidis également à partir du circuit d'eau déminéralisée machine. Les échangeurs et les pompes de circulation sont situés dans les locaux souterrains UJ. Le volume interne de chaque circuit est de 20 m^3 avec une pression de service de 16 bar.

Circuit RF

Le refroidissement des équipements RF (klystrons, des guides d'ondes etc.) forme un circuit séparé. Le volume d'eau déminéralisée est d'environ 120 m^3 . La pression maximum est de 10 bar. Tous les équipements tels que les pompes, échangeurs etc. sont installés dans le local UW 45.

Circuits d'aire expérimentale au point 2

Ces circuits refroidissent les bobines en aluminium de l'expérience ALICE; ils sont indépendants les uns des autres du fait de leurs caractéristiques particulières: les pressions maximum sont de 25 bar pour la bobine 1 et 16 bar à l'intérieur de la bobine 2. Le volume stocké est de 25 m^3 pour chacune des bobines.

Circuits des lignes d'injection

Les aimants des lignes d'injection des tunnels TI2 et TI8 sont refroidis à partir de circuits d'eau déminéralisée séparés. Les équipements, pompes et échangeurs, sont installés dans les locaux UW 25 au point 2 et UW 85 au point 8. Le volume stocké est respectivement de 64 m^3 au point 2 et de 138 m^3 au point 8 avec des pressions maximum de 25 bar.

Circuits pour les aires d'expérience aux points 1 et 5

Le principe de distribution des fluides (figure III.62) pour les expériences ATLAS et CMS est identique à ceux des points pairs, décrits au paragraphe ci dessus. De façon similaire aux UW des points pairs, les cavernes techniques USA 15 et USC 55 reçoivent les équipements secondaires tels que les échangeurs thermiques les pompes de distribution et les déioniseurs des circuits d'eau déminéralisée. L'eau primaire est refroidie en surface par des tours de réfrigération (bâtiments SF). L'eau glacée est également produite par des groupes frigorifiques situés en surface (bâtiments SUX).

Les circuits secondaires permettent le refroidissement des racks d'électronique et climatiseurs installés en souterrain, des convertisseurs de puissance et des différents éléments des détecteurs. Ces circuits sont découplés et ont des volumes compris entre 5 et 20 m^3 avec des pressions maximum de 10 bar.

3.7.3 L'alimentation et la distribution électrique

Introduction

Le site de Prévessin du CERN est alimenté par une courte ligne 400 kV venant de la sous-station EDF de Bois-Tollet. Cette sous-station est interconnectée avec celle de Génissiat en France et celle de Chamoson en Suisse, donnant une fiabilité d'alimentation très élevée. La capacité de ces lignes 400 kV, de l'ordre de 1000 MVA, est très largement suffisante pour transporter la puissance du SPS et du LHC fonctionnant à la plus haute énergie concevable (de l'ordre de 250 MW).

Poste d'arrivée 400 kV

Le poste d'arrivée actuel comporte trois travées de transformation 400/18 kV de 90 MVA chacune (EHT1, EHT2 et EHT3 dans la figure III.63) et deux travées de transformation 400/66 kV de 110 MVA chacune (EHT4 et EHT5 dans la figure III.63). Les trois travées T1, T2 et T3 sont utilisées pour l'alimentation des charges pulsées du SPS; elles ne peuvent être utilisées pour le LHC par suite de distorsions cycliques de la tension 18 kV (amplitude: 0,5%, rotation de phase: 15 deg., gradient: 2 deg. par 20 ms en phase) qui pourraient perturber la stabilité des faisceaux du LHC. Les travées T4 et T5, alimentant un poste extérieur 66 kV jointif au poste 400 kV, ne sont prévues que pour des charges relativement stables et leur capacité permet aisément d'alimenter les réseaux services généraux et machine du LHC.

Réseau de transmission 66 kV

L'alimentation directe de certains points dotés de charges importantes est assurée par des câbles 66 kV provenant d'une sous-station adjacente à celle de 400 kV. Ces câbles sont enterrés le long des routes et dans des terrains privés. Six liaisons 66 kV existent pour alimenter les sous-stations électriques BE9, SE1, SE2, SE4, SE6 et SE8. Le BE9 et SE1 alimenteront des services généraux ; par contre, les liaisons vers SE2, SE4, SE6 et SE8 font partie du réseau machine.

La boucle 18 kV des services généraux

On entend par «services généraux» l'ensemble des équipements nécessaires au maintien des activités et de la sécurité lorsque la machine est à l'arrêt. L'alimentation des services généraux du LHC est assurée par une boucle câblée 18 kV posée dans le tunnel. Le point 1 a été choisi comme départ de cette boucle pour des raisons techniques et économiques. La boucle sera alimentée par le transformateur EHT7 du BE9 via la liaison MP7. Ce transformateur assure aussi l'alimentation des services généraux du SPS et pour cela n'est jamais coupé pendant les arrêts «machine», sauf entretien exceptionnel. Dans ce cas, ou à la suite d'une panne, il est secouru par le transformateur EHT1, ou par la sous-station Jura de site Suisse de CERN. La boucle 18 kV sera utilisée pour alimenter les équipements du tunnel à partir des sous-stations installées dans les alvéoles électriques (RE). Il y a deux alvéoles par octant, desservant chacune un tiers d'octant. Trois sous-stations supplémentaires équiperont les points d'intersection impairs et sont installés dans les ouvrages UJ33, UJ56 et UJ76. La boucle remonte en surface à chaque zone pour desservir les services généraux des sous-station SE. Elle alimentera au passage les équipements machine de chaque sous-station SE, via des disjoncteurs de couplage permettant la séparation automatique des réseaux machine et services généraux lors des délestages.

Les sous-stations 18 kV

Les sous-stations principales 18 kV sont installées dans des bâtiments indépendants dans chacune des huit zones du LHC. De plus, des sous-stations compactes sont installées en souterrain dans les 16 alvéoles (RE), réparties le long des huit octants et dans les huit zones de service en pied de puits.

Les sous-stations principales de surface des zones paires SE2-8 sont réalisées sur le même modèle (voir figure III.64). La liaison 66 kV alimente le tableau primaire 18 kV machine via un transformateur de 38 MVA; le compensateur et le filtre de 24 Mvar sont connectés sur ce tableau. D'autre part, la boucle 18 kV alimente le tableau primaire «services généraux». Des tableaux de répartition secondaires 18 kV sont desservis par cet ensemble. La sous-station SE2 est équipée d'un deuxième transformateur 38 MVA et d'un compensateur/filtre renforcé à 50 Mvar. Les sous-stations des points impairs sont plus simples : un seul tableau 18 kV alimenté par la boucle. Les sous-stations principales de surface (voir figure III.64 pour SE2) sont systématiquement divisées en deux locaux: un local moyenne tension (SEM) abritant les cellules 18 kV du type blindé débrouvable; un local de sécurité (SES) abritant les auxiliaires et organes de sécurité (chargeur et batteries 48 V, protection des cellules MT, distribution BT de sécurité alimentée par le groupe électrogène de la sous-station, onduleurs pour l'éclairage antipanique, centrale informatisée de contrôle).

Les sous-stations souterraines des 16 alvéoles (RE) (voir figure III.65) et des zones de service des puits impairs sont constituées par des postes «bloc» 18 kV en coupure d'artère immergés dans une enceinte remplie de SF₆, par un transformateur difficilement inflammable (1250 ou 630 kVA) moulé dans de la résine, et par des tableaux de distribution BT standard. Un local de sécurité est associé à chaque sous-station et abrite le même matériel que celui des locaux de sécurité des sous-stations principales. La partie de l'alvéole abritant l'électronique est considérée comme local de sécurité.

Les sous-stations des cavernes de service au fond des puits pairs abritent un plus grand nombre de transformateurs et tableaux des types précédents. Les transformateurs sont alimentés directement par les sous-stations de surface. On y retrouve un local de sécurité comme dans les autres sous-stations souterraines.

Les réseaux de distribution 3.3 kV et BT

Un réseau 3,3 kV est installé dans les bâtiments SU, SUH, SH et SHM des zones paires pour alimenter les moteurs des compresseurs pour la production d'eau glacée et des compresseurs pour la cryogénie. Les réseaux basse tension 400 V sont classés en plusieurs catégories pour permettre l'établissement des plans de délestage et d'arrêt d'urgence gradués. Ils sont cités ci-dessous dans l'ordre du moins sûr au plus sûr - en ce qui concerne la permanence de leur alimentation:

- Réseaux pour des composants bien déterminés de la machine, alimentés par leurs propres transformateurs:
 - * Réseau pour redresseurs dans les SR - repère ER
 - * Réseau pour stations de refroidissement - repère EF
 - * Réseau pour les auxiliaires RF - repère EZ
 - * Réseau pour l'électronique des expériences - repère EX.
- Réseau BT des services généraux (repère EB) : totalisant de l'ordre de 10-15 MVA.
- Réseau assuré (repère EA) : partie du réseau sécurité ci-dessous, mais coupée par les arrêts d'urgence.

- Réseau sécurité (repère ES) : partie du réseau des services généraux réalimentée automatiquement par le groupe électrogène de la zone concernée du LHC en cas d'îlotage de la zone. Ce réseau n'est pas coupé par les arrêts d'urgence. Il suit en conséquence des cheminements indépendants de ceux des services généraux. Ses composants sont repérés par leur couleur orange fluorescente.

L'éclairage des ouvrages souterrains

L'éclairage des ouvrages souterrains est assuré par trois réseaux :

- un éclairage combiné normal-assuré connecté sur le réseau BT assuré, alimenté par les groupes électrogènes en cas de manque de tension générale;
- un éclairage de sécurité d'ambiance dans les zones expérimentales à forte densité de population, alimenté par le réseau sécurité ES (donc non coupé par les arrêts d'urgence) via des transformateurs d'isolement. Son câblage est réalisé en câbles résistant au feu 2 h. Il y a deux circuits indépendants par ouvrage concerné;
- un éclairage antipanique de balisage (une lampe aux points clefs et tous les 40 m dans les arcs du tunnel). Cet éclairage est alimenté par des onduleurs 48 V/220 V connectés sur les batteries 48 V des locaux de sécurité. Il est réalisé en câbles résistant au feu 2 h. Il y a deux lignes alimentées par deux onduleurs indépendants par ouvrage.

Le contrôle du réseau électrique

Le système de contrôle repose sur une centaine de mini-centrales de contrôle construites autour d'un microprocesseur. Ces mini-centrales nommées MICENE assurent les mesures, la signalisation, la commande, les asservissements d'un secteur de la distribution électrique aussi bien HT que BT. Les fonctions logiques, conventionnellement câblées dans les équipements antérieurs (telles que chaînes d'asservissement, écrans d'alarmes, instruments de mesure) sont remplacées par des traitements logiques dans MICENE et affichées sur un écran vidéo. Cette généralisation du traitement informatique en remplacement du traitement analogique a rendu nécessaire l'installation de nombreuses unités MICENE dans tous les centres de distribution. MICENE consiste en un rack comprenant le microprocesseur et ses interfaces, un écran vidéo, un panneau de contrôle à touches banalisées, un répartiteur pour câbles. MICENE est l'élément principal d'un système de contrôle à trois niveaux, dont une représentation est donnée sur la figure III.66.

- Niveau local: MICENE y assure de façon autonome les tâches de contrôle, mesure, asservissement, sur les équipements qui lui sont connectés par voie filaire. MICENE sert d'interface informatique avec le réseau de contrôle (2e niveau).
- Niveau dit régional: Un ordinateur régional (SPCA) installé dans la sous-station SE de chaque zone du LHC assure de façon autonome la gestion des MICENE de sa zone. L'accès à ces MICENE est assuré via un terminal et un écran couleur. Ce SPCA assure la liaison avec la salle de contrôle centrale et avec les SPCA des autres zones pour autant que le système de transmission de données soit opérationnel. Le SPCA, par un échange continu de messages, s'assure du bon état des MICENE.
- Niveau central: Une salle de contrôle de l'ensemble des services est associée à la salle de contrôle de la machine. Elle assure les rôles de bibliothèque, d'unité centrale de commande et d'affichage centralisé des alarmes. Dès que la totalité du système sera opérationnelle, on peut contrôler n'importe quel élément connecté sur MICENE et assurer les asservissements entre ces éléments de n'importe quelle position de contrôle (contrôle central des services, poste d'arrivée EDF, l'un des huit centres régionaux de contrôle).

Les alimentations de secours

La distribution électrique d'une zone est secourue par de multiples sources en cas de panne du réseau d'alimentation et de défaillances techniques du réseau de distribution. Les différentes possibilités de secours sont reprises ci-dessous, du plus général vers le particulier :

- En cas d'absence du réseau 400 kV d'EDF, la boucle 18 kV du réseau des services généraux est réalimentée après 8 s par le réseau 18 kV de la partie suisse du CERN provenant du réseau 130 kV d'électricité Ouest Suisse (EOS). Point de commutation en SEM12.
- En cas d'ouverture de la boucle 18 kV des services généraux par défaillance technique, celle-ci pourra être réalimentée en SE2, 4, 6 et 8 par le réseau machine provenant du 66 kV.
- En cas d'absence de tension de plus de 10 s sur la sous-station 18 kV services généraux alimentant une zone du LHC, et plus spécifiquement sur le tableau primaire du réseau BT sécurité, le groupe électrogène de la zone sera mis en route automatiquement pour alimenter les réseaux BT sécurité et assurés. Les autres réseaux seront délestés. Si l'absence de tension est due à un arrêt d'urgence, le réseau assuré est aussi délesté. La puissance des groupes électrogènes est de 600 kW aux points pairs et de 220 kW aux points impairs. Les hypothèses les plus défavorables pour lesquelles la puissance du groupe a été choisie sont:
 - * Dans les zones paires, un incendie dans les cavernes expérimentales UX, ayant entraîné un arrêt d'urgence au niveau de la desserte 18 kV de la sous-station principale ;
 - * Dans les zones impaires, un incendie des cavernes techniques US ou UJ en fond de puits, ayant entraîné un arrêt d'urgence comme ci-dessus.

Les équipements de sécurité connectés sur les groupes électrogènes sont:

- l'éclairage antipanique; l'éclairage de sécurité d'ambiance; l'éclairage assuré ;
- les auxiliaires de contrôle et protection des sous-stations; les ascenseurs desservant les puits d'accès ;
- la pressurisation de ces puits pour les maintenir hors fumée ;
- les équipements de télécommunication et de contrôle informatique des services y compris le réseau d'alarme évacuation ;
- le contrôle d'accès ;
- le contrôle de radiations ; la détection incendie ;
- la sécurité des expériences (détection incendie, détecteurs et ventilation des gaz inflammables, auxiliaires de contrôle de la cryogénie) ;
- la ventilation des ouvrages souterrains accessibles pendant la marche du LHC, éventuellement celle des octants ;
- les systèmes de désenfumage ;
- les pompes en fond de puits assurant la desserte du réseau des bornes «incendie» en surface ;
- les pompes de relevage des eaux usées et des eaux claires.

Dès que le groupe électrogène a atteint sa vitesse de régime, ces équipements sont enclenchés sur le groupe en deux temps:

- i) les équipements de sécurité autres que la ventilation;
- ii) la ventilation.

- En cas d'ilotage prolongé d'une zone du LHC, cette dernière peut être réalimentée par le réseau 20 kV local d'EDF via un poste de secours HT/BT. La puissance en BT de ce poste est de 630 kVA; elle est disponible sur le réseau sécurité. Aux points pairs et au point 5, un autotransformateur 20 kV/18 kV, 3 MVA, peut être connecté sur ce poste pour assurer un

secours du réseau 18 kV.

- En l'absence de toute tension alternative, les systèmes alimentés par les batteries 48V logées dans les sous-stations subsistent avec une autonomie de 2 h. Ces systèmes sont:
 - * les radio télécommunications;
 - * les auxiliaires de contrôle et protection du réseau électrique; les systèmes de transmission informatique de données du réseau des services;
 - * les éclairages antipanique alimentés par leurs propres batteries via des onduleurs 48 V/220 V;
 - * la détection incendie et les systèmes d'alarmes;
 - * le contrôle d'accès.

Les systèmes téléphoniques se trouvent également sur batteries d'une autonomie de 4 h. Un secours automatique entre la batterie des auxiliaires et la batterie de l'éclairage est prévu.

Les réseaux des arrêts d'urgence

Pour assurer une protection efficace et sans ambiguïté des personnes en cas d'électrocution ou d'incendie, le réseau du LHC a été conçu en secteurs couvrant en général un bâtiment ou un ouvrage souterrain dans des limites bien précises. Un réseau d'arrêts d'urgence équipe chacun de ces ouvrages. L'action sur un arrêt d'urgence permet de couper toutes les tensions supérieures à 50 V dans l'ouvrage considéré, à l'exception des réseaux de sécurité soigneusement repérés. L'action sur un arrêt d'urgence (ordre à ouverture) transite par des chaînes de boutons pour aboutir à un concentrateur, et agit sur un minimum d'appareils de coupure choisis parmi les plus fiables, via deux circuits de déclenchement indépendants. La totalité des chaînes d'action fonctionne à manque de tension. L'action des arrêts d'urgence alerte le personnel d'intervention des services de secours et du feu, en donnant la localisation de l'arrêt d'urgence actionné. Un schéma de principe de fonctionnement des arrêts d'urgence est donné sur la figure III.67.

Choix du matériel utilisé dans les ouvrages souterrains

Compte tenu, d'une part, de la longueur et de la profondeur du tunnel et d'autre part de la densité importante de matériel et de personnel, des précautions importantes ont été prises pour éviter les risques d'incendie. En ce qui concerne le matériel électrique, les équipements ont été choisis parmi ceux considérés comme les plus ininflammables, et les câbles force et contrôle ont été spécifiés avec les normes les plus sévères concernant la non propagation du feu et les effets nocifs des fumées.

Ces spécifications ont les conséquences suivantes :

- les câbles MT, BT et de contrôle sont spécifiés sans halogène et répondent aux normes les plus sévères pour la non propagation des flammes (CEI 332), la faible opacité des fumées (CEI 1034), leur non corrosivité (CEI 754-2), et leur non toxicité (ATS 1000.001 d'Airbus Industrie);
- les transformateurs sont du type moulé dans une résine synthétique ininflammable (modèle utilisé dans les immeubles, la Marine, les plates-formes de forage);
- les postes 18 kV en coupure d'artère sont du type bloc, entièrement montés dans une enceinte remplie de SF6;
- l'ensemble des matériaux isolants est sans halogène.

3.7.4 Stockage et distribution des gaz et mélanges gazeux pour les expériences

Les détecteurs de particules sont alimentés en gaz depuis la surface. Les gaz neutres et inflammables comprimés sont stockés dans des cylindres ou batteries de 12 cylindres à des

pressions allant de 60 à 200 bar, selon la nature des gaz, en surface dans des locaux spécifiques SG pour les zones expérimentales existantes (points 2 et 8) et SGX pour les nouvelles zones (points 1 et 5). Ces bâtiments sont séparés des autres bâtiments et conçus exclusivement pour cet usage (stockage à haute pression, dispositifs pour effectuer les mélanges gazeux). A titre d'exemple, les installations au bâtiment SGX1 sont représentées en figure III.68. Tous les bâtiments gaz sont aussi situés à l'écart des axes principaux de circulation.

La distribution des gaz vers les zones expérimentales se fait au moyen d'un réseau de canalisations fixes en acier inoxydable de diamètres variables (10 à 35 mm) et à basse pression (10 bar). Le cheminement des conduites de gaz du tableau de contrôle (réducteur de pression, vannes d'arrêt et soupapes de sécurité) dans les bâtiments de surface gaz jusqu'à proximité des détecteurs, empruntent les galeries techniques en surface et les puits de service PM pour les zones existantes et via les puits PX15 et PX55 pour les nouvelles zones UX15 et UX55 respectivement. Les gaz et mélanges gazeux sont acheminés à une pression inférieure ou égale à 10 bar sur un ou plusieurs tableaux de contrôle fixes à proximité des détecteurs de particules et seules les quantités strictement nécessaires sont distribuées dans les détecteurs.

De ces panneaux de contrôle fixes, les gaz et les mélanges gazeux adéquats sont régulés en pression, les débits massiques ajustés et amenés vers les détecteurs (par ex.: les MCSC «Micro-Cathode Strip Chamber», DT «Drift Tubes», RPPC «Resistive Parallel Plate Chambers», Chambres à fil, Compteurs de Cerenkov etc.). Les pressions des gaz utilisés dans les sub-détecteurs sont le plus souvent très faibles (quelques dizaines, voire quelques centaines de mbar) mais restent en général inférieures à quelques bar. Tous les systèmes de purge sont reliés à un tube d'échappement qui achemine les gaz à l'extérieur de la zone expérimentale vers la surface. Toutes les installations de gaz sont conçues et exploitées en respect de la réglementation en vigueur au CERN (Code de sécurité G «Gaz inflammables»; Code de sécurité D2 «Équipement sous pression»; Instruction de sécurité IS 38 «Utilisation de gaz inflammables lors d'expériences de physique dans les zones souterraines au CERN»). Les bâtiments et les systèmes de distribution de gaz sont identiques dans leur conception pour les quatre expériences, à l'exception des dispositifs des mélanges adaptés aux exigences de chaque expérience. Une installation fixe de gaz prévue pour l'expérience CMS est montrée en figure III.69.

Les quantités de gaz comprimés (estimées) stockées dans les bâtiments SG et SGX de surface sont données dans le tableau III.14. L'azote, l'argon et le dioxyde de carbone, gaz neutres utilisés en grande quantité dans les expériences, sont stockés sous forme de liquide cryogénique dans des dewars (pression 10-12 bar) d'un volume de l'ordre de 10-15 m³ en surface à l'air libre. La distribution des gaz N₂, Ar, CO₂ vers les zones souterraines s'effectue de manière analogue à celle décrite pour les gaz inflammables. Les quantités stockées en surface par site sont reportées dans le tableau III.15.

3.7.5 Stockage et distribution des fluides du système cryogénique

Hélium

Avant le démarrage des réfrigérateurs cryogéniques, lorsque l'accélérateur est à température ambiante, l'hélium est principalement stocké sous forme gazeuse dans des réservoirs cylindriques d'axe vertical (75 m³ géométrique à 2 MPa) ou horizontal (250 m³ géométrique à 2 MPa), installés à l'extérieur sur les plates-formes SHE. Pendant l'exploitation du LHC, ces réservoirs remplissent deux fonctions distinctes. La première est d'assurer le volume tampon (environ 250 m³ par réfrigérateur) nécessaire à l'absorption des transitoires de fonctionnement des réfrigérateurs

cryogéniques, et requiert donc l'installation – ou la réutilisation – d'un tel volume sur chacun des points 1.8, 2, 4, 6 et 8. La seconde est de permettre la récupération d'hélium gazeux libéré par une vaporisation massive du liquide contenu dans un secteur de l'accélérateur (perte de vide d'isolement ou transition résistive).

L'incident maximal pris en compte pour dimensionner le volume de stockage répondant à cette fonction est la transition résistive généralisée des aimants supraconducteurs d'un secteur de 3,3 km. Il conduit à une capacité de stockage nécessaire de 1000 m³ géométrique à chaque extrémité de secteur, soit –dans l'hypothèse que l'incident maximal pris en compte ne se produit pas simultanément dans deux secteurs adjacents– à l'installation de 1000 m³ géométrique de stockage à chacun des points 1.8, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8. Enfin, un stockage « centralisé » plus important est réalisé au point 1.8 et raccordé aux autres points par une ligne de répartition à température ambiante qui les relie à travers le tunnel de l'accélérateur. Outre cette ligne de répartition, les réservoirs de stockage d'hélium sont raccordés, sur chaque site où existe un réfrigérateur cryogénique, à la station de compression située dans les bâtiments SH/SUH, et à la ligne de décharge de l'accélérateur provenant des boîtes d'interconnexion QUI.

Le tableau III.16 montre le nombre et les caractéristiques des réservoirs de stockage installés sur les différents points du LHC. Tous les réservoirs de stockage constituent des appareils à pression réglementaires et sont protégés par des dispositifs de sécurité (soupapes), tarés au plus à leur pression de calcul, et déchargeant à l'atmosphère. Tout incident de pressurisation de ces réservoirs se traduirait ainsi, au pire, par une perte limitée d'hélium vers l'atmosphère. Les quantités d'hélium présentes dans les différents circuits et enceintes du LHC en fonctionnement normal sont résumées dans le tableau III.17. Il faut remarquer que la capacité de stockage totale installée sous forme de gaz à température ambiante et 2 MPa, ne permettra pas de contenir l'ensemble de l'inventaire hélium de l'accélérateur, lors des arrêts de longue durée. Le solde devra être reliquéfié dans des conteneurs cryogéniques standard, et remis en circulation sous cette forme.

Azote

L'azote, tant liquide que gazeux, n'est jamais utilisé comme fluide caloporteur dans le système cryogénique du LHC et est donc absent de tous les ouvrages souterrains. Seul, l'azote liquide est utilisé comme source de réfrigération pour le fonctionnement des épurateurs cryogéniques et pour le pré-refroidissement de l'accélérateur à travers des échangeurs de chaleur hélium/azote. Dans tous les cas, les enceintes et circuits contenant de l'azote n'existent qu'en surface. Deux réservoirs industriels de capacité unitaire de 50000 l sont installés sur chacun des points 1.8, 2, 4, 6 et 8 du LHC où ils jouent le rôle de stock tampon lors du dépotage des camions citernes de transport qui alimenteront le LHC. Ces réservoirs sont raccordés, par un jeu de lignes isolées sous vide, aux vaporiseurs qui équipent les épurateurs d'hélium et les boîtes froides supérieures des réfrigérateurs d'hélium, situés dans les bâtiments de surface SD. L'azote vaporisé sera évacué à l'atmosphère, au moyen de lignes d'évent débouchant en toiture des bâtiments.

3.7.6 Le système de ventilation

La conception des installations de ventilation des ouvrages souterrains est adaptée à la destination des ouvrages. Les circuits de ventilation se composent essentiellement en cinq sous-ensembles indépendants :

- la ventilation du tunnel (*accessible/non accessible*) de la machine;
- la ventilation des zones d'expériences (*accessibles/non accessibles*);
- la ventilation des zones techniques (*accessibles/non accessibles*);

- la ventilation des zones techniques accessibles en permanence;
- la pressurisation des zones de sécurité.

La ventilation du tunnel (*accessible/non accessible*) de la machine

Le tunnel de la machine est divisé en huit secteurs distincts (voir figures III.70 et III.71) d'une longueur d'environ 3300 m, auquel sont associés deux tunnels d'injection d'une longueur moyenne de 3000 m. Les installations de ventilation ont pour but d'assurer le renouvellement de l'air :

- pour le personnel qui y travaille lors des arrêts machine (*tunnel accessible*); dans ce cas, la vitesse moyenne frontale est limitée, pour des raisons de confort, à 0,4 m/s;
- pour maintenir, machine en service (*tunnel non accessible*), des conditions ambiantes (température et point de rosée) aptes à garantir un fonctionnement optimal des équipements, la vitesse moyenne de l'air étant dans ce cas de 0,6 m/s;
- pour évacuer des fumées (après vérification préalable des caractéristiques de l'air extrait); dans ce cas, la vitesse moyenne de l'air est de 1,25 m/s. A cette vitesse, il faudra environ 44 mns pour que les fumées provenant d'une extrémité d'un secteur atteignent l'extraction à l'autre extrémité.

L'air pulsé est traité (contrôle du point de rosée et de la température sèche) dans deux unités implantées en surface dans les bâtiments SU des points pairs. Cet air est acheminé par un réseau de gaines qui transite dans les puits PM et les galeries de liaison UL pour franchir le blindage des chambres de jonction souterraines UJ (voir figure III.72). Après avoir parcouru la section courante du tunnel, cet air est capté dans les chambres de jonction des points impairs par un réseau de gaines qui l'achemine dans des unités d'extraction implantées en surface dans des bâtiments SU.

Dans l'UJ 32, compte tenu de la configuration des ouvrages, des ventilateurs de relais assurent le transfert de l'air provenant des points 2 et 4 dans la longue galerie TZ 32. Des cloisons étanches assurent la séparation des secteurs au droit des points impairs et permettent le contrôle du débit dans chacun d'eux. Pour les tunnels d'injection TI 2 et TI8, la pulsion est commune aux secteurs 2-1 et 8-1 avec captation de l'air extrait par un réseau de gaines placé à l'extrémité de ces tunnels au droit de la jonction avec l'anneau SPS. Les unités d'extraction seront mises en place dans le bâtiment 296 (site de Meyrin) pour le TI2 et dans un bâtiment adossé au BHA 4, sur le site du point 4 de l'anneau SPS, pour le TI8.

Un système de régulation permet le maintien en dépression du tunnel de la machine par rapport aux zones techniques. Cette condition est obtenue en ajustant les débits des ventilateurs de pulsion et d'extraction. Après filtration par des filtres dont l'efficacité est F8 et F9, selon la norme européenne EN 779 (efficacité opacimétrique 95% pour des particules comprises entre 1-10 μm), l'air extrait d'un secteur est rejeté à l'atmosphère (voir figure III.73).

La ventilation des zones d'expériences (*accessibles/non accessibles*)

Les installations de traitement d'air de ces ouvrages ont pour but :

- d'assurer deux renouvellements horaires (tout air neuf) pour assurer l'hygiène et la sécurité du personnel (débit 45000 m^3/h);
- d'extraire les émanations d'argon et/ou mélanges gazeux, à savoir aux points:
 - * 1 (expérience ATLAS) : 21000 m^3/h ;
 - * 2 (expérience ALICE) : 6000 m^3/h ;
 - * 5 (expérience CMS) : 5000 m^3/h ;
 - * 8 (expérience LHC-B) : 5000 m^3/h ;
- en cas d'urgence (fuite de gaz ou feu/fumée), de porter le renouvellement d'air à 90000 m^3/h .

Tableau III.14 - Quantités de gaz comprimés entreposées dans les bâtiments gaz (SG, SGX) en kg

Bâtiments	Gaz inertes								Gaz inflammables						
	He	Ne	Ar	N ₂	CO ₂	SF ₆	CF ₄	C ₄ F ₁₀	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	n-C ₅ H ₁₀	C ₂ H ₆ O
SGX 1	50	20	440	300	900	400	-	-	180	-	-	-	200	60	-
SG 2	50	40	440	300	900	-	200	-	180	-	-	400	-	-	400
SGX 5	1 600*	135	280	280	720	-	-	970	-	-	-	240	-	-	810
SG 8	50	-	300	300	900	100	200	200	180	-	-	240	-	-	100

* en dehors du bâtiment SGX5

Tableau III.15 - Quantités Ar, N₂ ET CO₂ stockées sous forme liquide par site

Site	Gaz stockés sous forme liquide (en kg)			Commentaires
	LAr	LN ₂	LCO ₂	
Point 1	15000	9000	18000	Dewars (<i> futures installations </i>)
Point 2	8400	2400	-	Dewars en service (<i> LEP </i>)
Point 5	-	24000	-	Dewars (<i> futures installations </i>)
Point 8	8400	8500	-	Dewars en service (<i> LEP </i>)

Tableau III.16- Réservoirs de stockage d'hélium

Réservoirs	m ³	Nombre de réservoirs par site								Quantité d'hélium kg@15° C
		P1.8	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
Récupération hélium gaz	250	4	4	4	4	4	4	4	4	27135
Réservoirs tampon pour réfrigérateurs	250	1			2		2		2	6000
Réservoirs tampon pour réfrigérateurs	75		10		10		10		10	10175

Tableau III.17 - Quantités d'hélium liquide dans le système cryogénique

	Masse/secteur (kg)	Masse totale (kg)
Dans les collecteurs	4094	32749
Dans les masses froides	7318	58544
Dans les installations cryogéniques	600	4805
Total	12012	~96100

Tableau III.18 - Ventilation du tunnel de la machine

Modes de fonctionnement	Vitesse frontale moyenne (m/s)	Débit/secteur m ³ /h
Tunnel accessible par le personnel	0.4	14000
Tunnel inaccessible	0.6	22500
Urgence dans un secteur	1.25	45000

La géométrie des zones d'expérience des points 1, 2 et 5 est identique (parallèle à l'axe des faisceaux) et diffère de celle du point 8 (perpendiculaire à l'axe des faisceaux).

Pour les expériences des points 1 et 5, l'air traité est fourni par deux unités logées dans les bâtiments SUX et est acheminé par un réseau de gaines empruntant les puits PX jusqu'aux zones d'expériences UX où il est distribué par deux gaines longitudinales situées sous les rails du pont roulant, reliées à des gaines verticales qui alimentent des diffuseurs à déplacement d'air. L'extraction ou la reprise de l'air est assurée par une captation placée au sommet de la voûte de la caverne reliée à un réseau de gaines empruntant le puits PX pour rejoindre les unités implantées dans les bâtiments SUX (voir figures III.74 et III.75).

Pour les expériences des points 2 et 8, l'air traité est fourni par deux unités (dont une limitée à un ventilateur) logées dans les bâtiments SU (point 2) et SUX (point 8) et est acheminé par un réseau de gaines empruntant le puits PX (point 2) et le puits PZ (point 8) jusqu'aux zones d'expériences UX où il est distribué par deux gaines longitudinales situées sous les rails du pont roulant. La captation de l'air extrait est située au sommet de la voûte et est reliée à un réseau de gaines empruntant les puits PX 24 et PX 85 pour rejoindre deux unités d'extraction situées dans les bâtiments SUX 2 et SX 8.

Après filtration par des filtres dont l'efficacité est F8 et F9, selon la norme européenne EN 779 (efficacité opacimétrique 95 % pour des particules comprises entre 1-10 µm), l'air extrait des zones d'expériences est rejeté à l'atmosphère (voir figures III.76 et III.77).

La ventilation des zones techniques (accessibles/non accessibles)

Le rôle des équipements de traitement d'air pour la ventilation de ces zones est le suivant :

- assurer deux renouvellements horaires (tout air neuf) dans les locaux en pied de puits (US, UL, UJ, UA, UW);
- évacuer une quote-part des apports calorifiques dissipés dans l'air par les équipements.

Aux points pairs, la pulsion est assurée par deux unités (dont une en secours) dont le débit unitaire de 45000 m³/h se subdivise dans chaque point en deux pour assurer le traitement d'air des ouvrages situés à droite et à gauche du puits. Le hall UW est équipé d'une unité de post-traitement d'air avec deux régimes de fonctionnement (15000/30000 m³/h) avec une adjonction d'air neuf traité provenant de l'US de 2000 m³/h (voir figure III.78). La décompression de cet air s'effectue

vers le bâtiment SD en surface via le puits PM. Une extraction, en cas de feu/fumée, est prévue par l'intermédiaire de six tourelles (exécution 400°C/2 h de débit unitaire de 15000 m³/h) implantées sur la toiture des bâtiment SD 2, 4, 6 et 8.

Aux points impairs, la situation varie selon la topographie des ouvrages. Au point 1, la pulsion est assurée par deux unités (dont une en secours) dont le débit unitaire de 25000 m³/h se subdivise en deux pour assurer le traitement d'air des ouvrages situés à droite et à gauche du puits. Aux points 32, 33, 5 et 7, la pulsion est assurée par deux unités (dont une limitée à un ventilateur). Au point 32, le débit pulsé est de 8000 m³/h; au point 33, la pulsion est commune avec celle de la zone de sécurité; le débit pulsé peut varier de 6000 à 10000 m³/h pour l'ensemble UJ, TZ et PZ. Au point 7, le débit pulsé peut varier de 10000 à 14000 m³/h pour l'ensemble UJ, TZ et US. La décompression de cet air s'effectue vers le bâtiment SD en surface via le puits PM. Une extraction, en cas de feu/fumée, est prévue par l'intermédiaire de tourelles (exécution 400°C/2 h de débit unitaire de 15000 m³/h) au nombre de quatre pour le SD 1 et de 2 pour les SD 3, 5 et 7. En SZ 33, on trouve une unité d'extraction normale dont le débit extrait peut varier de 6000 à 10000 m³/h.

La forte concentration d'équipements électriques dans ces zones nécessite la présence de circuit de désenfumage. Aux points 1, 33, 4, 5, 7 et 8, deux unités d'extraction d'un débit unitaire de 10000 m³/h assurent cette fonction. Au point 2, trois unités de même débit car aux galeries situées de part et d'autre du puits, viennent s'ajouter l'accès aux salles de comptage et contrôle implantées dans le puits PX 24.

La ventilation des zones techniques accessibles en permanence (voir figure III.79)

Aux points 1, 2 et 5, des zones techniques sont accessibles en permanence (US).

Aux points 1 et 5, ces zones situées en souterrain regroupent deux entités :

- salles de comptage constituées de racks électroniques;
- caverne des services regroupant l'alimentation puissance aimant, bus bars, tableaux électriques, circuits de refroidissement.

Au point 2, les salles de comptage sont réparties sur quatre niveaux dans le puits PX 24.

La pressurisation des zones de sécurité (voir figure III.80)

Les cages d'escaliers et d'ascenseurs d'accès aux ouvrages souterrains (PM, PX et PZ) sont équipées de sas en surface et en tréfonds permettant de maintenir ces zones en surpression vis à vis des ouvrages adjacents. La caractéristique des matériaux constituant ces zones est d'assurer une tenue au feu de 2 h à 400°C. La pressurisation est assurée par des unités de ventilation situées dans les bâtiments de surface SU ou SUX suivant les points.

Tableau III.19 - Ventilation des zones d'expériences

Point	Expérience	Circuit	Fonction	Nombre d'unités	Débit unitaire m ³ /h	Débit zone accessible m ³ /h	Débit zone non accessible m ³ /h	Urgence m ³ /h
1	ATLAS	caverne	pulsion	2	45000	45000	45000	90000
			extraction	2	45000	45000	90 000	
		argon mélanges gazeux	recyclage	*			45000	
			extraction	2	21000	16000	16000	32000
			extraction	**		5000	5000	10000
2	ALICE	caverne	pulsion	2	45000	45000	45000	90000
			extraction	2	45000	45000	45000	90000
		mélanges gazeux	pulsion	1	6000	6000	6000	6000
			extraction	2	6000	6000	6000	6000
5	CMS	caverne	pulsion	2	45000	45000	45000	90000
			extraction	2	45000	45000	90000	
		mélanges gazeux	recyclage	*			45000	
			extraction	2	5000	5000	5000	5000
8	LHC-B	caverne	pulsion	2	45000	45000	45000	90000
			extraction	2	45000	45000	45000	90000
		mélanges gazeux	extraction	2	5000	5000	5000	5000

* les fonctions extraction et recyclage sont assurées par les mêmes unités.

** l'extraction argon et mélanges gazeux est assurée par les mêmes unités.

Tableau III.20 - La ventilation des zones techniques (accessibles/non accessibles)

Point	Fonction	Nombre d'unités	Débit unitaire m ³ /h	Circuit	Débit m ³ /h
1	pulsion	2	25000	US 15, UL 14, UJ 14	12500
				US 15, UL 16, UJ 16	12500
	désenfumage	2	10000	US 15, UL 14, UJ 14	10000
				US 15, UL 16, UJ 16	10000
2	pulsion	2	45000	US 25, UJ 24, UL 24, UA 23, UJ 23	22500
				US 25, UJ 26, UL 26, UA 27, UJ 27	22500
	pulsion	1	15000/30000	UW 25	15000/30000
	désenfumage	2	10000	US 25, UJ 24, UL24, UA 23, UJ 23	10000
			US 25, UJ 26, UL26, UA 27, UJ 27	10000	
			UW 25	10000	
32	pulsion	2	8000	PM 32, US 32	8000
33	pulsion	2	10000	PZ 33, US 33, TZ 33, UJ 33	10000
	désenfumage	2	10000	US 33, TZ 33, UJ 33	10000
4	pulsion	2	45000	US 45, UJ 44, UL 44, UA 43, UJ 43	22500
				US 45, UJ 46, UL 46, UA 47, UJ 47	22500
	pulsion	1	15000/30000	UW 45	15000/30000
	désenfumage	2	10000	US 45, UJ 44, UL 44, UA 43, UJ 43	10000
			US 45, UJ 46, UL 46, UA 47, UJ 47	10000	
5	pulsion	2	5000	US 56, UJ 56	5000
	désenfumage	2	10000	US 56, UJ 56	10000
6	pulsion	2	45000	US 65, UJ 64, UL 64, UA 63, UJ 63	22500
				US 65, UJ 66, UL 66, UA 67, UJ 67	22500
	pulsion	1	15000/30000	UW 65	15000/30000
	désenfumage	2	10000	US 65, UJ 64, UL 64, UA 63, UJ 63	10000
			US 65, UJ 66, UL 66, UA 67, UJ 67	10000	
7	pulsion	2	14000	US 76, TZ 76, UJ 76	14000
	désenfumage	2	10000	US 76, TZ 76, UJ 76	10000
8	pulsion	2	45000	US 85, UJ 84, UL 84, UA 83, UJ 83	22500
				US 85, UJ 86, UL 86, UA 87, UJ 87	22500
	pulsion	1	15000/30000	UW 85	15000/30000
	désenfumage	2	10000	US 85, UJ 84, UL 84, UA 83, UJ 83	10000
			US 85, UJ 86, UL 86, UA 87, UJ 87	10000	

Tableau III.21 - La ventilation des zones techniques accessibles en permanence

Point	Fonction	Nombre d'unités	Débit unitaire m ³ /h	Circuit	Débit m ³ /h
1	Pulsion	2	21000	air primaire	21000
	Pulsion	4	10000	racks électroniques	40000
	Pulsion	1	40000	caverne des services	40000
	Extraction	2	4000	mélanges gazeux	4000
	Désenfumage	2	10000	racks électroniques	10000
			caverne des services	10000	
2	Pulsion	1	15000	salles de comptage	15000
5	Pulsion	2	40000	racks électroniques	40000
	Pulsion	1	40000	caverne des services	40000
	Désenfumage	2	10000	racks électroniques	10000
			caverne des services	10000	

Tableau III.22 - La ventilation des zones de sécurité

Point	Nombre d'unités	Débit unitaire m ³ /h	Ouvrage	Débit m ³ /h
1	2	8000	PM 15	8000
	2	8000	PX 15	8000
2	4	8000	PM 25	8000
	1	8000/12000		
	1	12000	PX 24	12000
33	2	6000 à 10000	PZ 33, US 33, TZ 33	10000
4	3	8000	PM 45	8000
			PZ 45	8000
5	2	8000	PM 56	8000
	2	8000	PM 54	8000
6	3	8000	PM 65	8000
			PZ 65	8000
7	2	8000	PM 76	8000
8	2	8000	PM 85	8000
	2	8000	PZ 85	8000

La ventilation des ouvrages d'arrêts de faisceau

Les ouvrages concernés sont les deux tunnels d'éjection (TD 62 et TD 68) et les deux cavernes abritant les éléments d'arrêt de faisceau (UD 62 et UD 68). Il n'y a pas d'accès à ces ouvrages pendant le fonctionnement du LHC et l'accès pendant l'arrêt sera particulièrement supervisé par le groupe RP.

Principe

Les équipements de ventilation de ces ouvrages situés de part et d'autre du point 6 seront intégrés à la ventilation du secteur du tunnel principal :

- 6-5 pour l'ouvrage orienté en direction du point 5 ;
- 6-7 pour l'ouvrage orienté en direction du point 7

Répartition des débits

Le débit d'air pulsé pour chaque secteur sera de 22500 m³/h avec un débit dérivé, dans chaque ouvrage, dans le sens de l'écoulement de l'air de 2500 m³/h.

Dans la partie où le tunnel et chaque ouvrage seront en parallèle, le débit sera subdivisé en deux flux, l'un de 20000 m³/h pour le tunnel et l'autre de 2500 m³/h pour la caverne. Ces deux flux se combineront ensuite et seront extraits aux points 5 et 7.

Qualité de l'air extrait

Le débit d'air unitaire extrait par point sera de 22500 m³/h.

La filtration de l'air s'effectuera sur trois niveaux correspondant à la classification EN 779 :

Niveau	Type de filtre	Classe de filtration
1	fin	F 8
2	fin	F 9
3	absolu	H 11

3.7.7 Le transport et les manutentions

Pour les manutentions des grandes charges en surface, on aura essentiellement recours aux grues de différentes capacités et de grande mobilité. Un nombre important de bâtiments de surface est équipé de ponts roulants de différentes capacités pour le transport et le montage des équipements. Pour la descente du matériel lourd et encombrant par les puits PX, on dispose de plusieurs ponts capables de soulever des charges jusqu'à 80 t (280 t pour le PX 15). Le transport du personnel et du petit matériel de surface en souterrain s'effectue par des ascenseurs ou monte-charges. Un certain nombre d'ouvrages souterrains est également équipé de ponts roulants pour le transport et l'installation du matériel.

L'idée de réutiliser le monorail du LEP pour le transport du matériel dans le tunnel LHC a été abandonnée. Tout le matériel (dipôles, sections droites, tronçons de ligne cryogénique etc.) sera transporté au sol par des engins spécialement conçus pour cette activité. Il est prévu d'utiliser la gaine électrique du monorail pour l'alimentation électrique des engins de transport et le rail lui-même comme référence d'un système de guidage dans le tunnel LHC. Les caractéristiques des ponts roulants et des ascenseurs dont on dispose pour le LHC sont récapitulées dans les tableaux du chapitre V, section 4.

Il faut noter que tous les équipements de levage seront conçus, construits, installés, testés, utilisés et maintenus selon les règles définies dans le code de sécurité D1 du CERN (équipements de levage). Ce code est basé sur les directives européennes, les normes et codes de construction CEN, ISO, CEI, FEM, et NF et la réglementation spécifique du CERN (codes et instructions de sécurité). Les contrôles réglementaires de ces équipements sont effectués par un organisme agréé.

the 1990s, and the 1990s have been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.

The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.

The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.

The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.

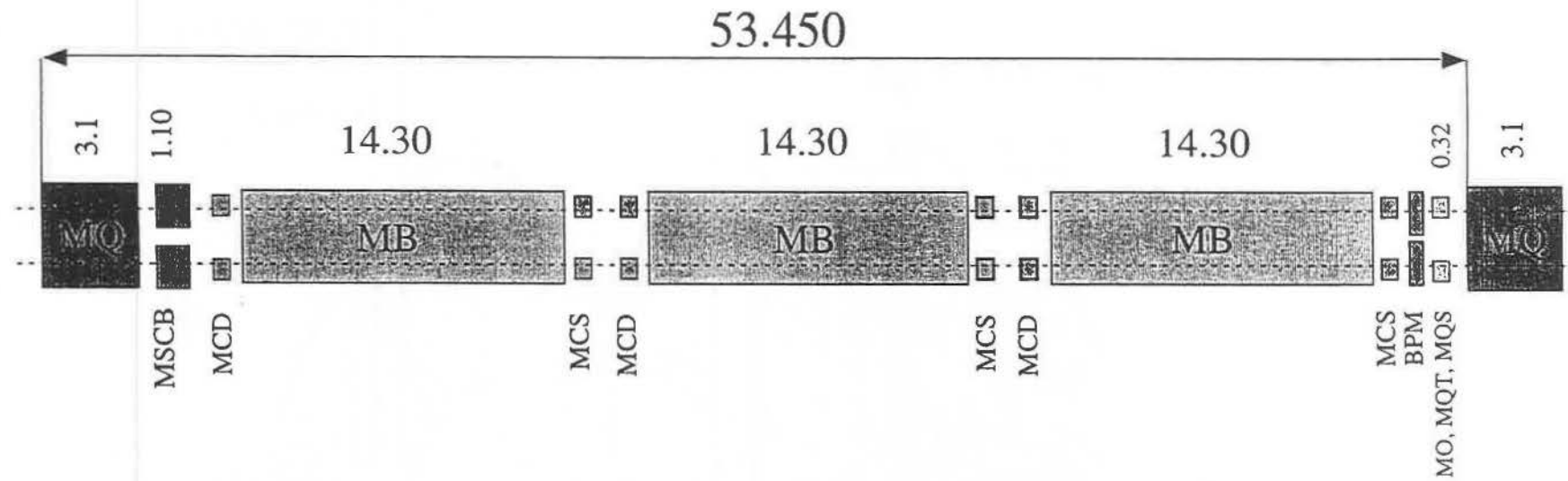
The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.

The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.

The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.

The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.

The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered. The 1990s have also been the most successful in terms of the number of new species discovered.



MQ: Quadripôle	MB: Dipôle	MO: Octupôle	MCS: Sextupôle (correcteur local)
MSCB: Sextupôle et dipôle (correcteurs combinés)		MQT: Quadripôle d'accord	MCD: Decapôle (correcteur local)
BPM: Moniteur de position de faisceau		MQS: Quadripôle tourné	

Figure III.1 - Demi-cellule de la machine LHC

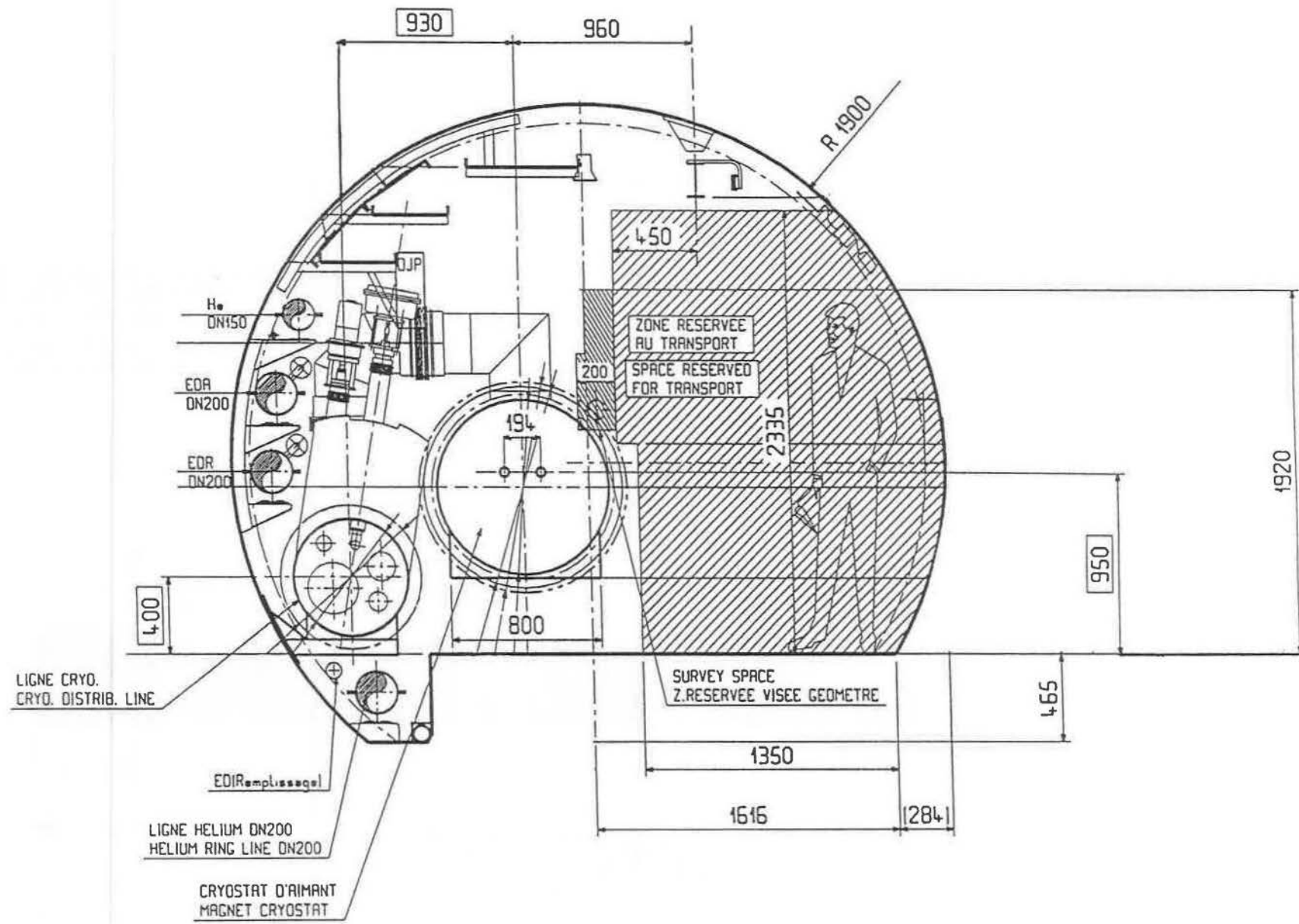


Figure III.2 - Coupe standard du schéma LHC

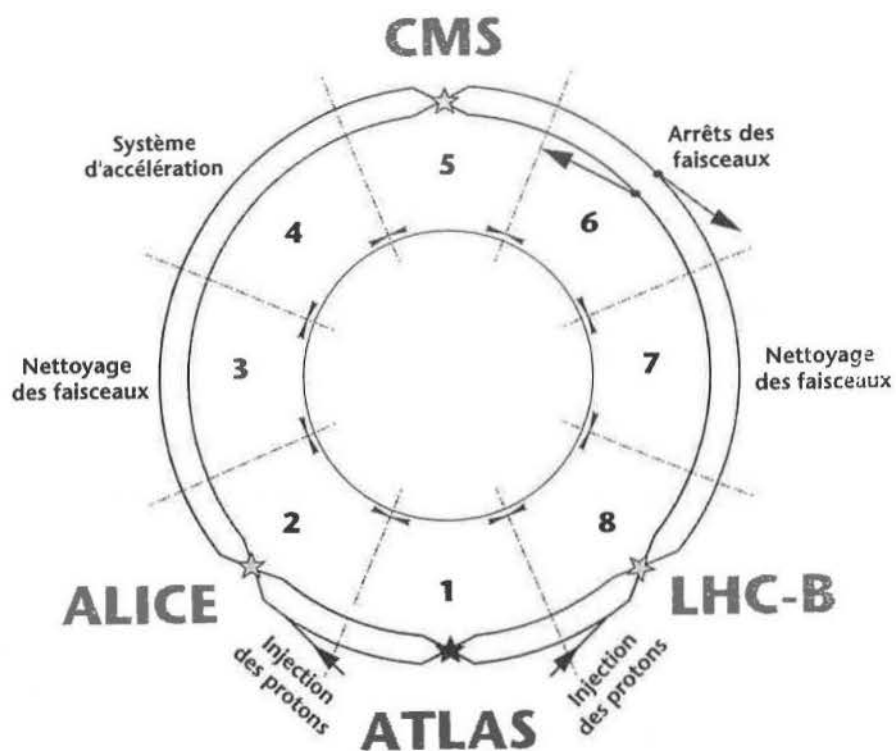


Figure III.3 - Schéma de principe du LHC

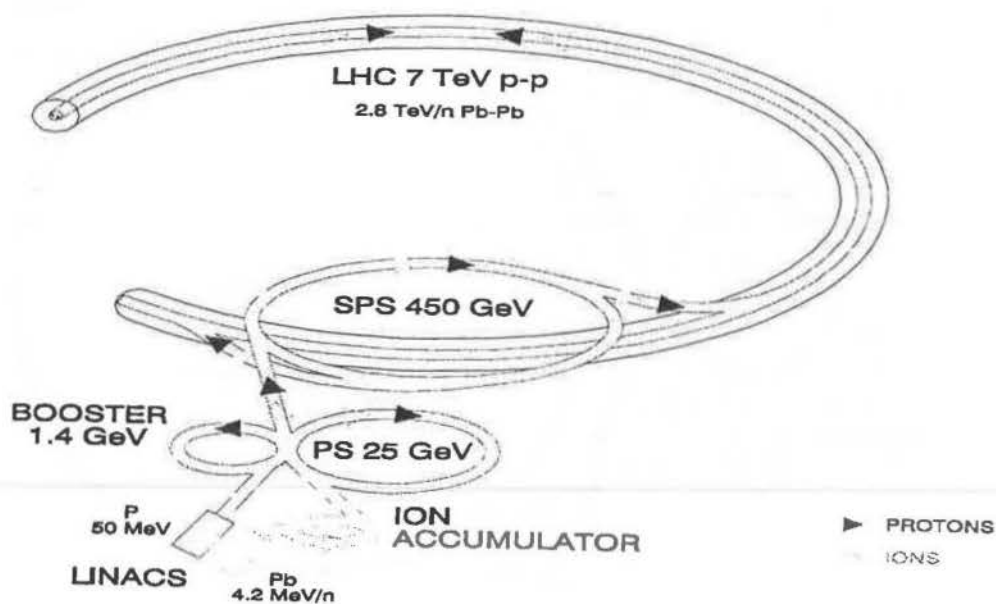


Figure III.4 - La chaîne des injecteurs du LHC

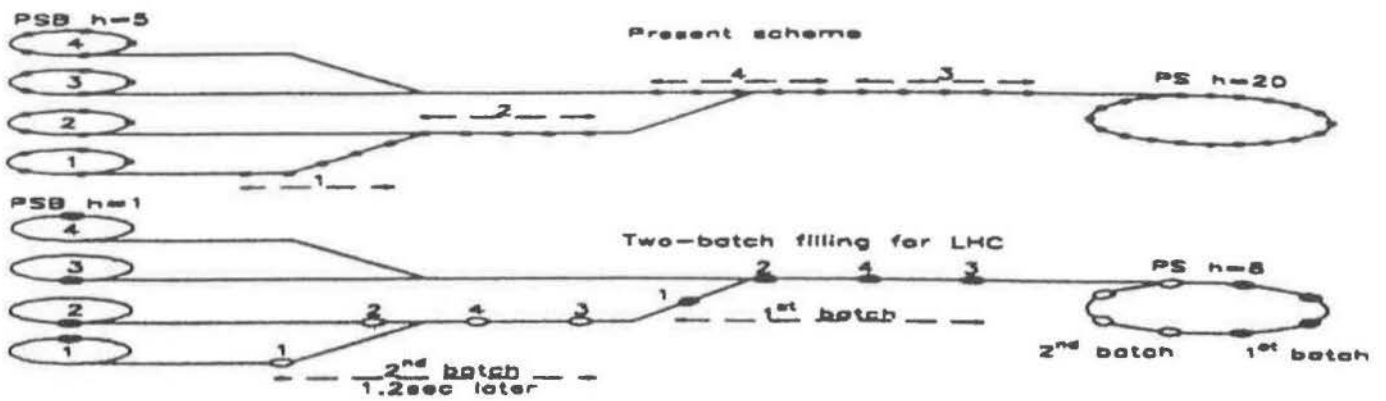


Figure III.5 - Remplissage du PS avec deux impulsions PSB

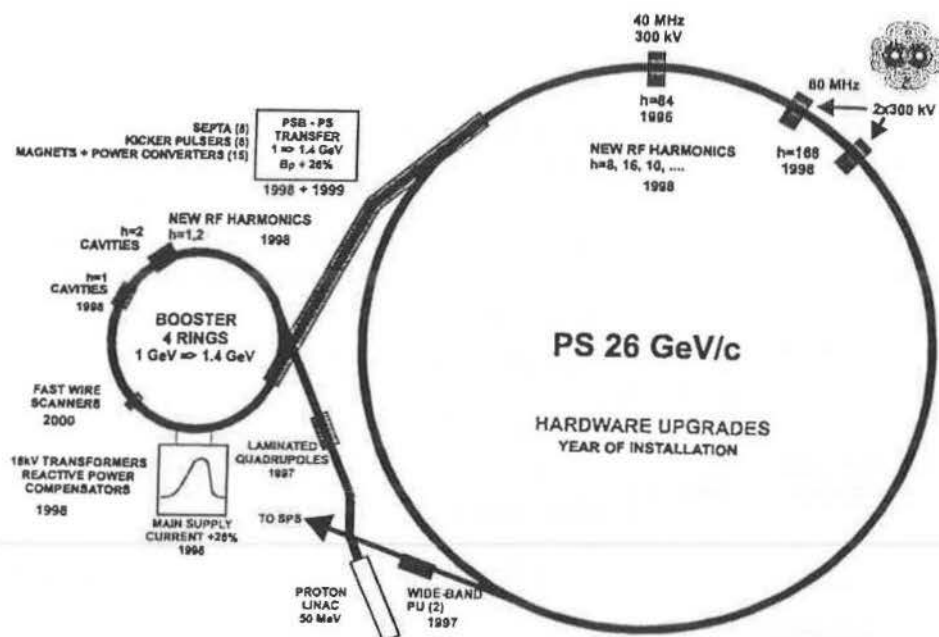


Figure III.6 - Modifications du complexe PS comme pré-injecteur du LHC (protons)

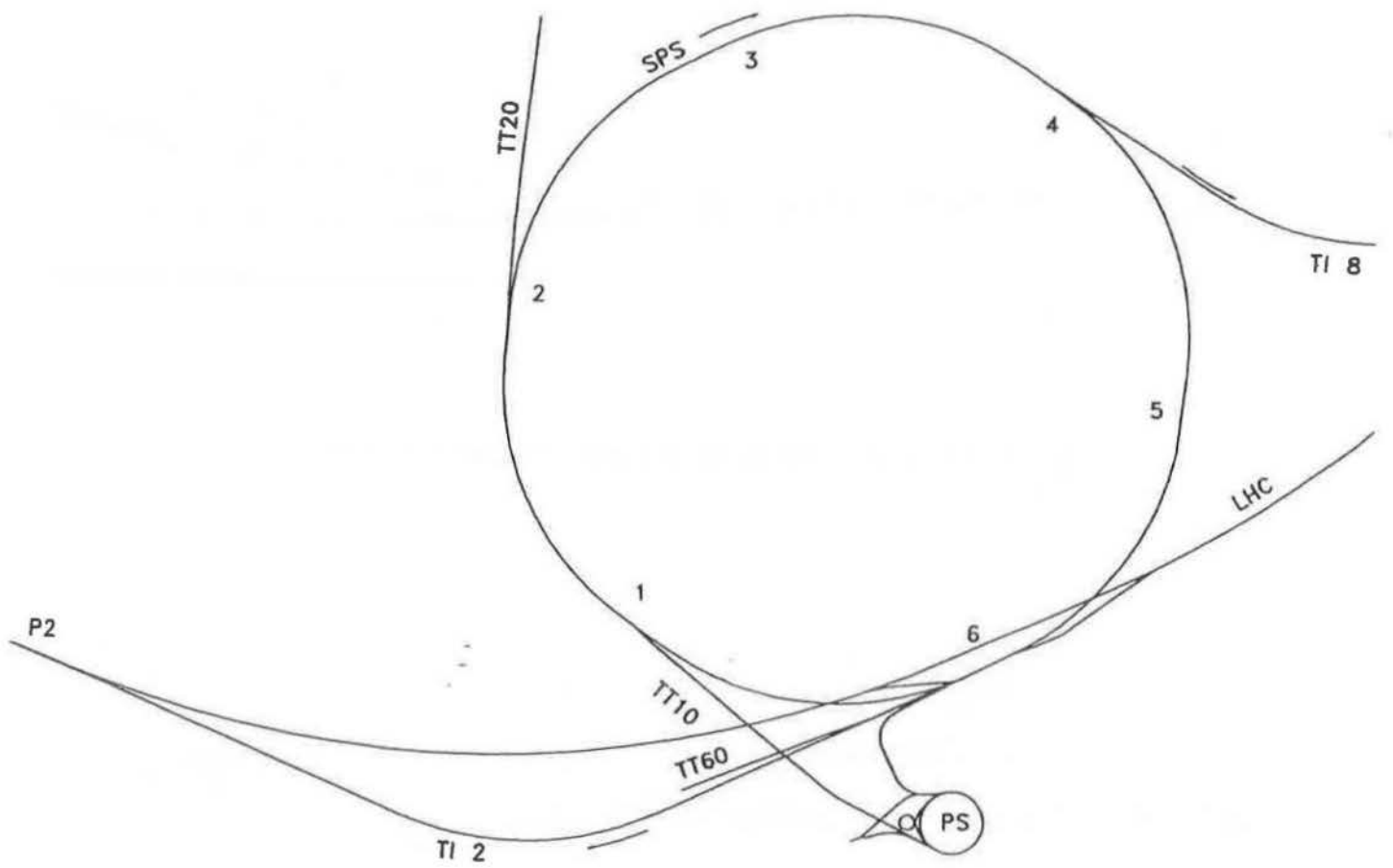


Figure III.7 - Représentation schématique du PS

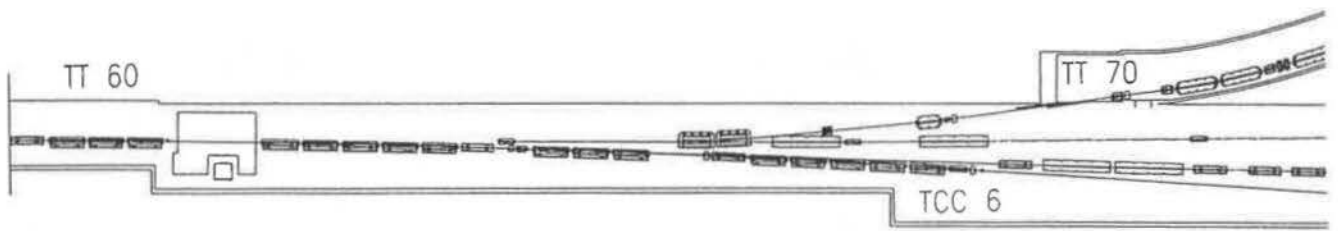
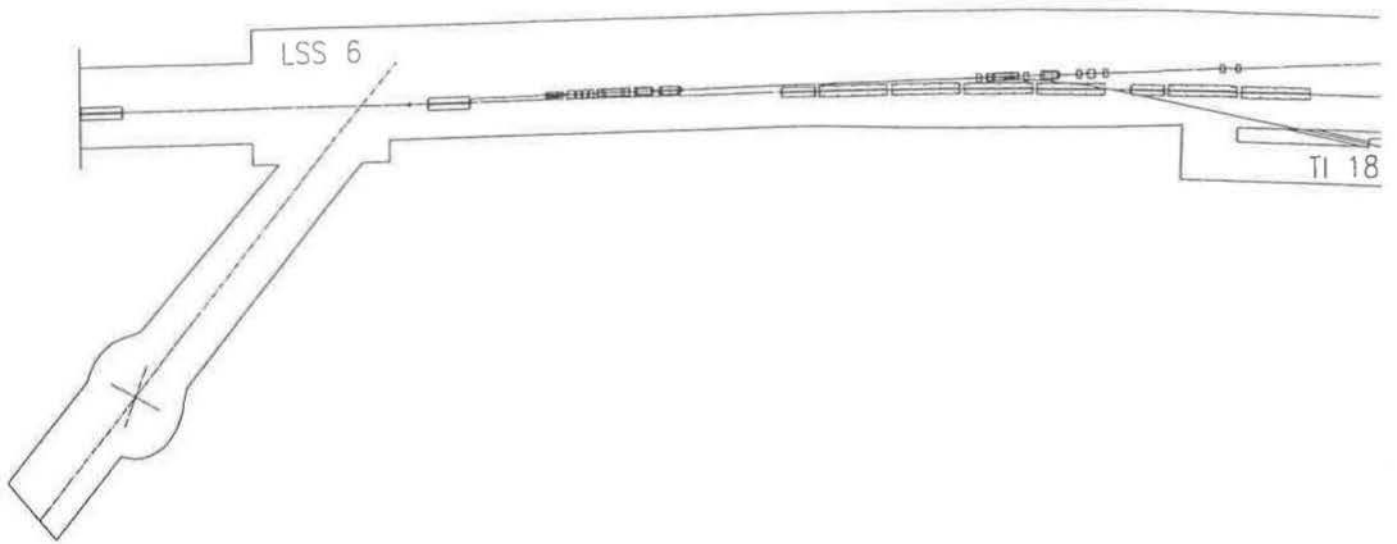


Figure III.8- Plan schématique de la zone d'extraction Ouest

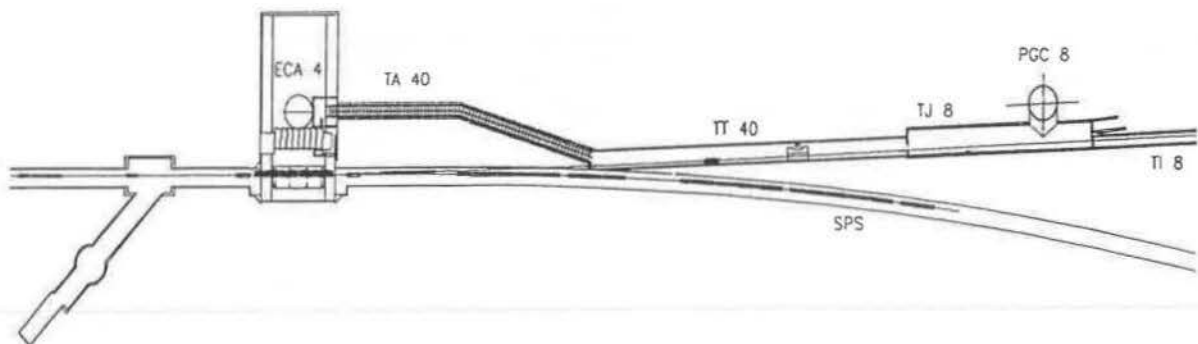


Figure III.9 - Plan schématique de la nouvelle zone d'extraction Est

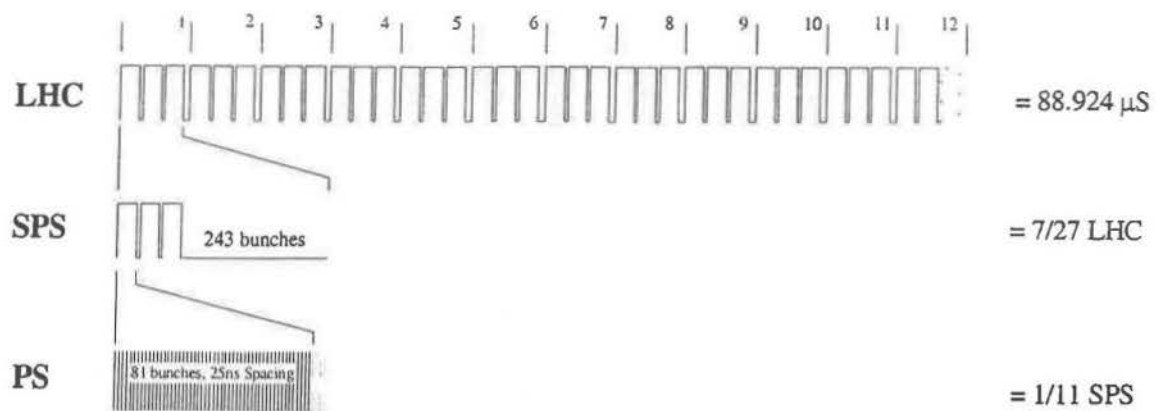


Figure III.10 - Arrangement des paquets du faisceau dans le LHC, le SPS et le PS

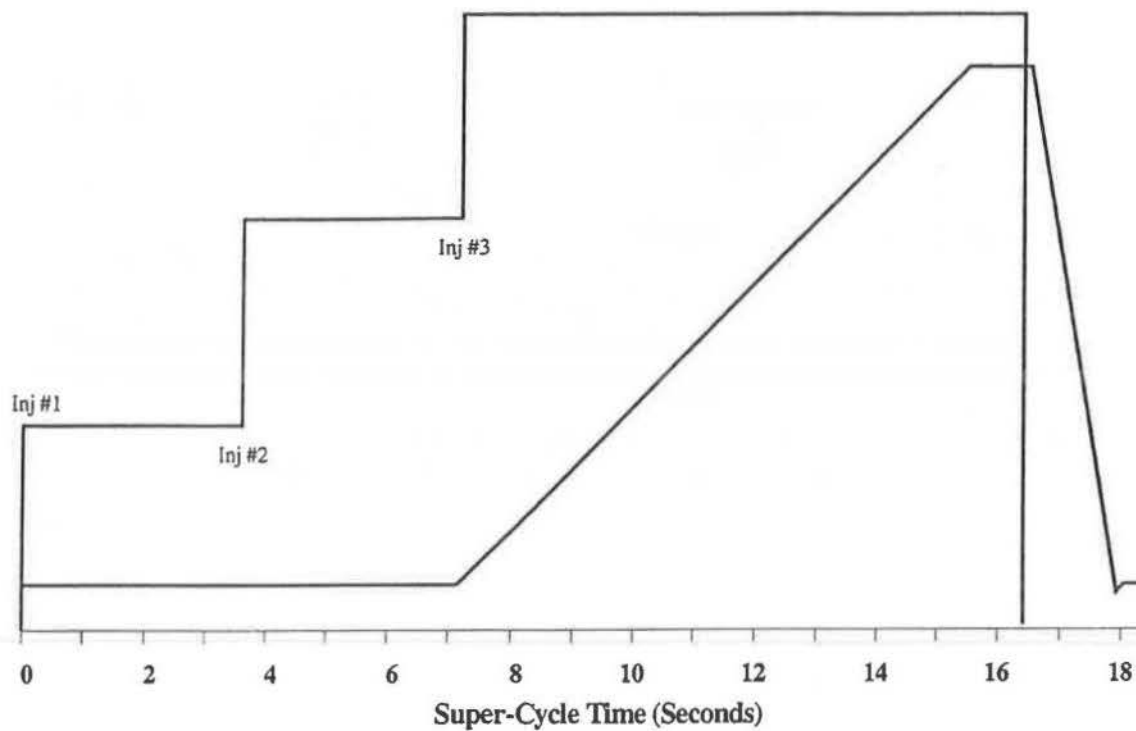


Figure III.11 - Le cycle SPS pour le remplissage du LHC

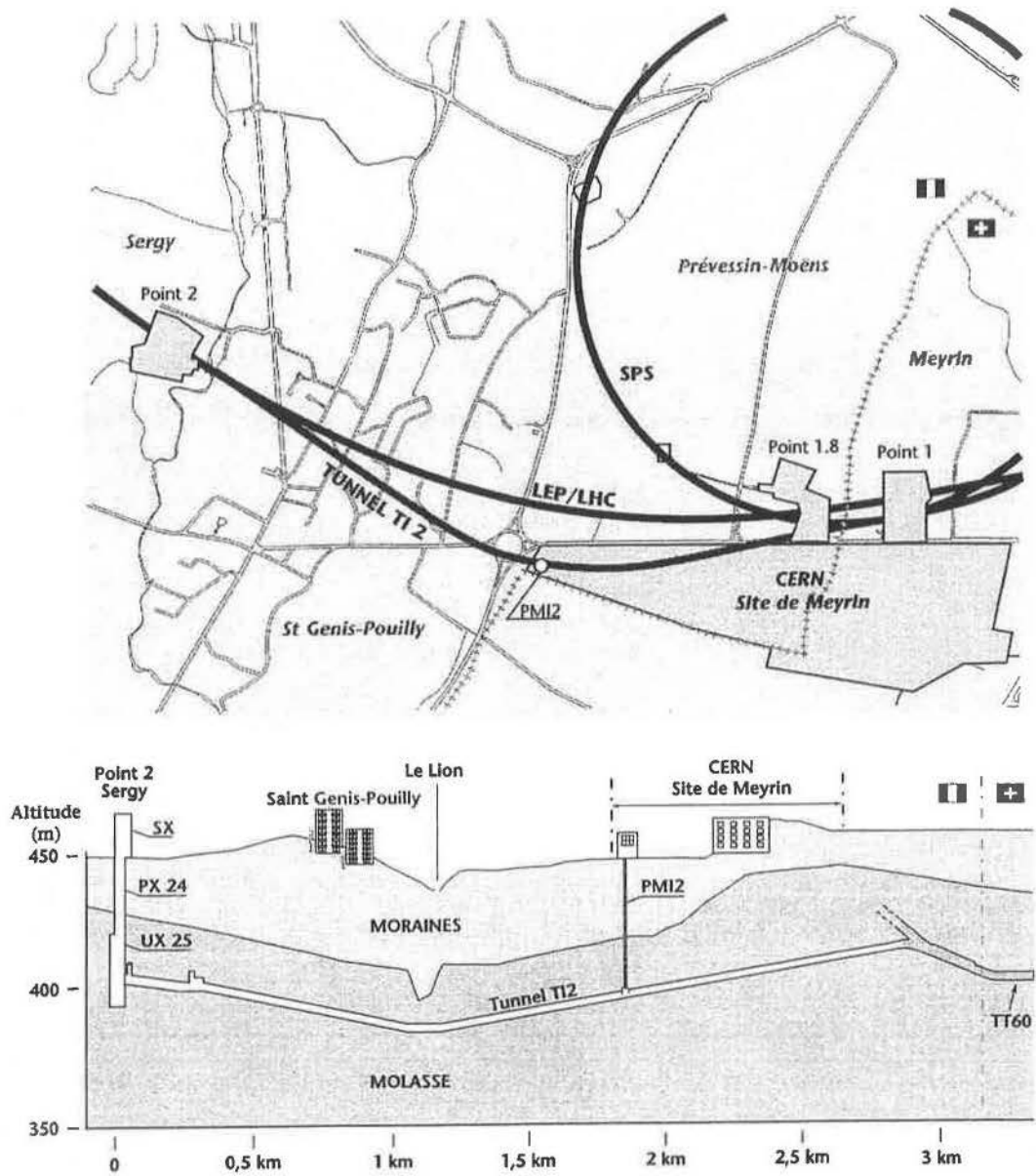


Figure III.12 - Plan de situation et profil longitudinal du tunnel de transfert T12

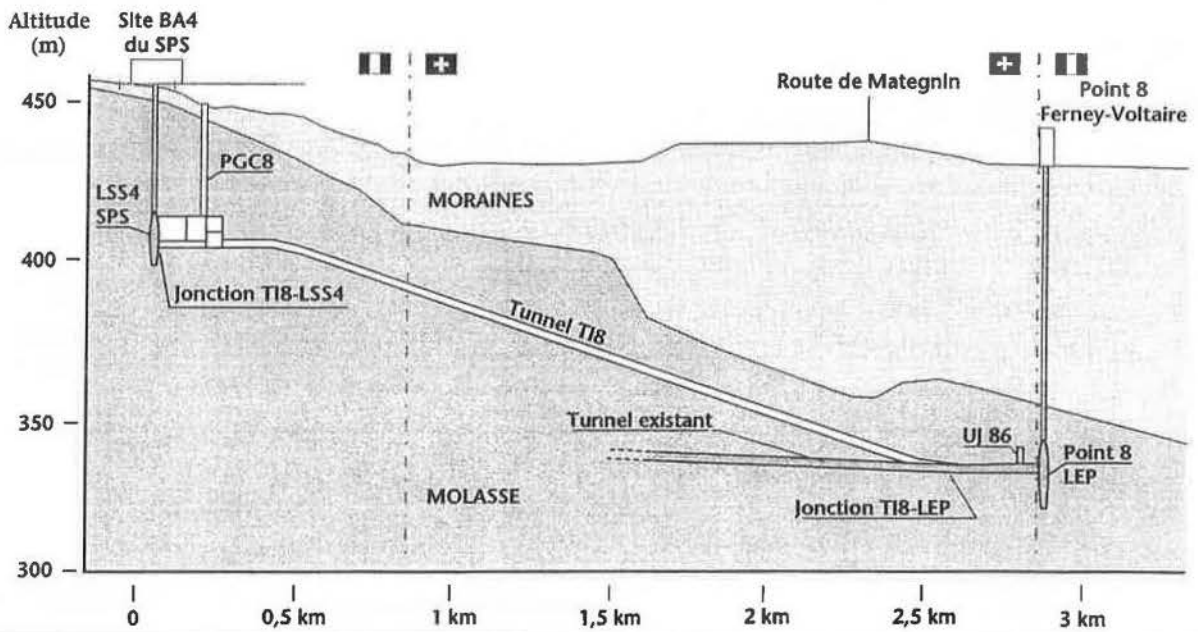
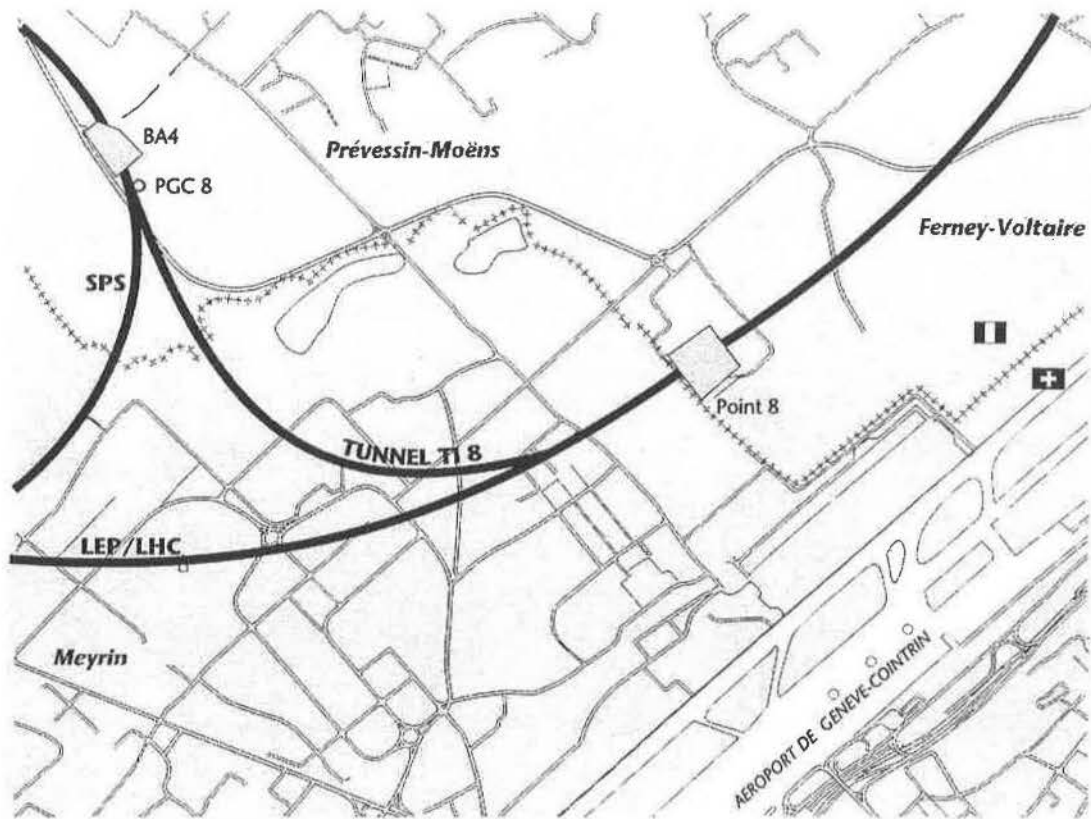


Figure III.13 - Plan de situation et profil longitudinal du tunnel de transfert T18

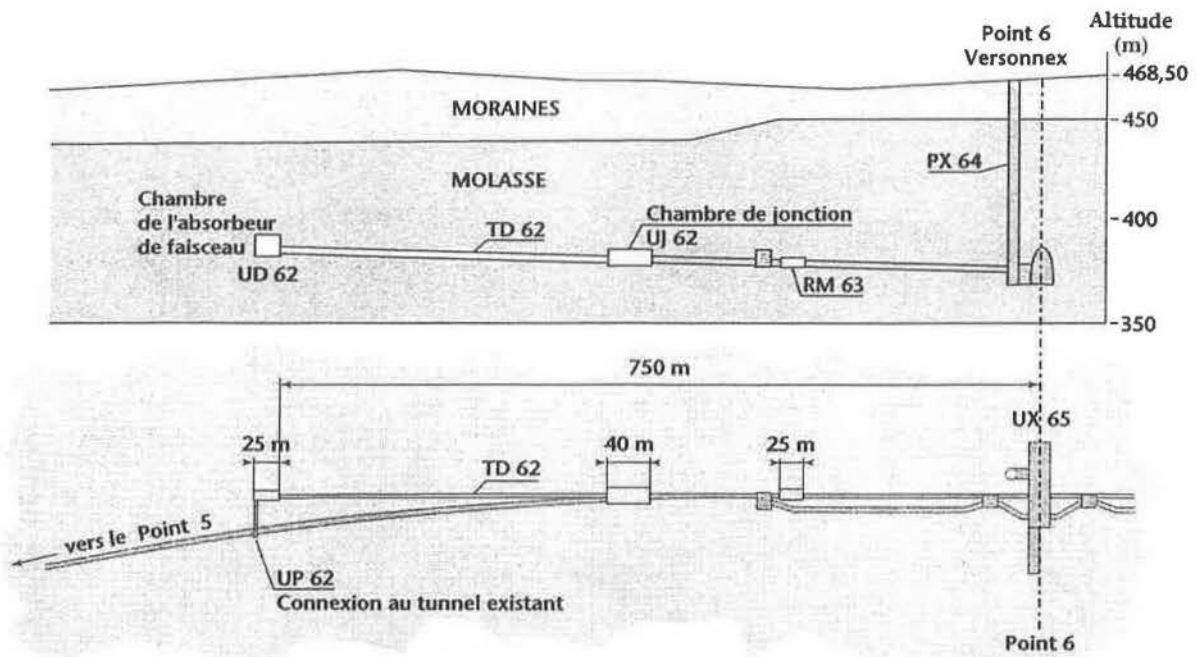


Figure III.14 - Situation et profil du tunnel TD 62 et de la chambre d'absorbeur UD 62

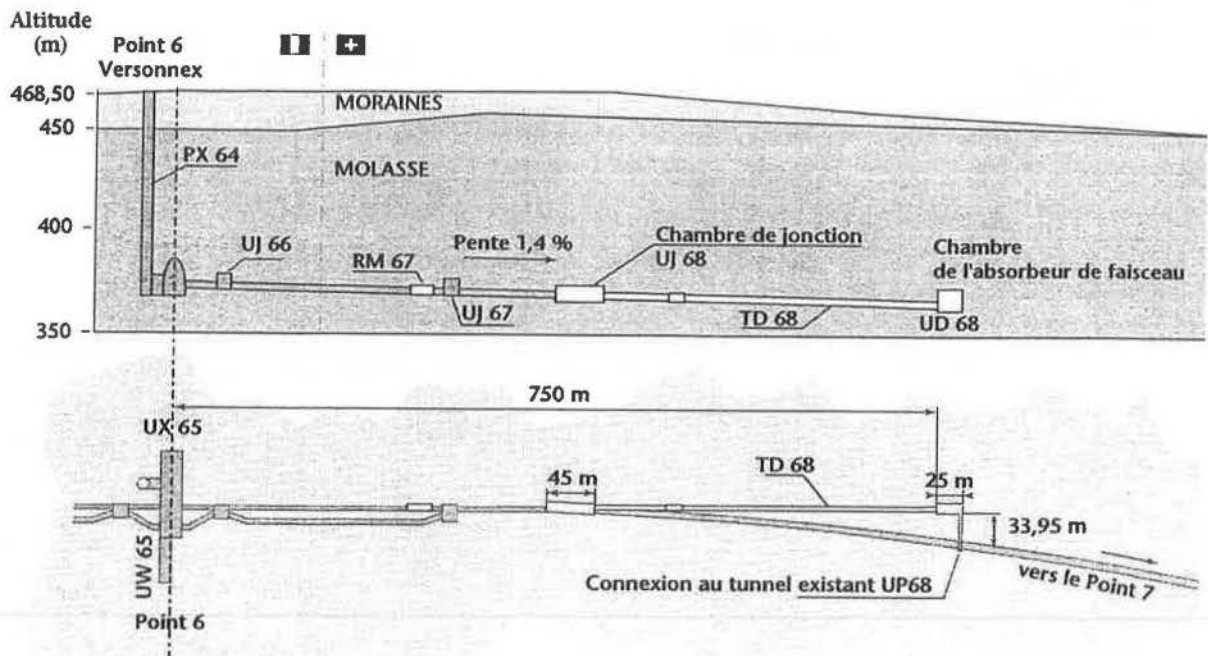
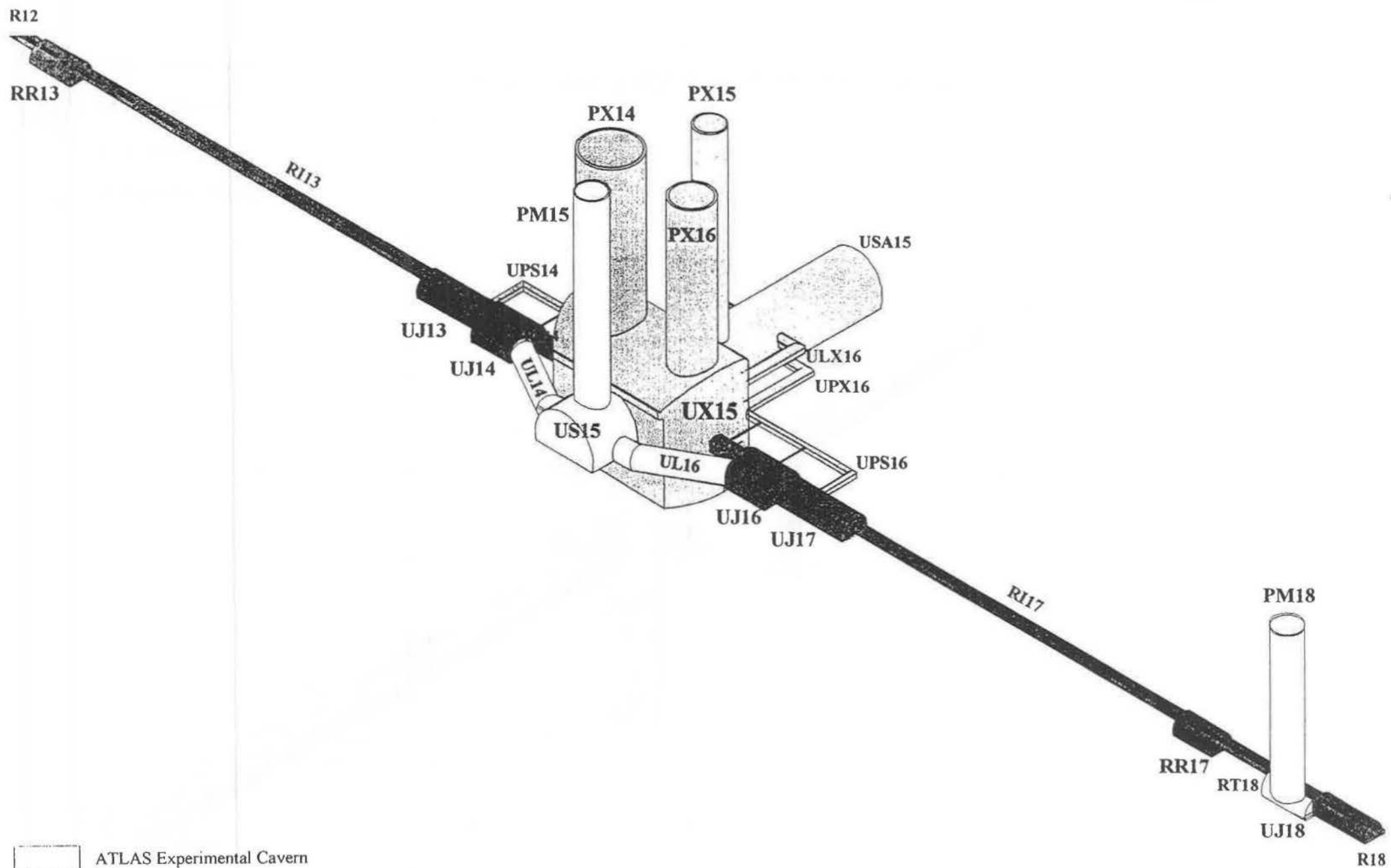


Figure III.15 - Situation et profil du tunnel TD 68 et de la chambre d'absorbeur UD 68



- ATLAS Experimental Cavern
- ATLAS Service Cavern
- Machine Beam Area
- Machine Service Area

Figure III.16 - LHC Point 1 : Ouvrages souterrains du LHC

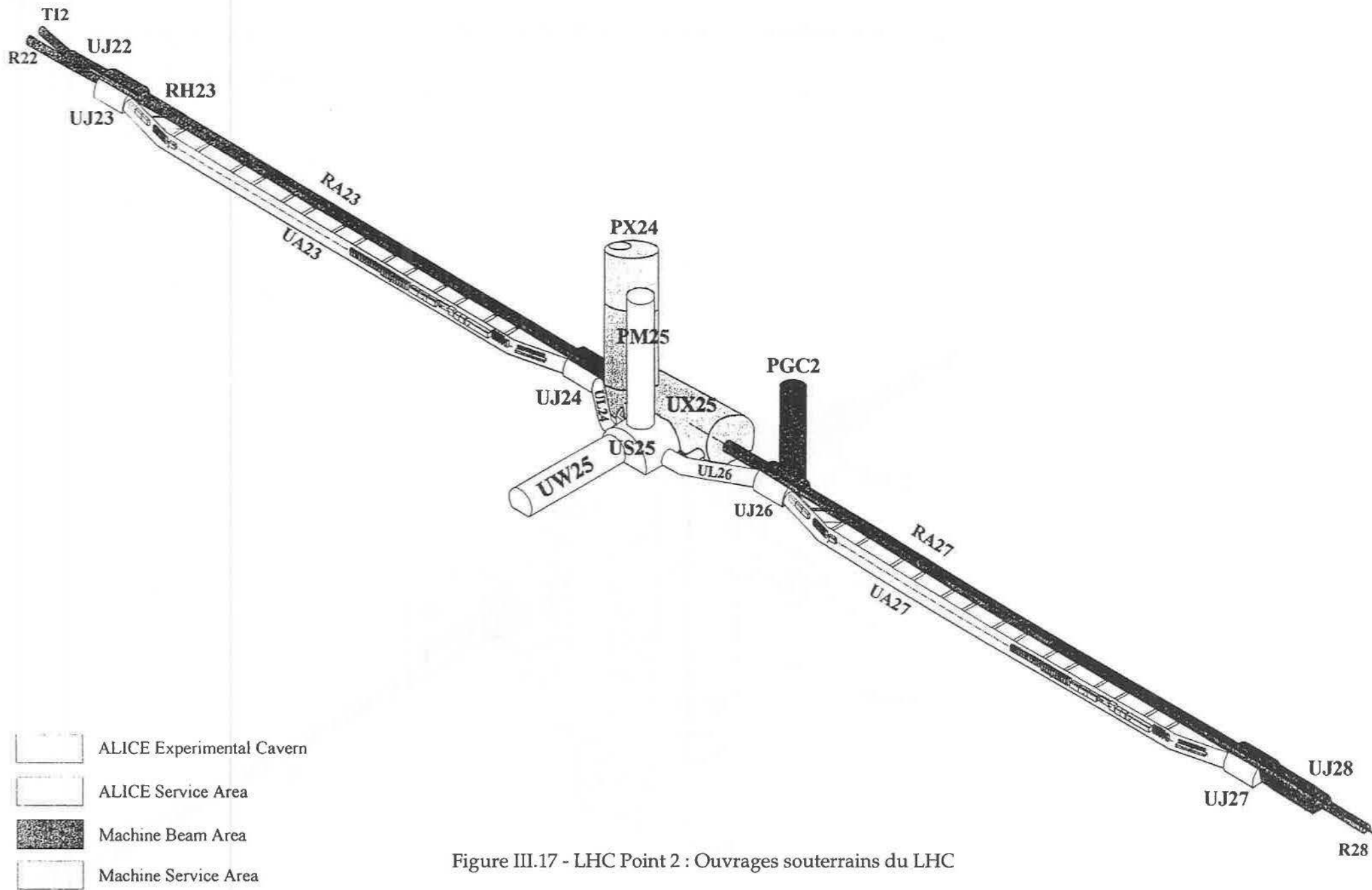


Figure III.17 - LHC Point 2 : Ouvrages souterrains du LHC

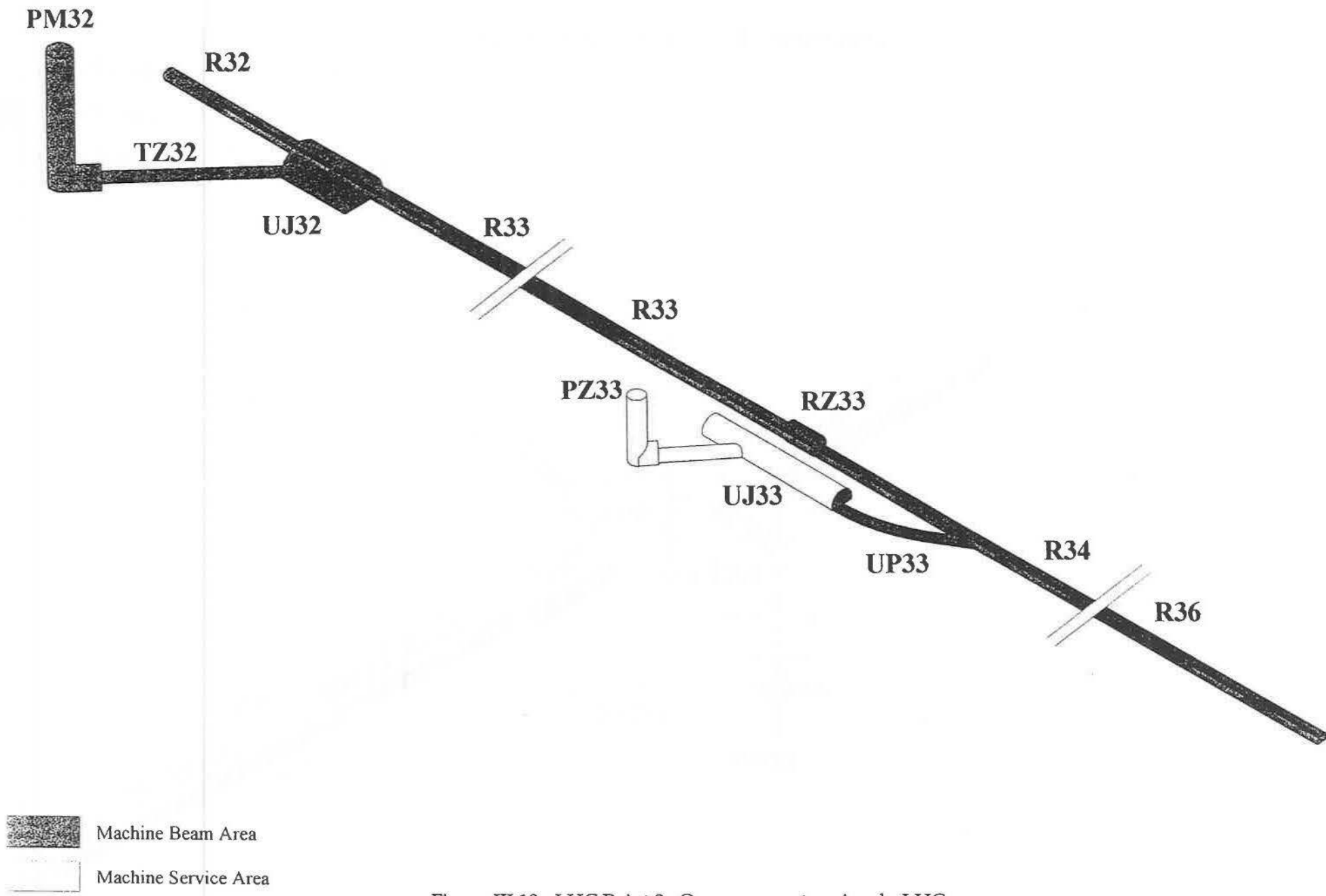


Figure III.18 - LHC Point 3 : Ouvrages souterrains du LHC

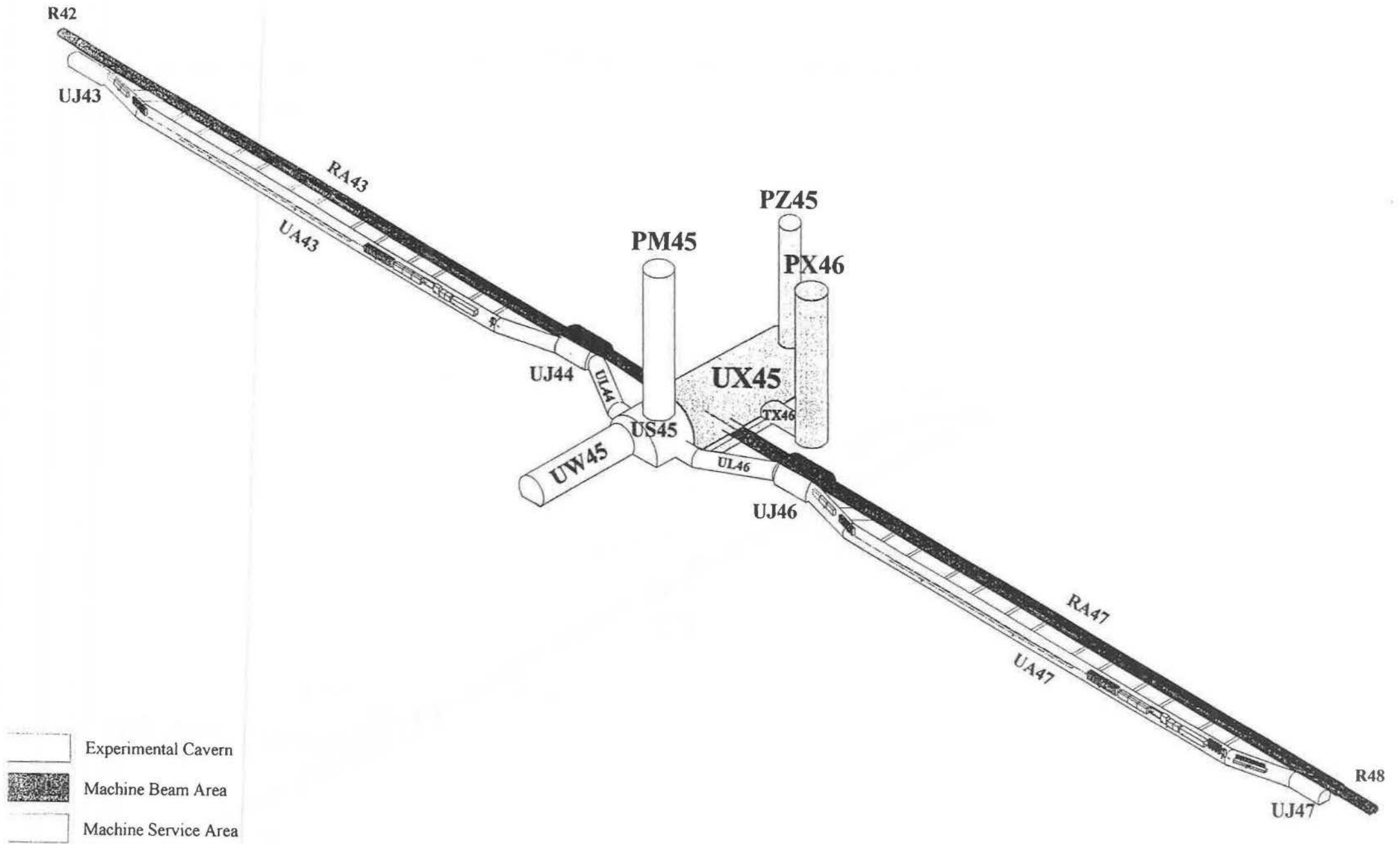


Figure III.19 - LHC Point 4 : Ouvrages souterrains du LHC

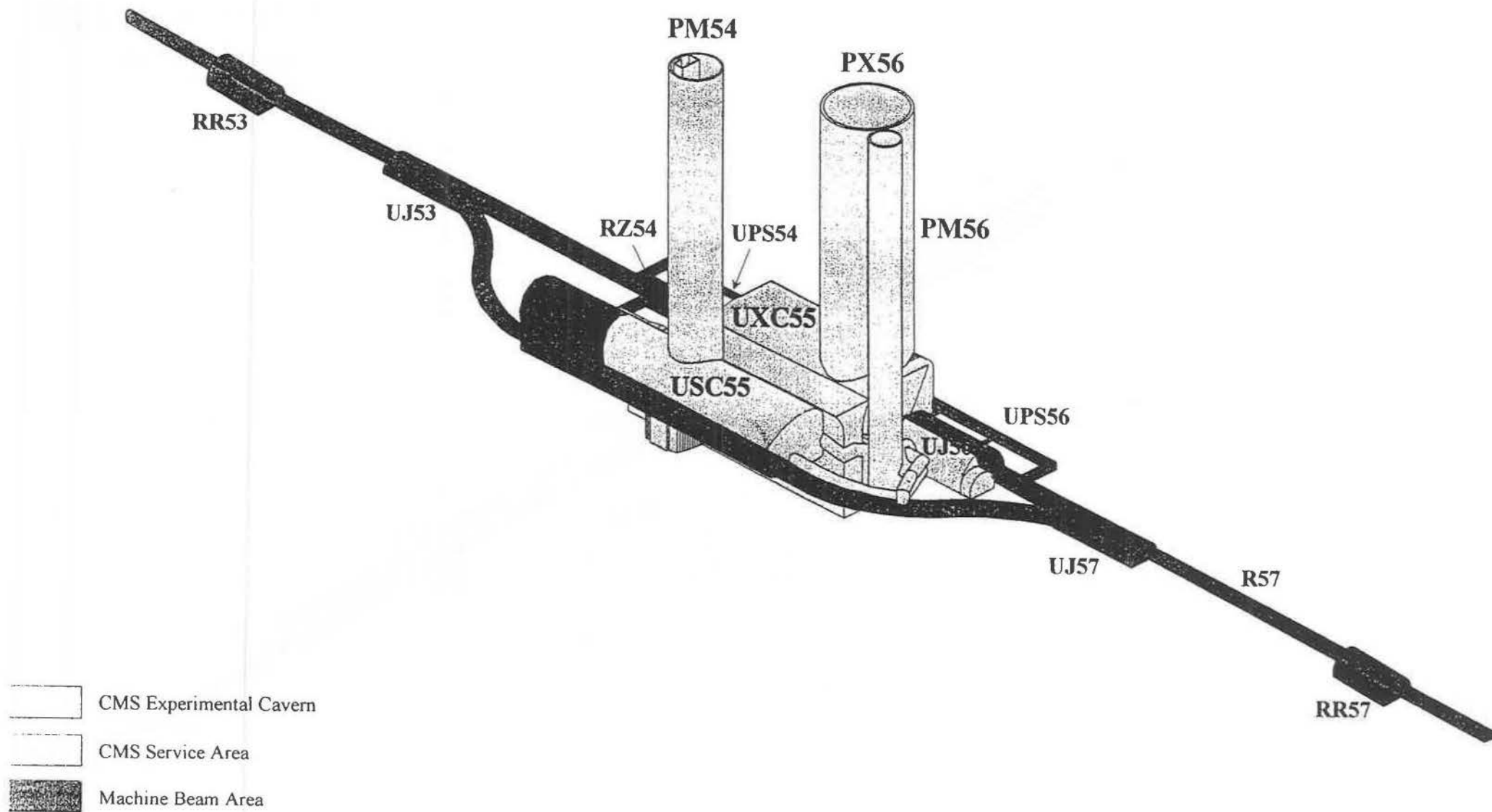


Figure III.20 - LHC Point 5 : Ouvrages souterrains du LHC

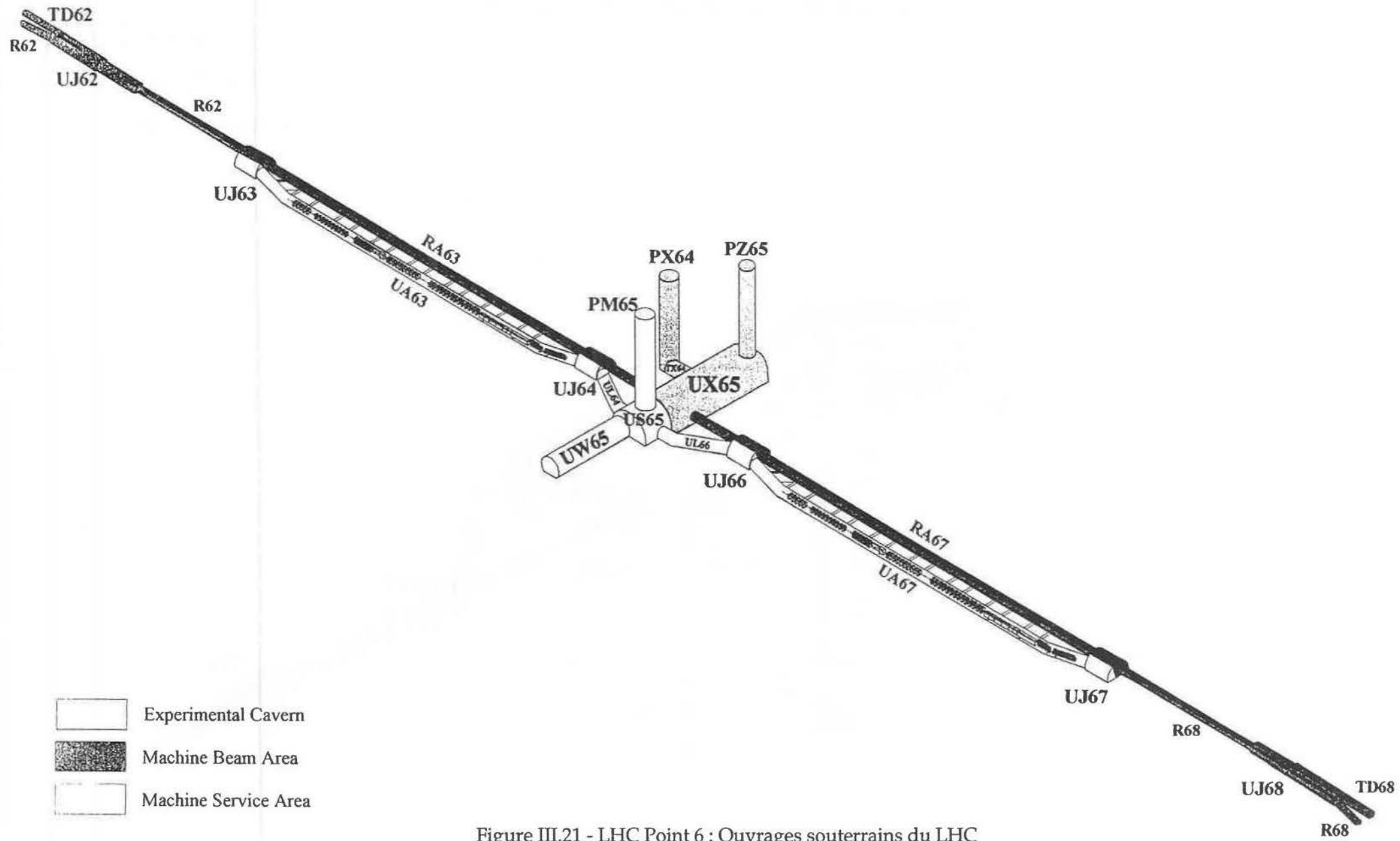


Figure III.21 - LHC Point 6 : Ouvrages souterrains du LHC

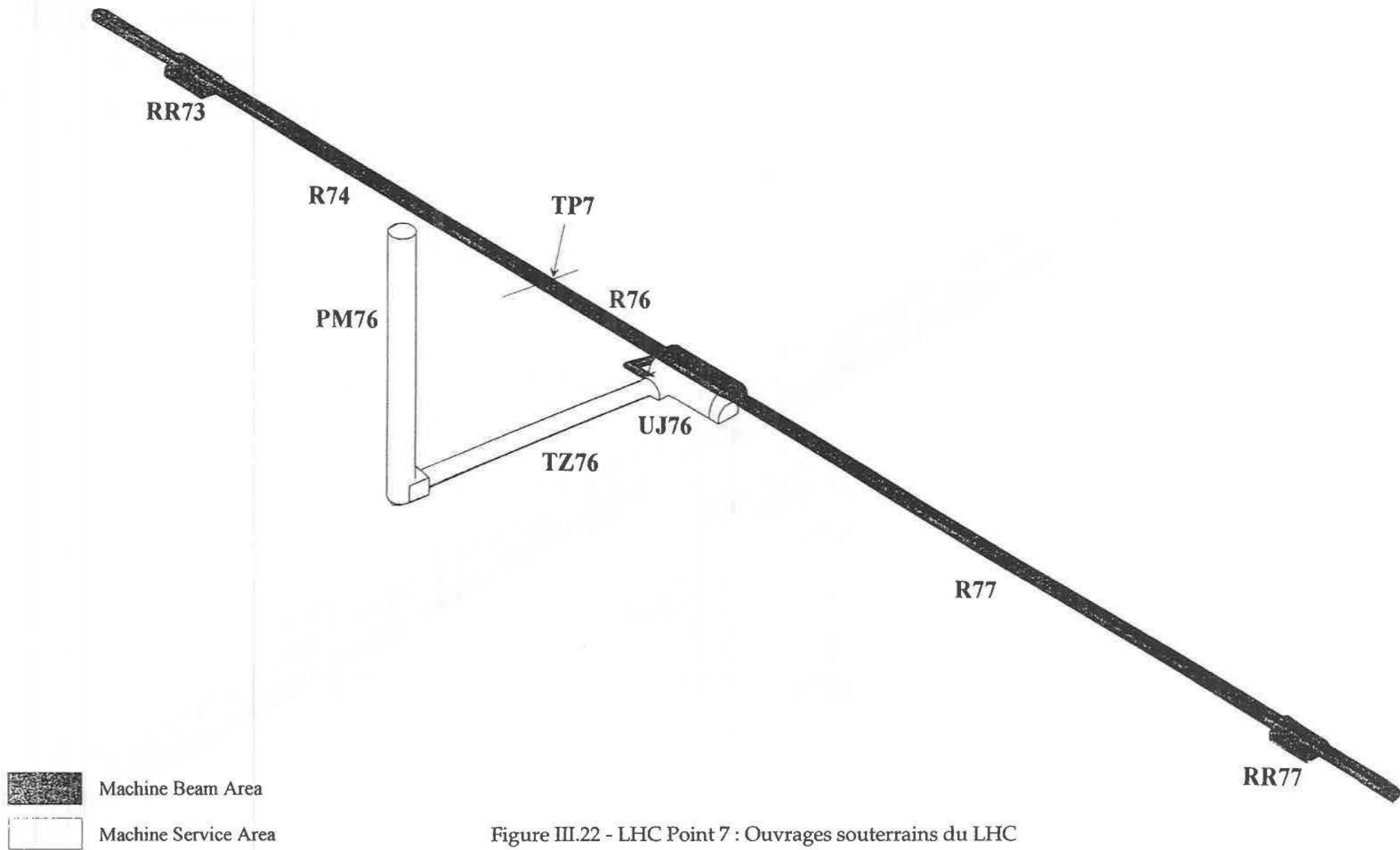


Figure III.22 - LHC Point 7 : Ouvrages souterrains du LHC

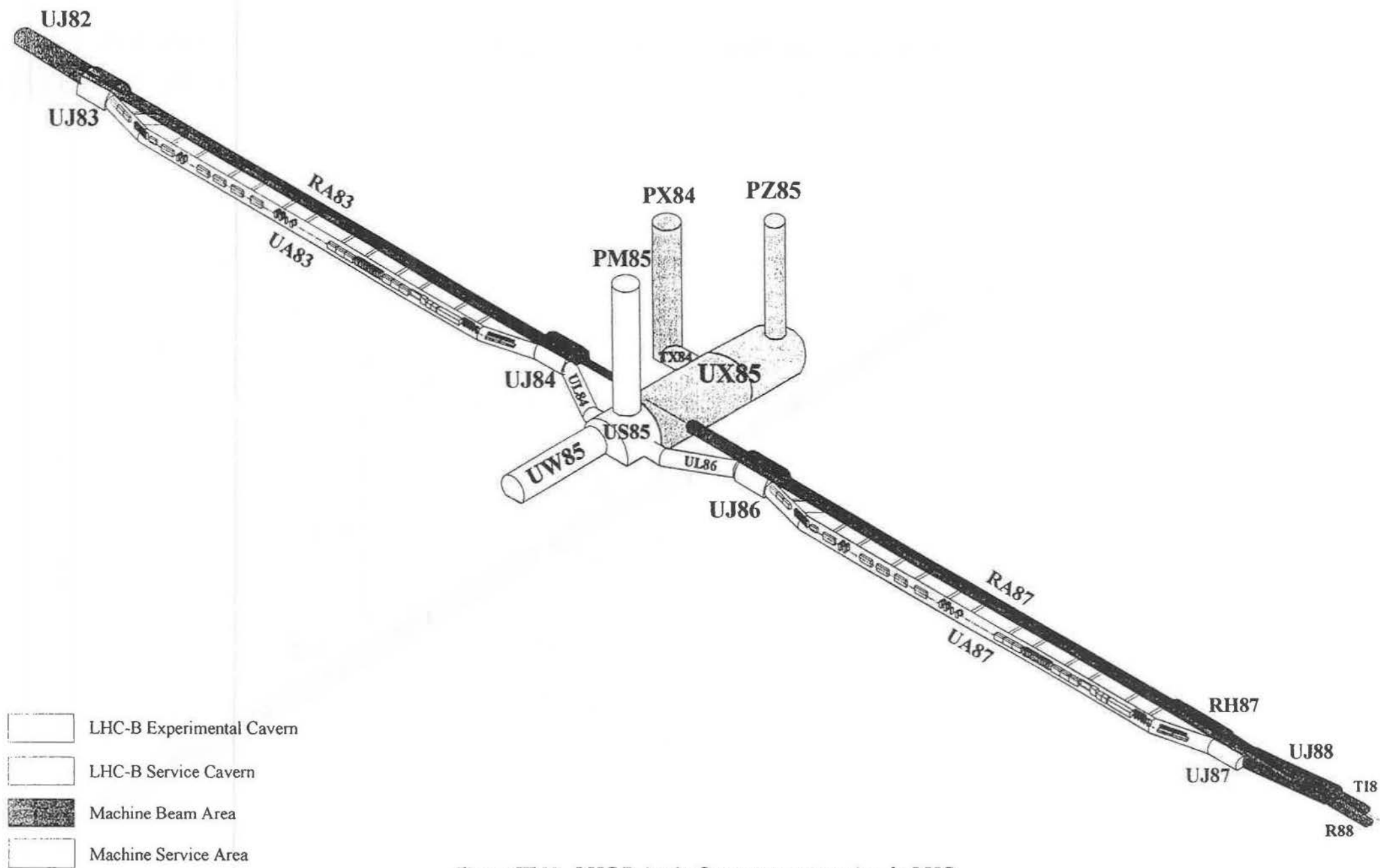


Figure III.23 - LHC Point 8 : Ouvrages souterrains du LHC

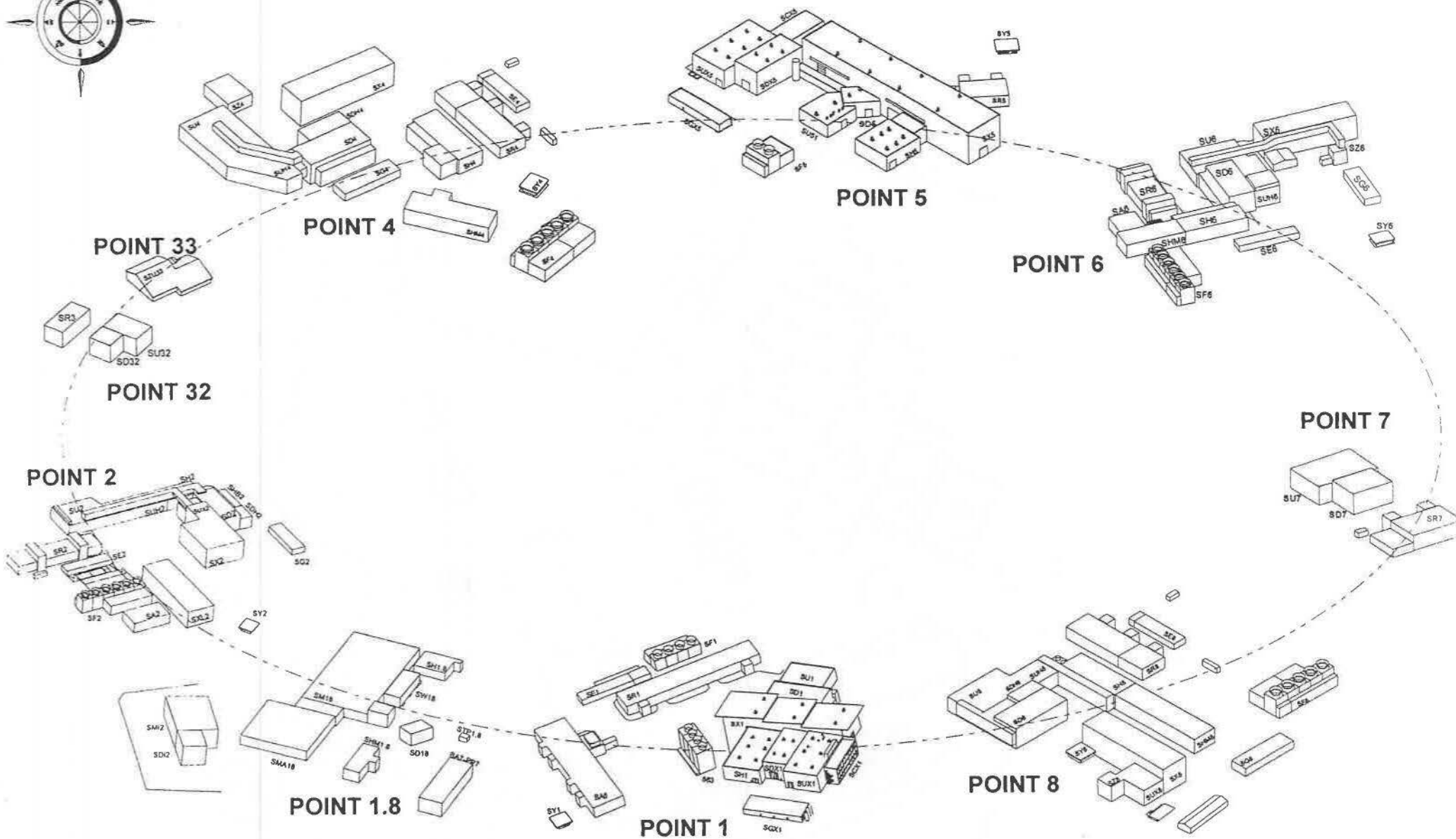
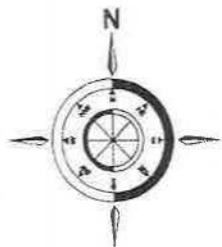


Figure III.24 - Bâtiments de surface LHC

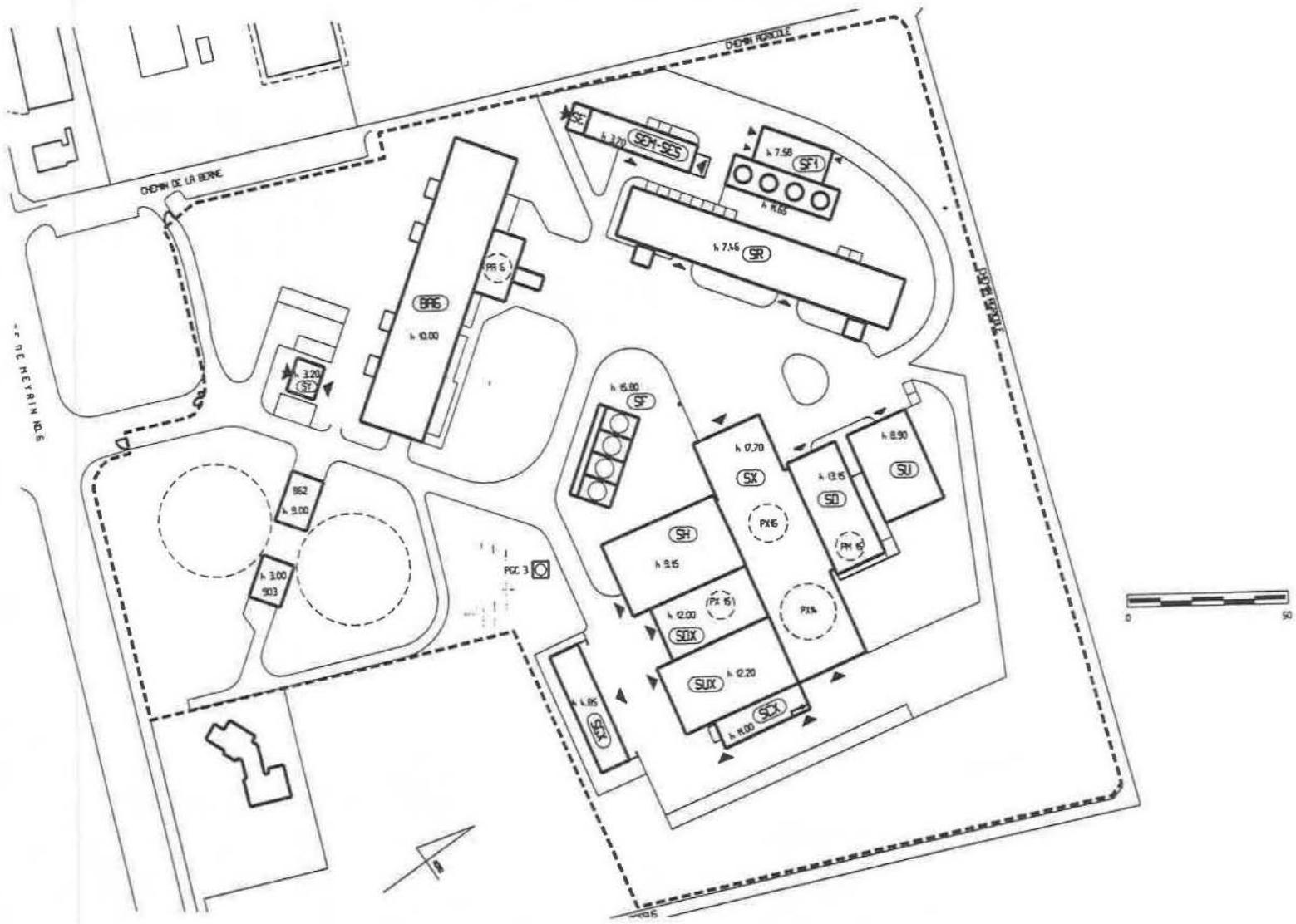


Figure III.25 – Point 1: Plan de masse des bâtiments de surface du LHC

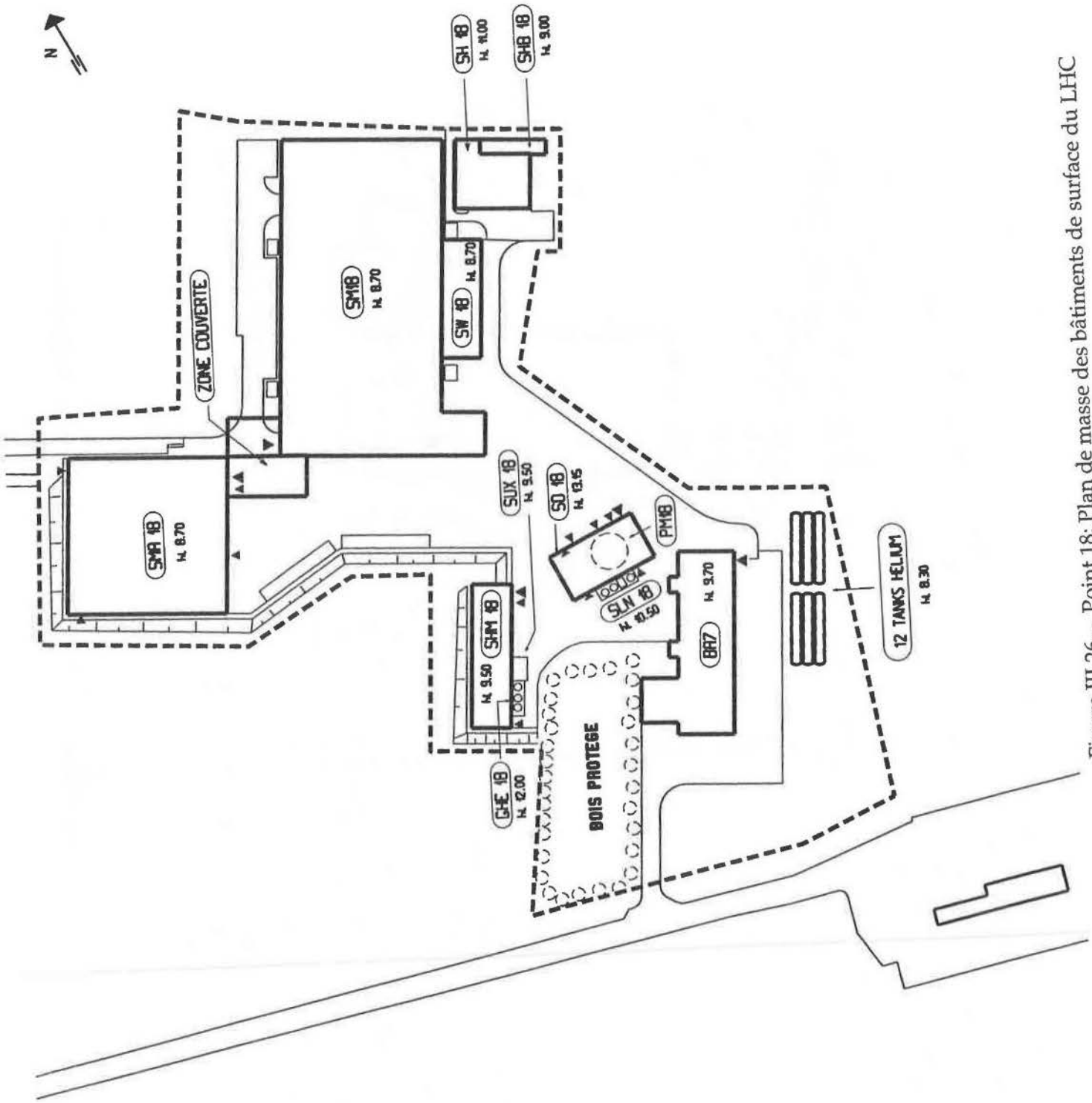


Figure III.26 – Point 18: Plan de masse des bâtiments de surface du LHC

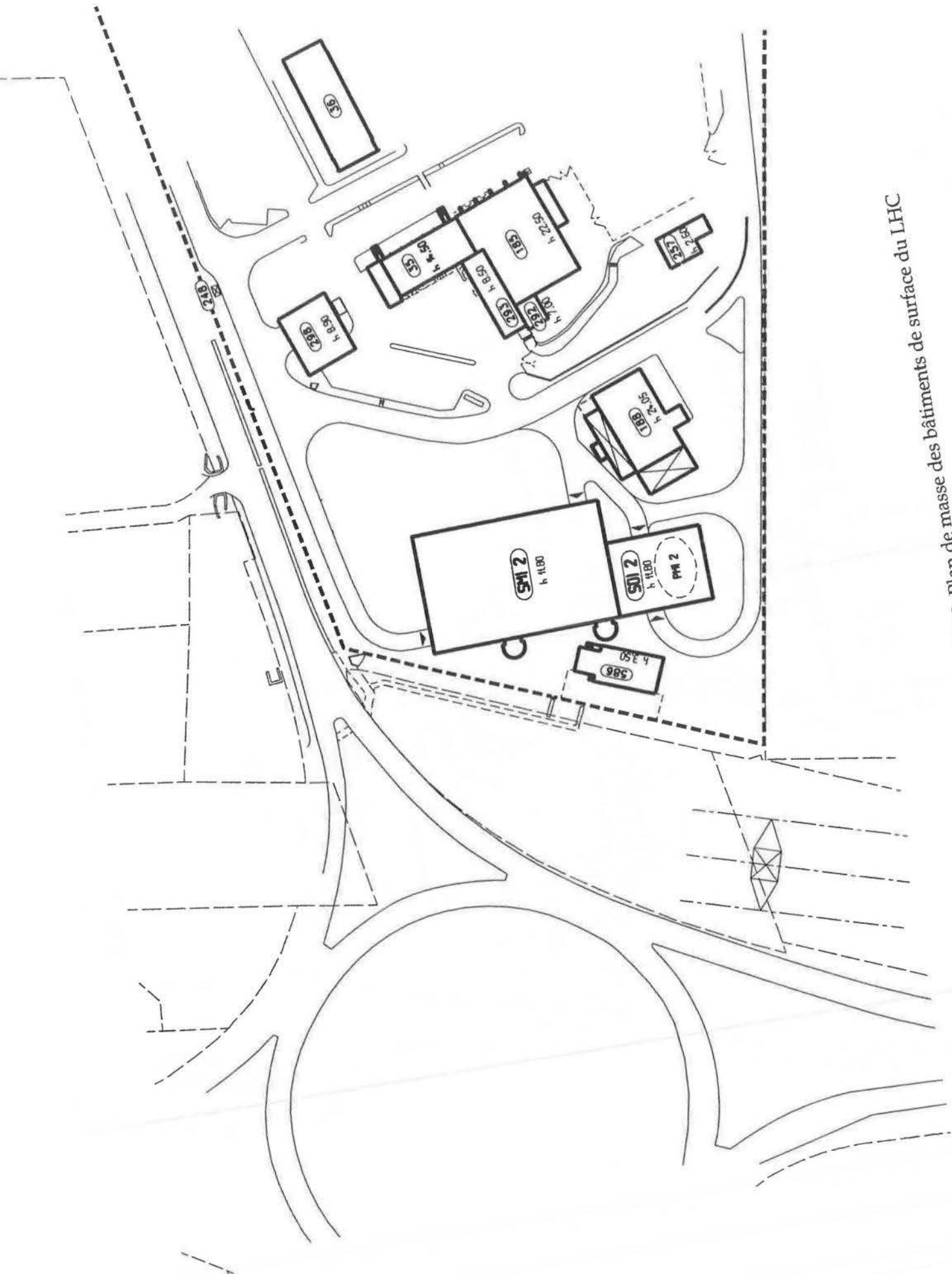


Figure III.27 - Zone SM12-SD12: Plan de masse des bâtiments de surface du LHC

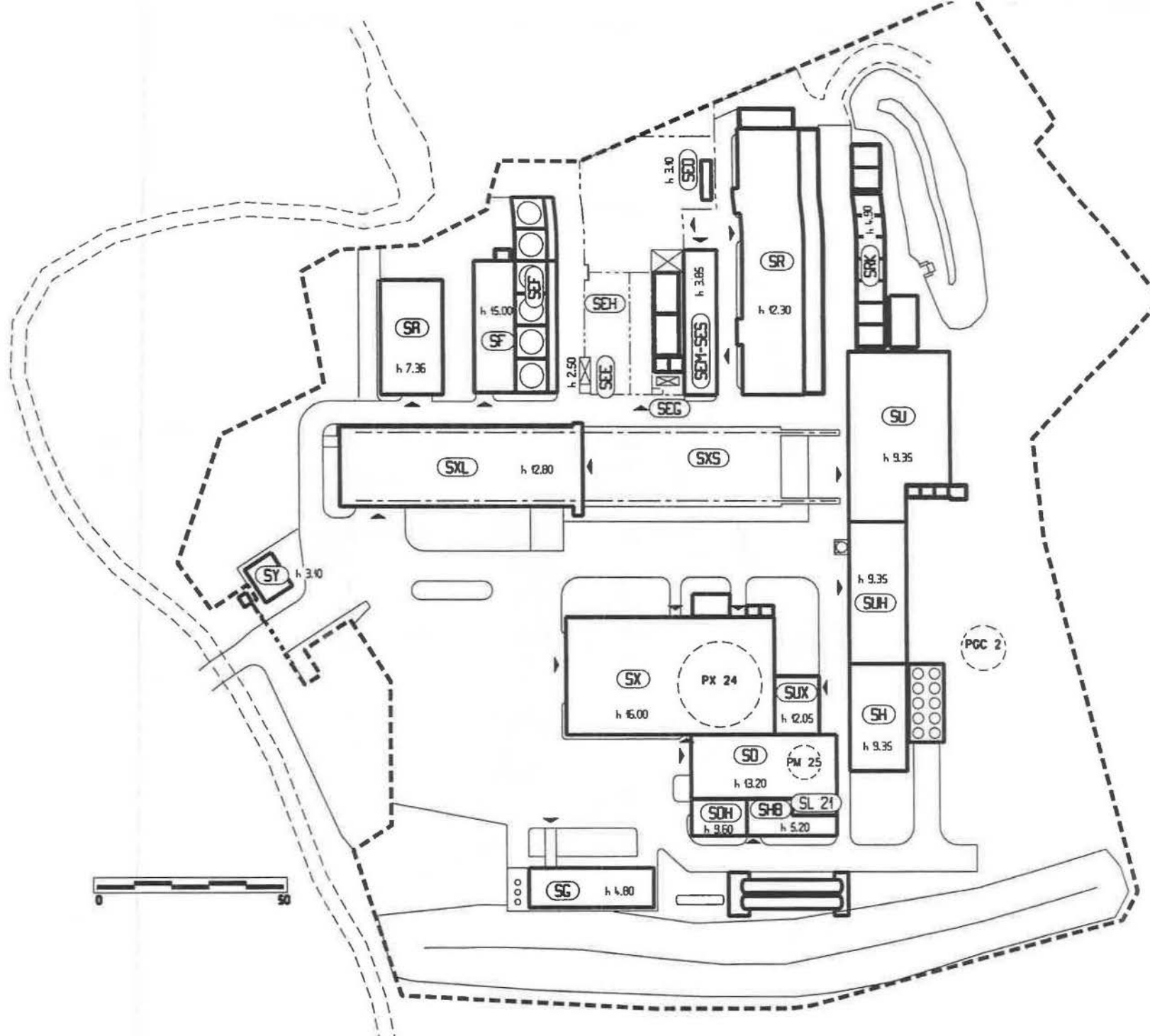


Figure III.28 – Point 2 : Plan de masse des bâtiments en surface du LHC

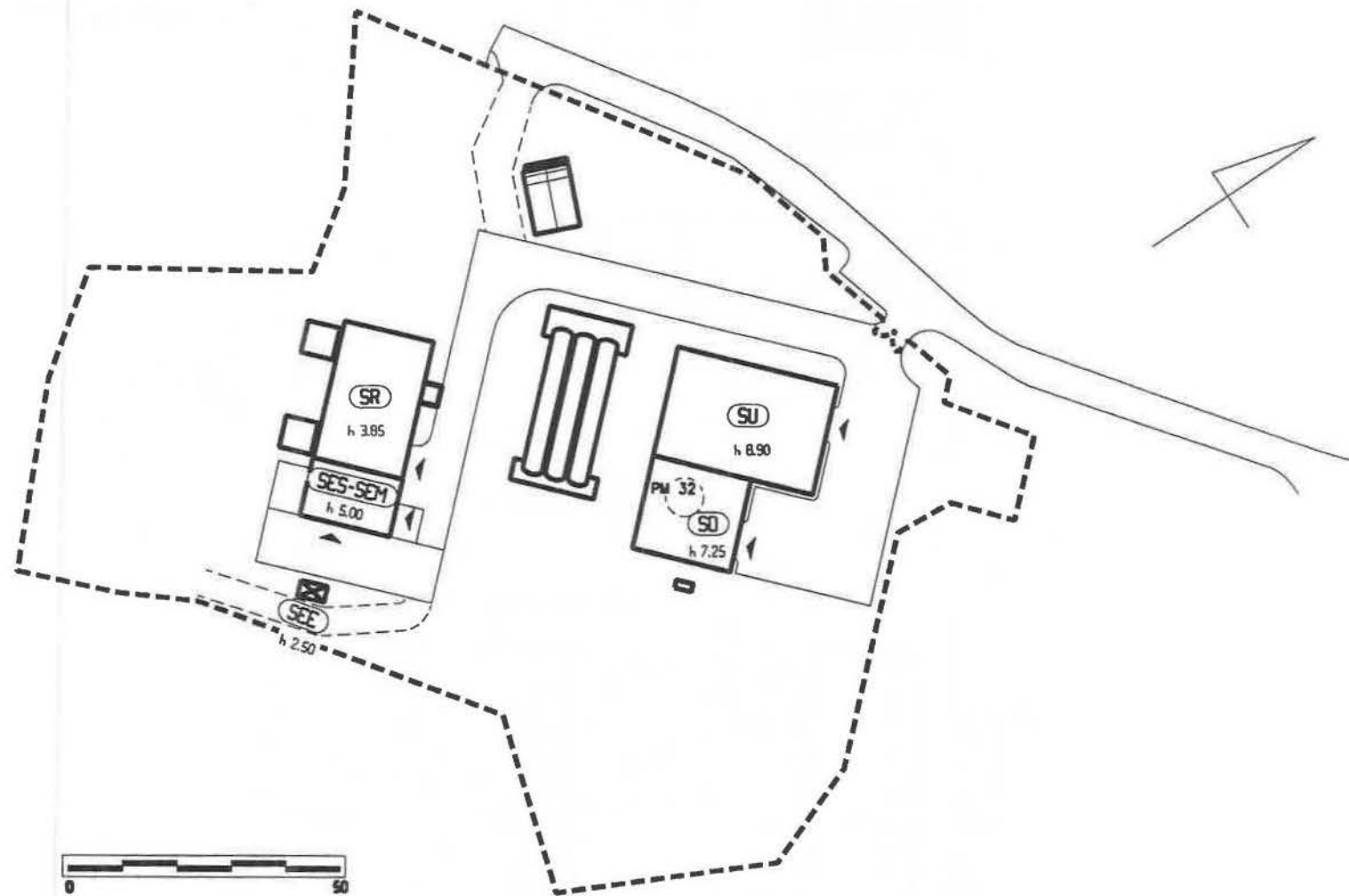


Figure III.29 – Point 32 : Plan de masse des bâtiments en surface du LHC

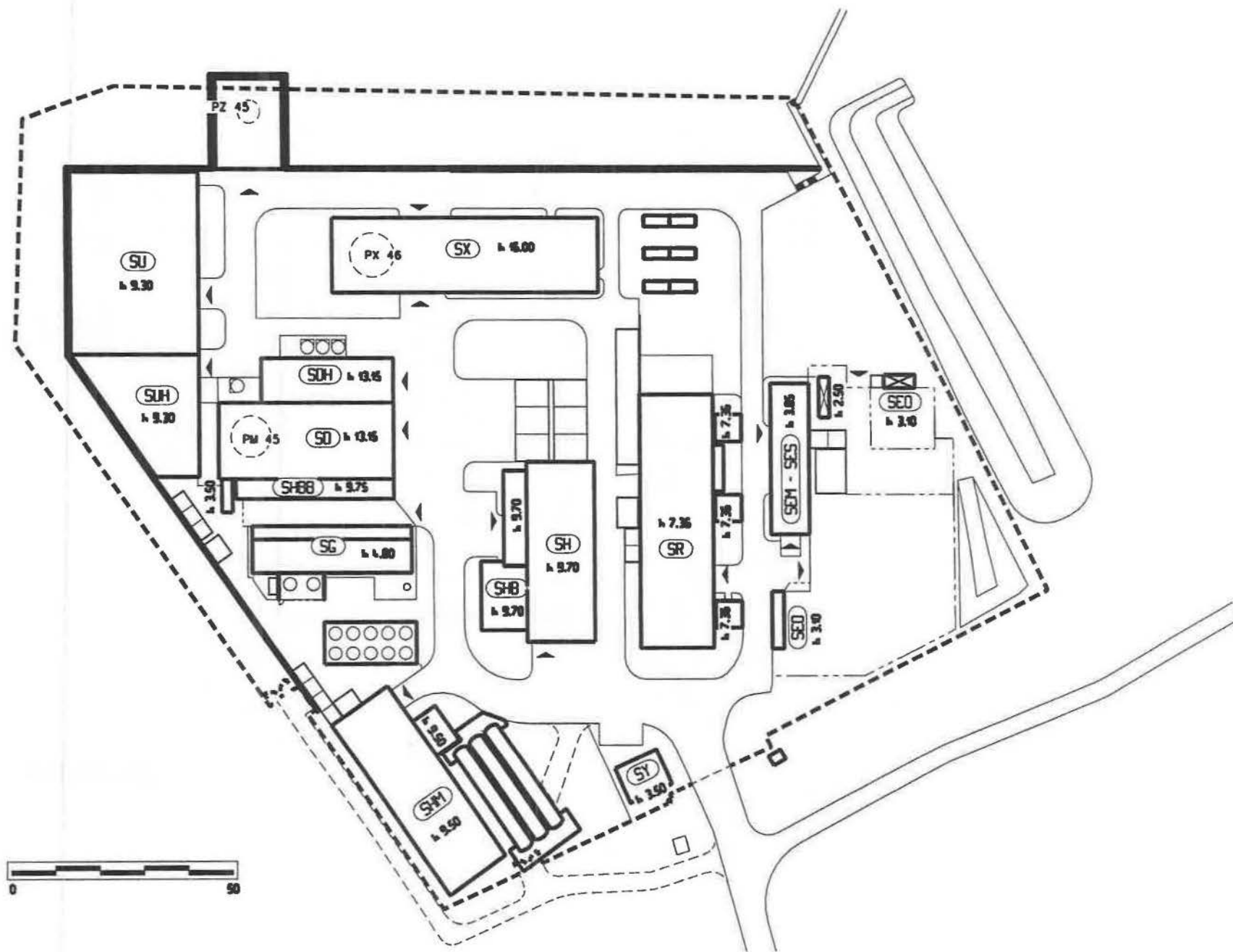


Figure III.30 – Point 4 : Plan de masse des bâtiments en surface du LHC

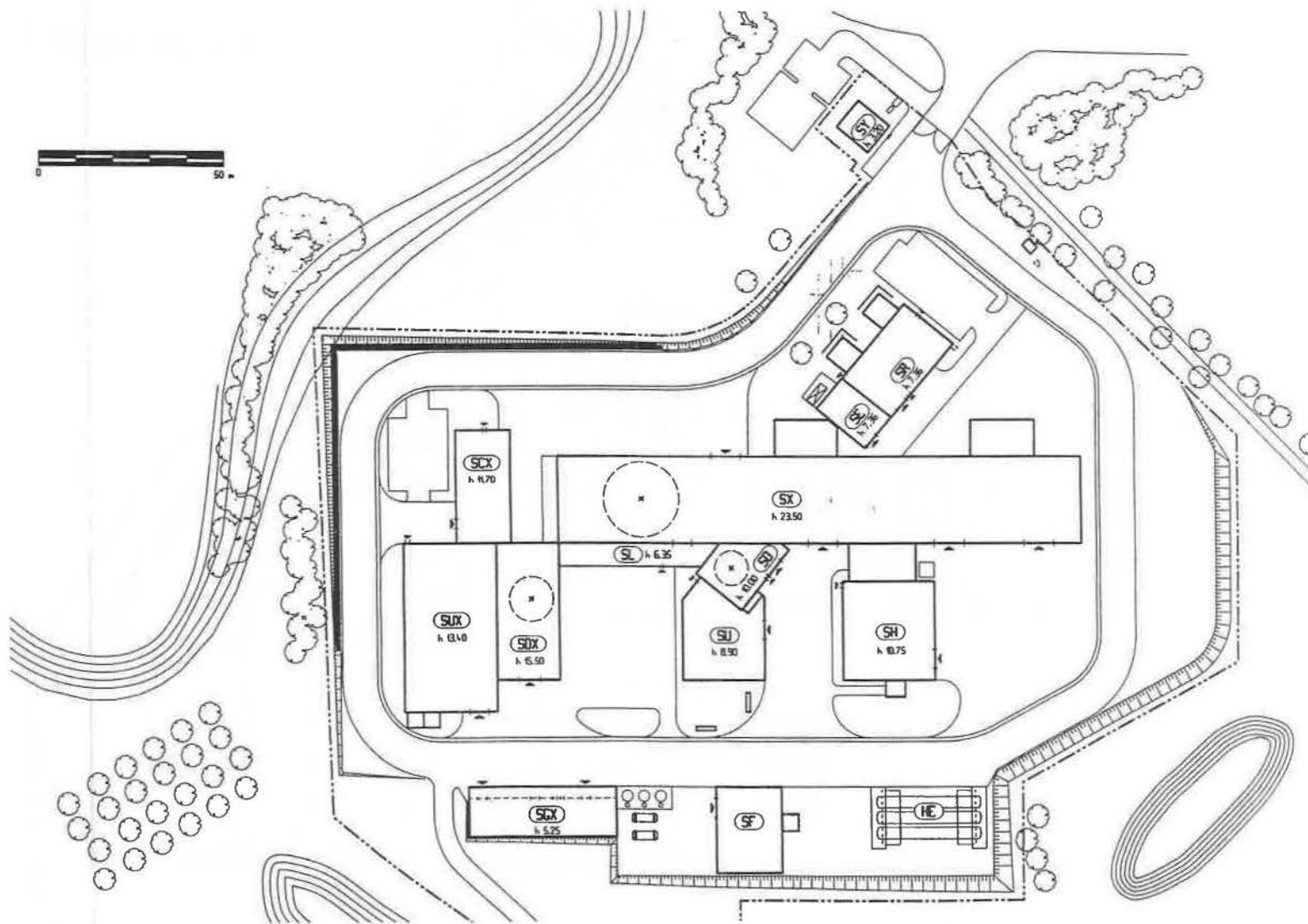


Figure III.31 – Point 5 : Plan de masse des bâtiments en surface du LHC

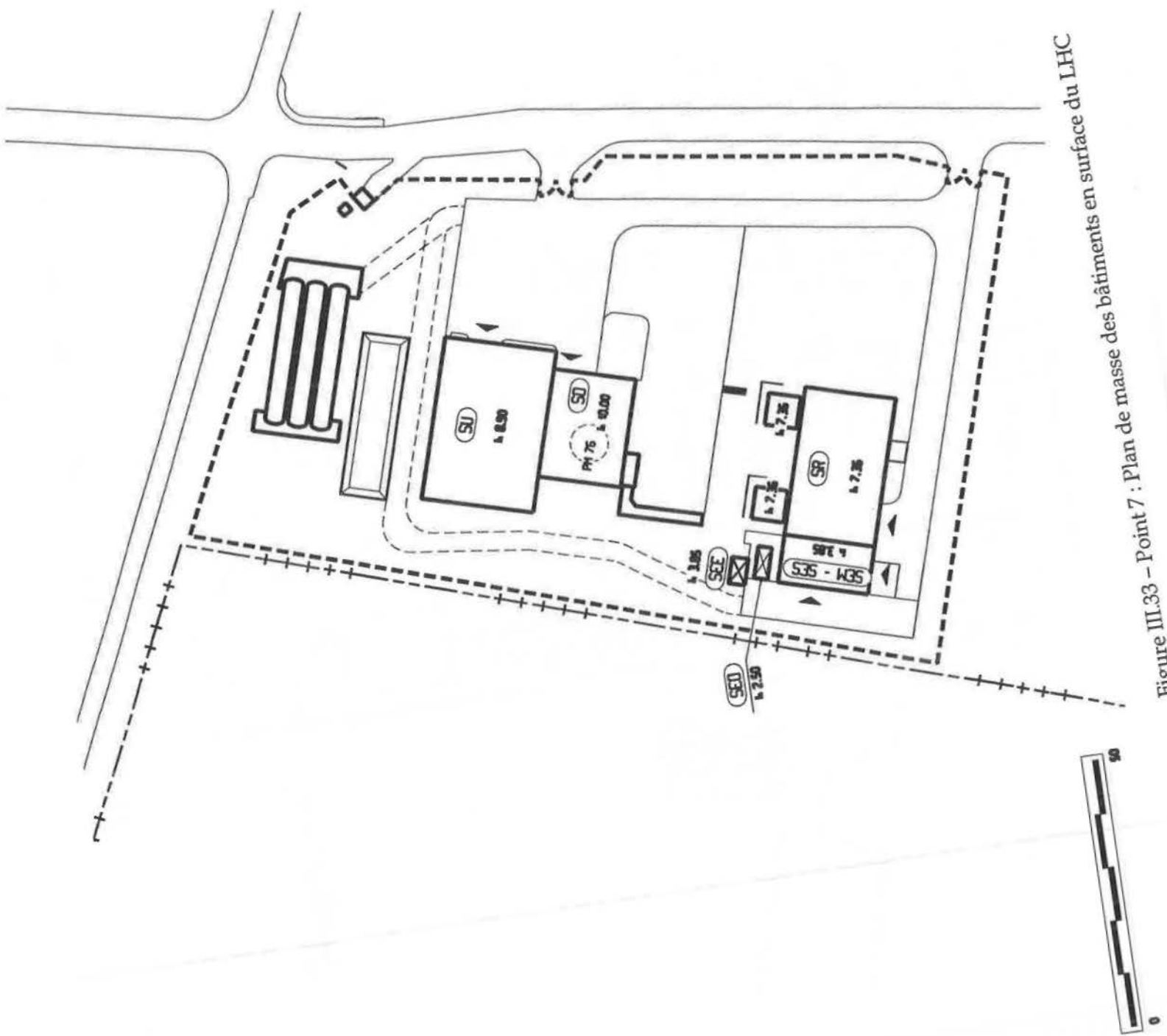


Figure III.33 - Point 7 : Plan de masse des bâtiments en surface du LHC

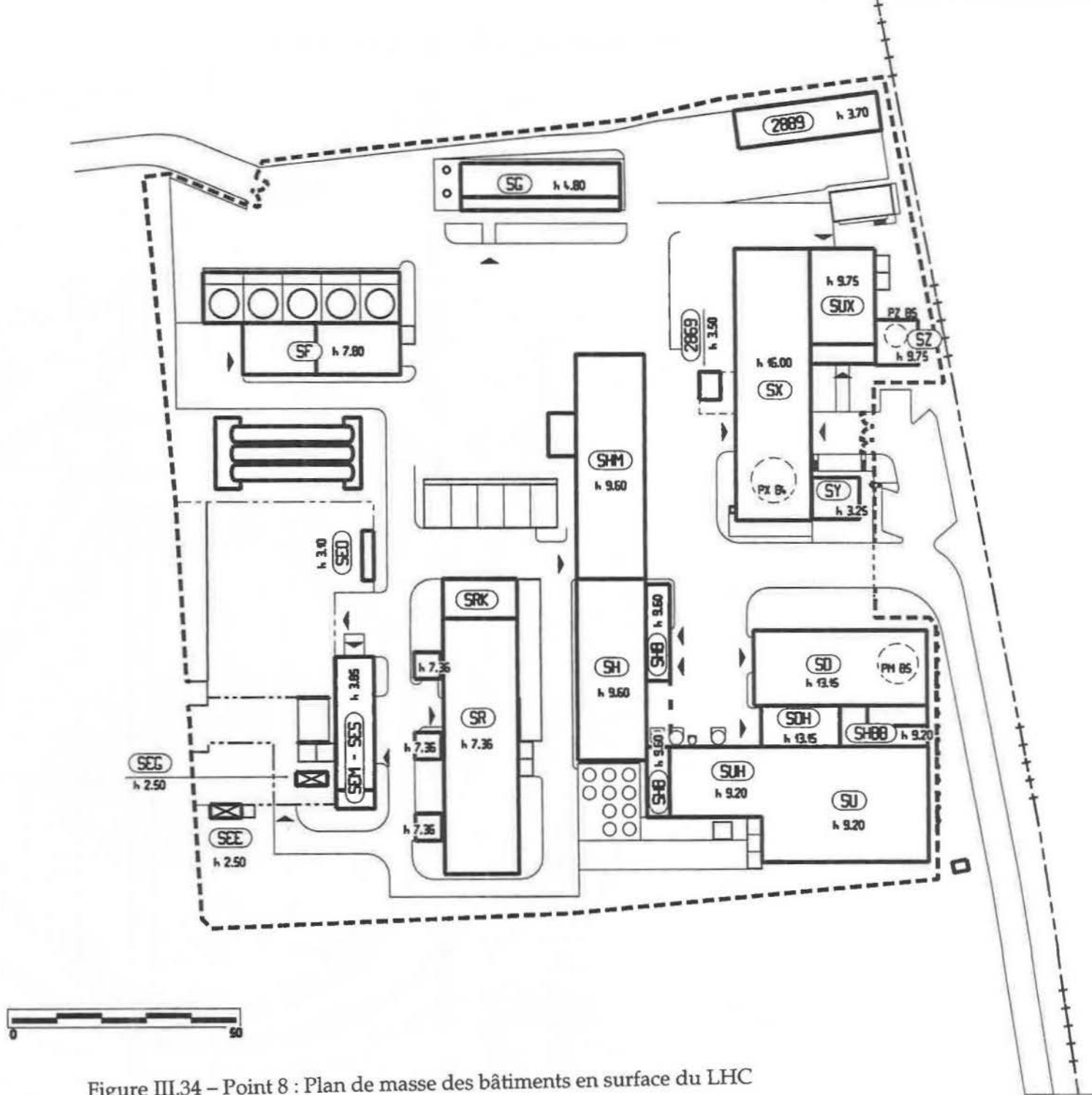
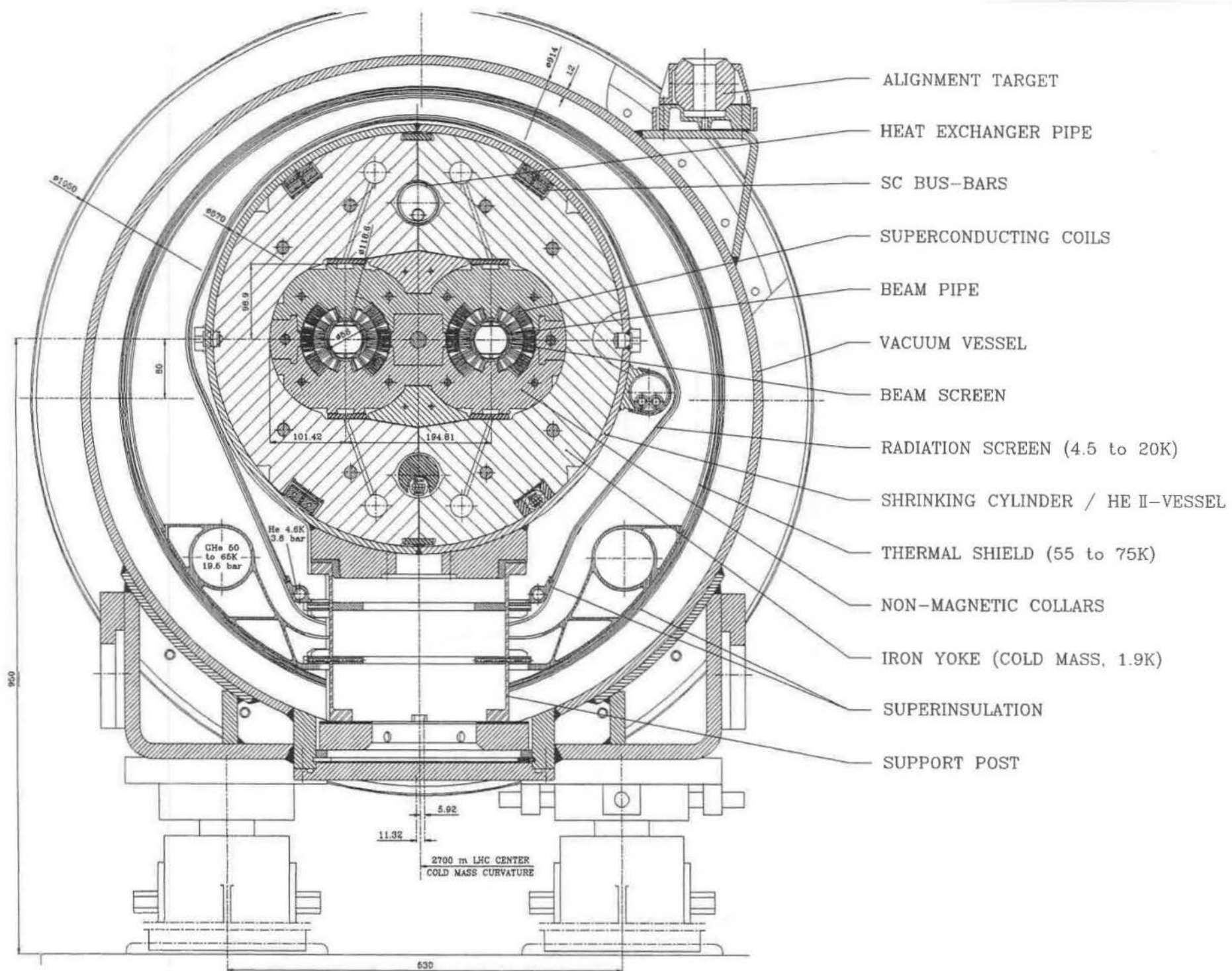


Figure III.34 – Point 8 : Plan de masse des bâtiments en surface du LHC



- ALIGNMENT TARGET
- HEAT EXCHANGER PIPE
- SC BUS-BARS
- SUPERCONDUCTING COILS
- BEAM PIPE
- VACUUM VESSEL
- BEAM SCREEN
- RADIATION SCREEN (4.5 to 20K)
- SHRINKING CYLINDER / HE II-VESSEL
- THERMAL SHIELD (55 to 75K)
- NON-MAGNETIC COLLARS
- IRON YOKE (COLD MASS, 1.9K)
- SUPERINSULATION
- SUPPORT POST

Figure III.35 – Coupe standard d'un dipôle LHC

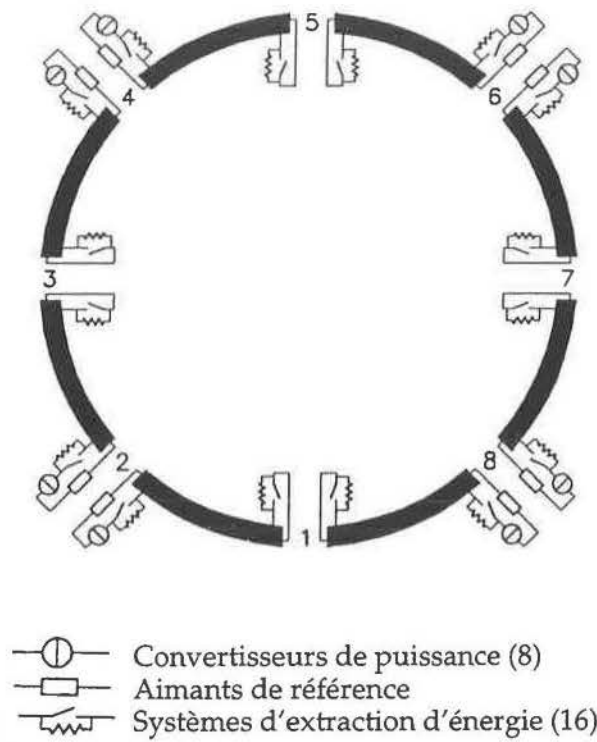


Figure III.36 – Circuits d'alimentation électrique (dipôles)

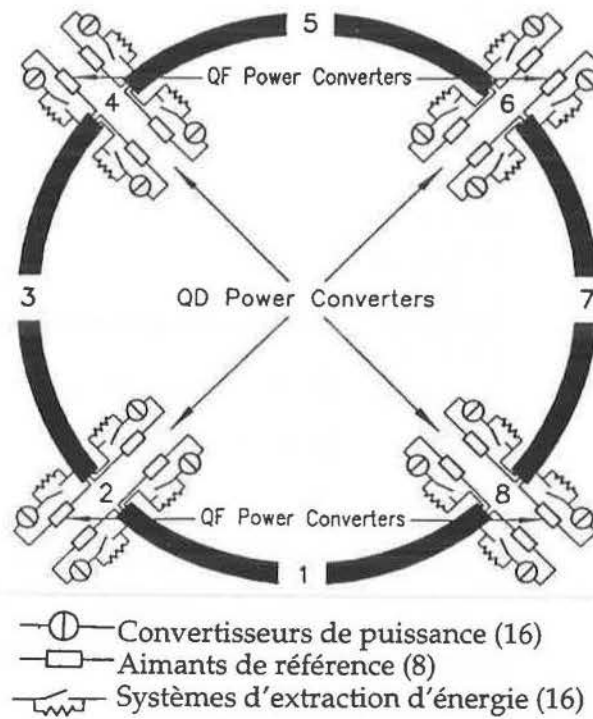
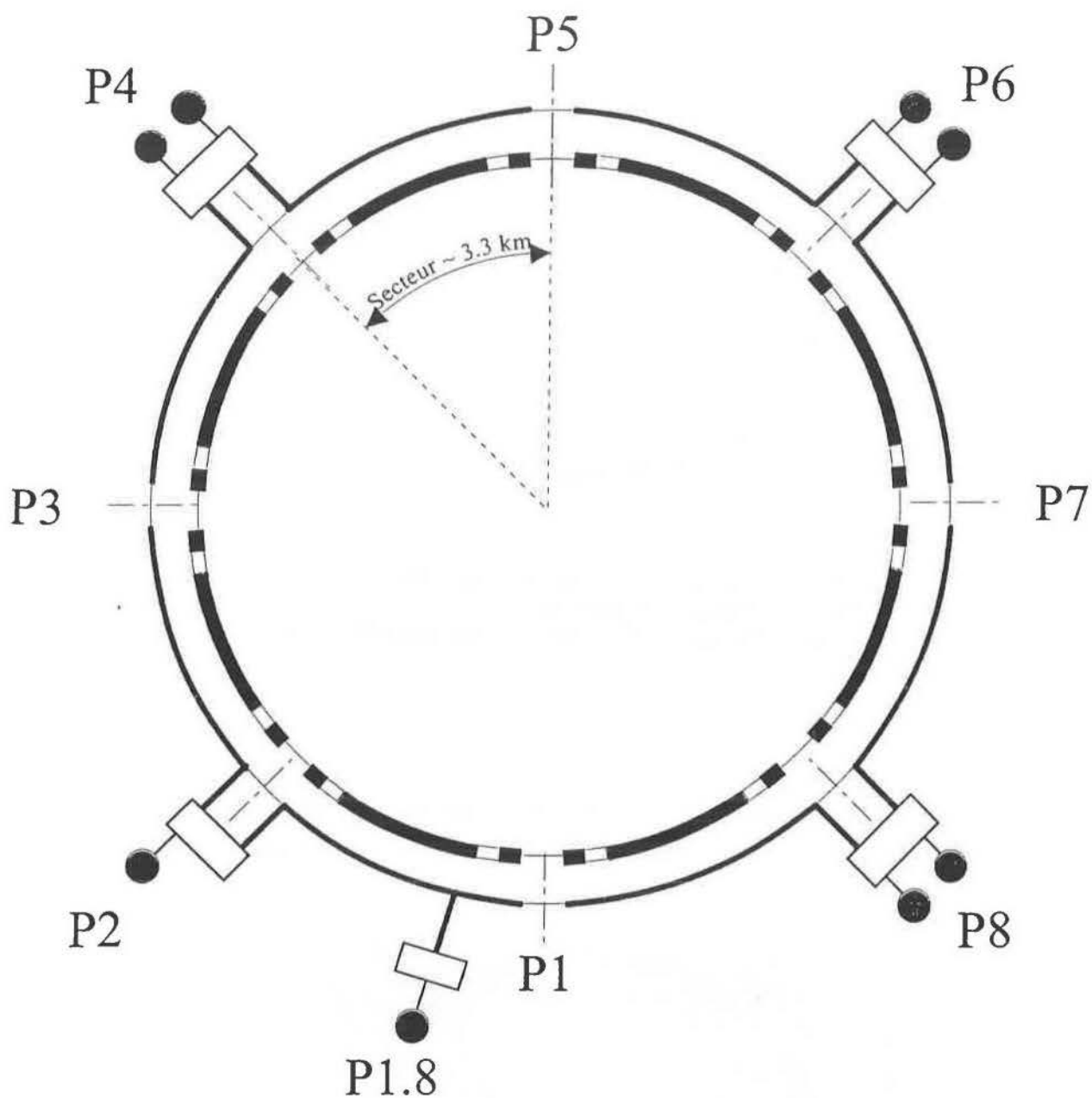


Figure III.37 – Circuits d'alimentation électrique (quadripôles)



Legende:







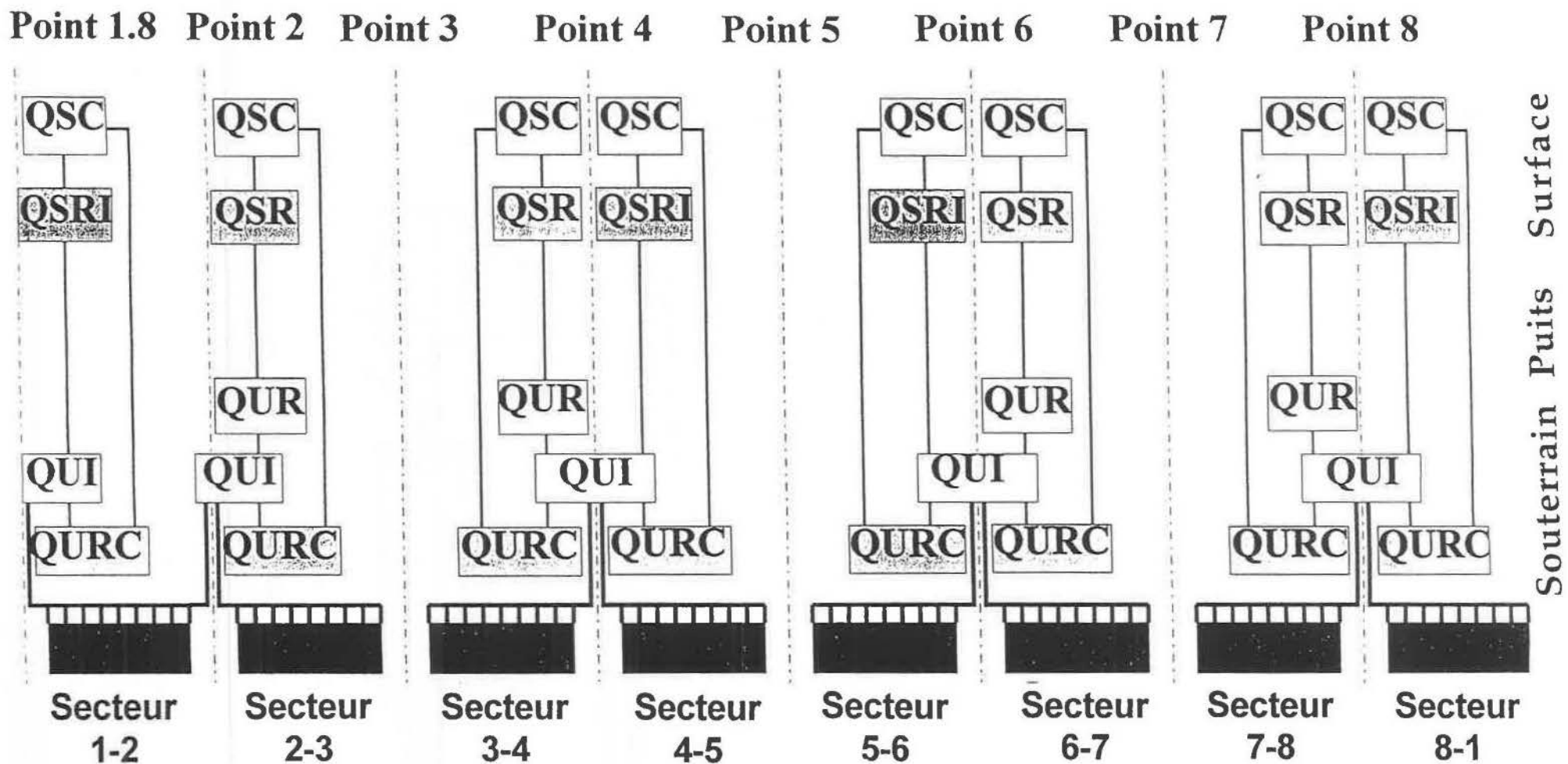
-  Ligne cryogénique de distribution (QRL)
-  Boîte cryogénique d'interconnexion (QUI)
-  Refrigerateur
-  Arc
-  Suppresseur de Dispersion
-  Section droite longue

Figure III.38 – Schéma d'alimentation en fluide cryogénique



Légende

Ligne de distribution cryogénique



QSC: Compresseur (s) d'hélium

QSR: Boîte froide supérieure

QSRI: Boîte froide intégrée

QUR: Boîte froide inférieure

QURC: Boîte froide compresseur

QUI: Boîte d'interconnexion

Figure III.39 – Architecture du système cryogénique

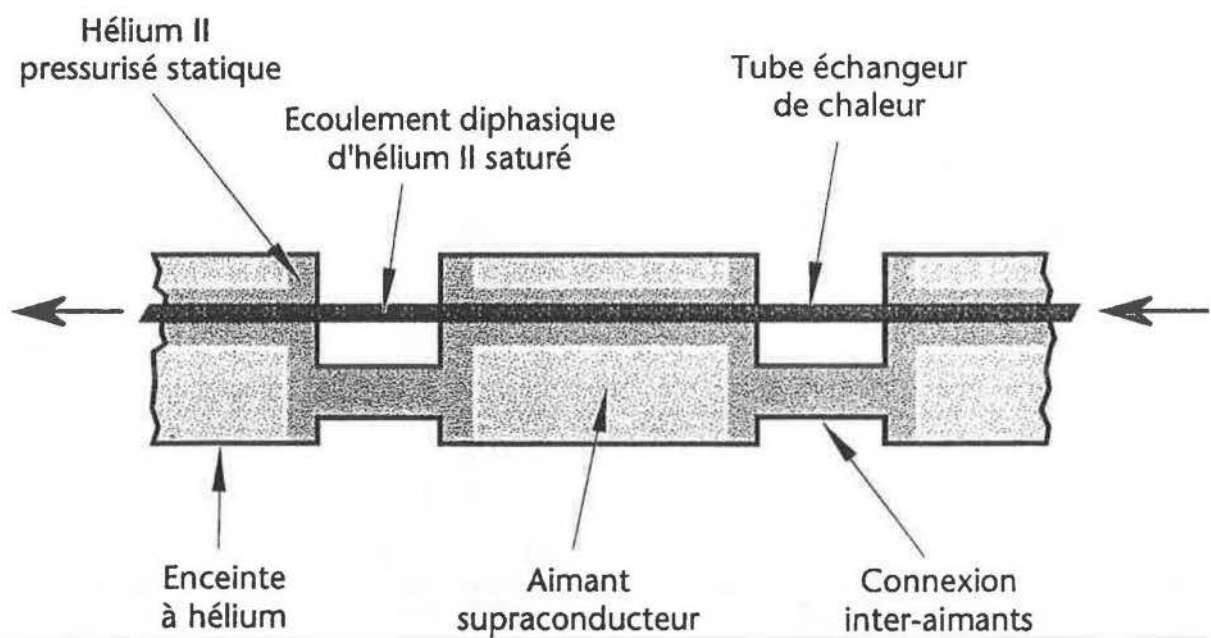


Figure III.40 – Schéma de principe pour le refroidissement des cryoaimants

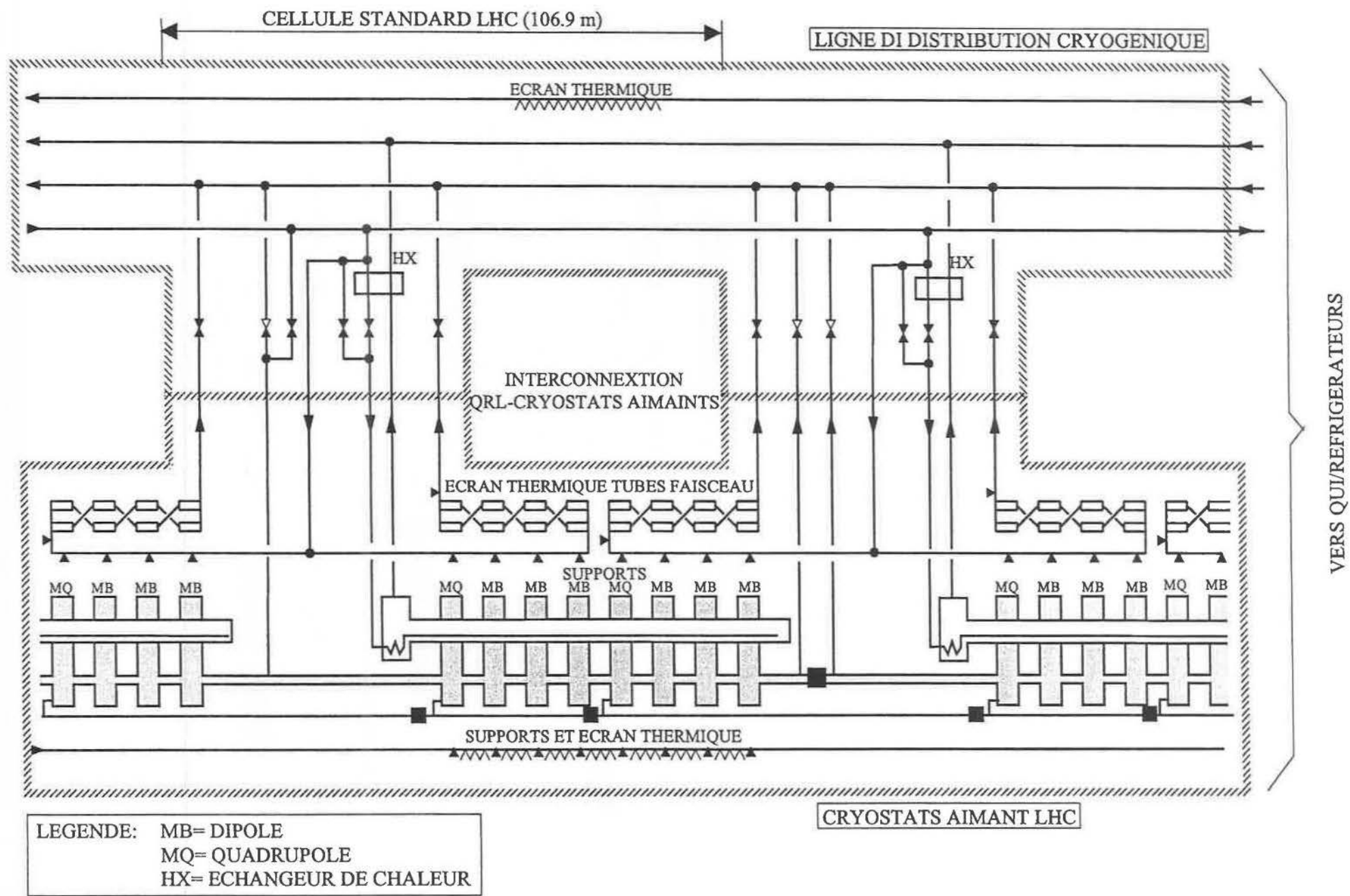


Figure III.41 – Schéma de refroidissement d'une cellule standard du LHC

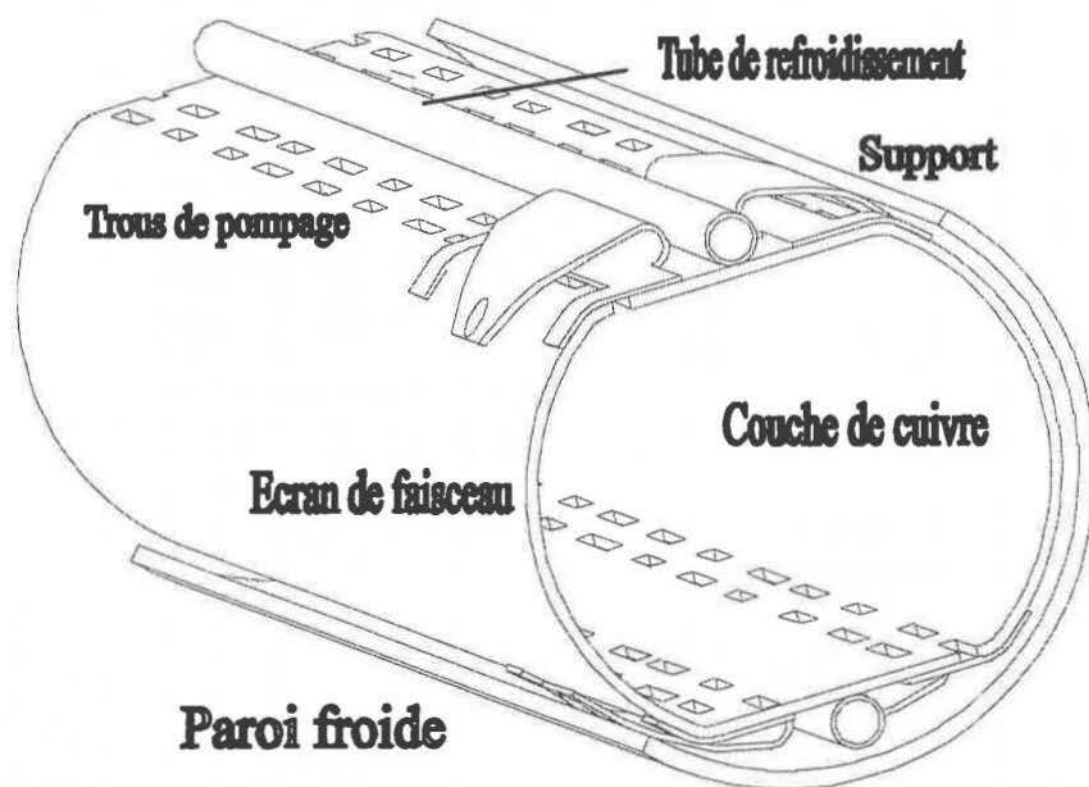


Figure III.42 – Ecran de faisceau à l'intérieur de la chambre à vide faisant office de paroi interne de l'aimant

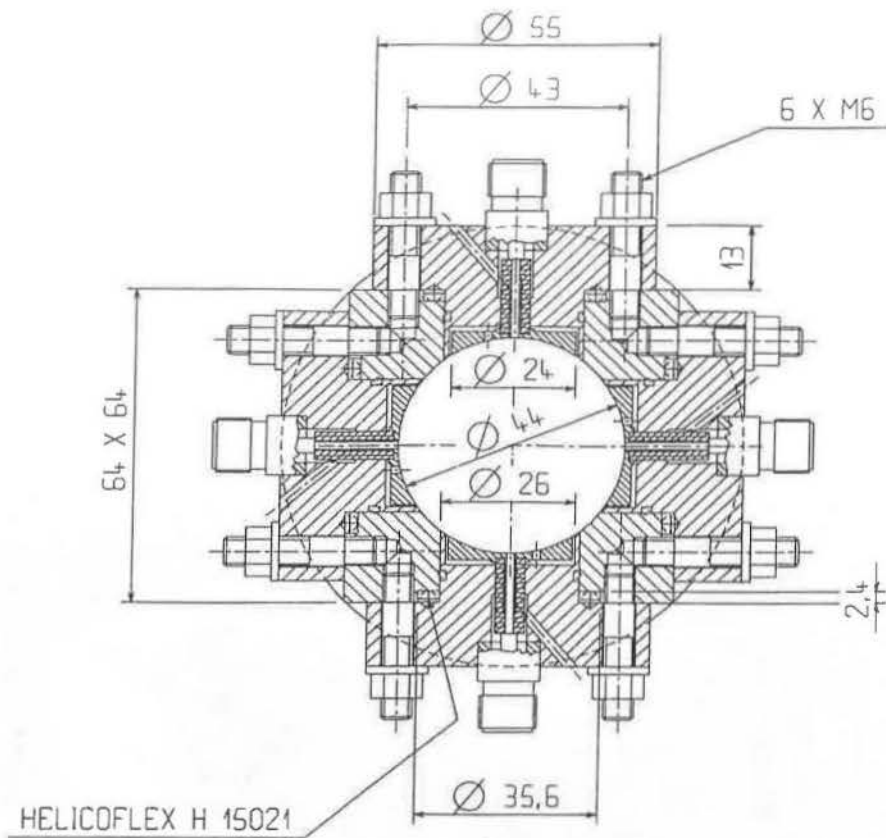


Figure III.43 – Coupe d'un moniteur de position du LHC montrant les quatre électrodes à bouton

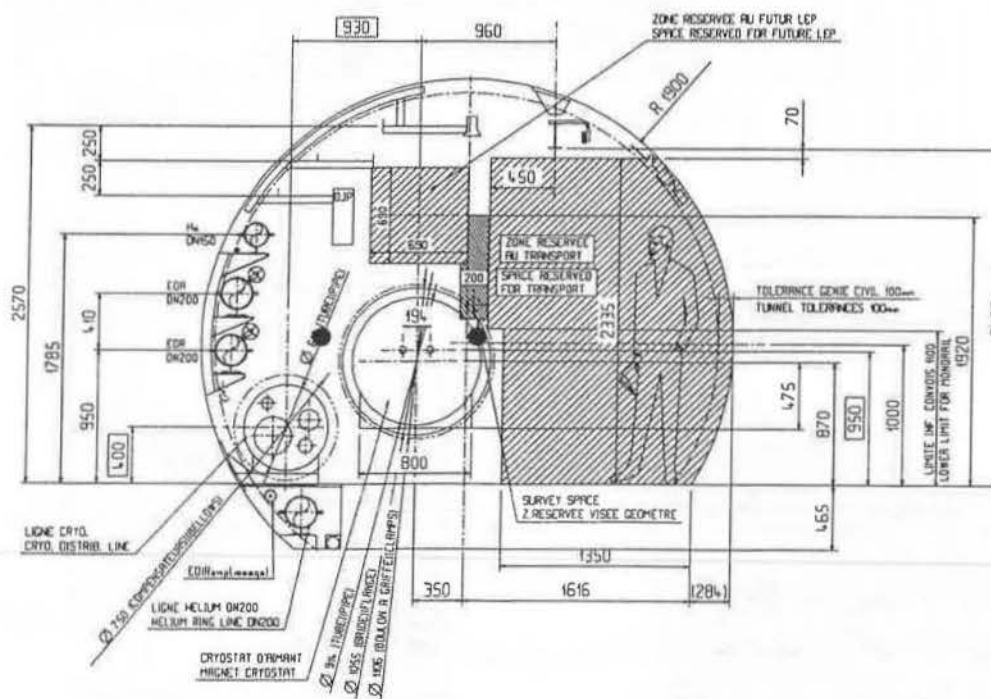


Figure III.44 – Position radiale des détecteurs de perte selon le cryostat

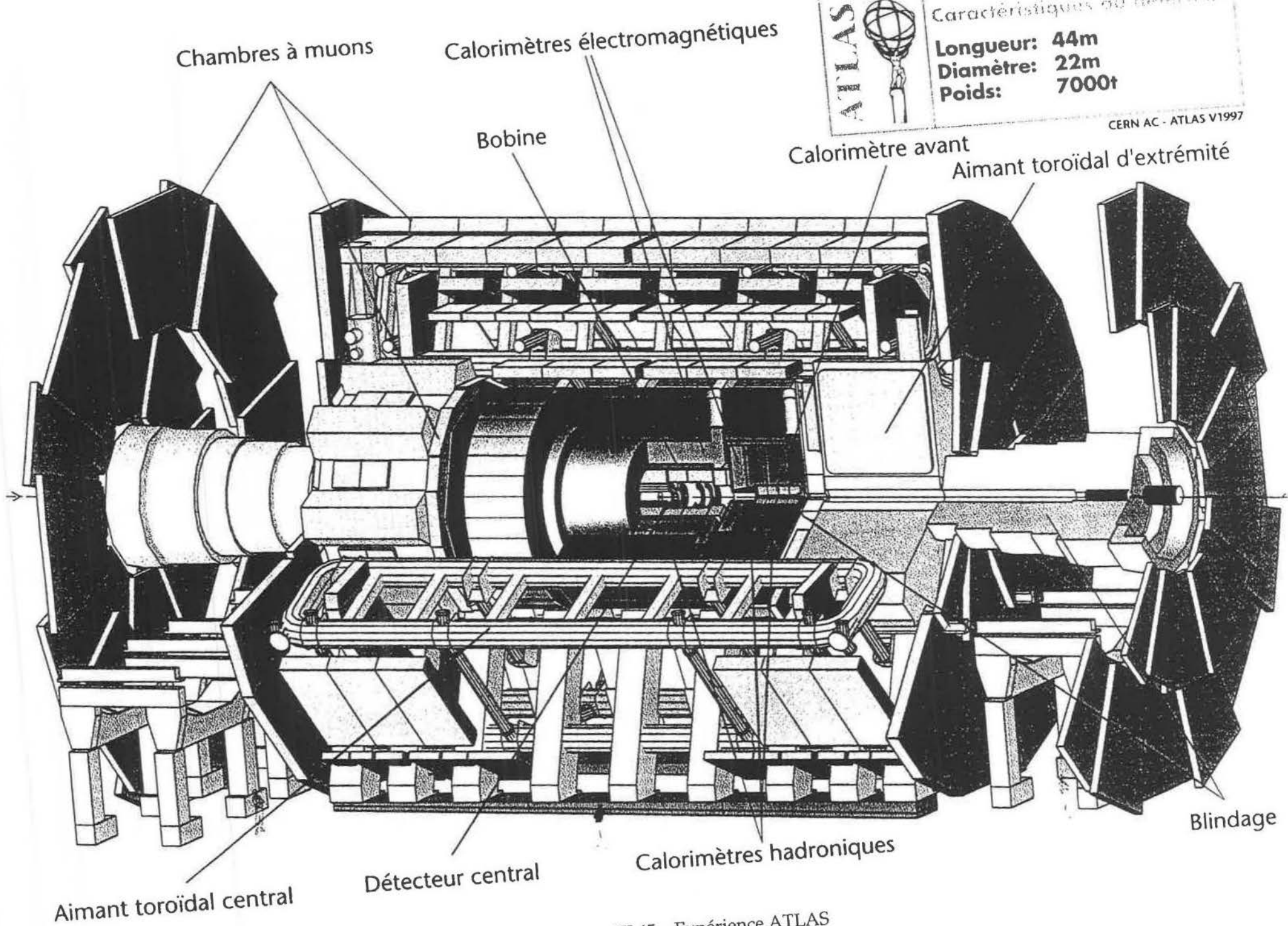


Figure III.45 – Expérience ATLAS

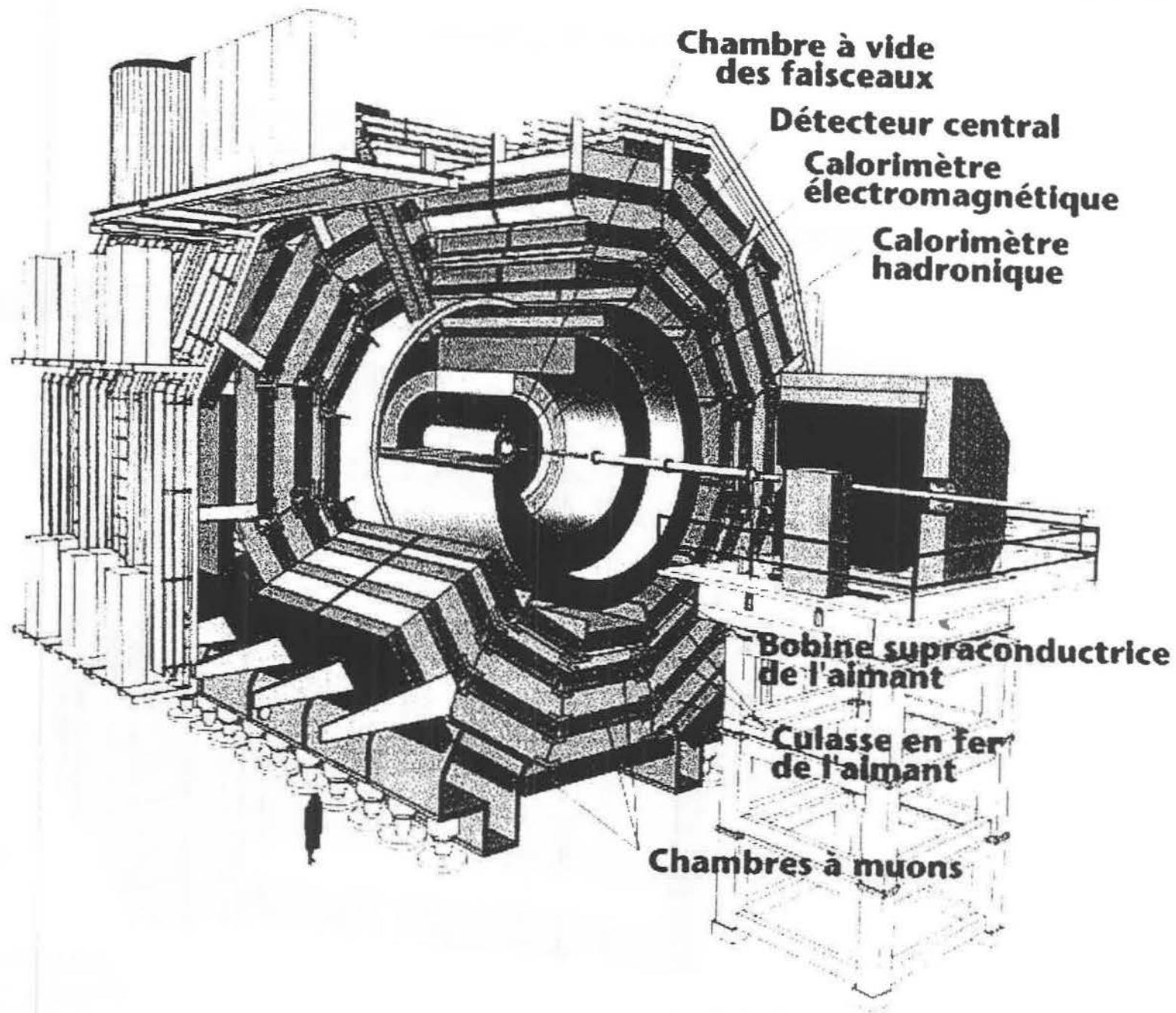


Figure III.46 – Expérience CMS

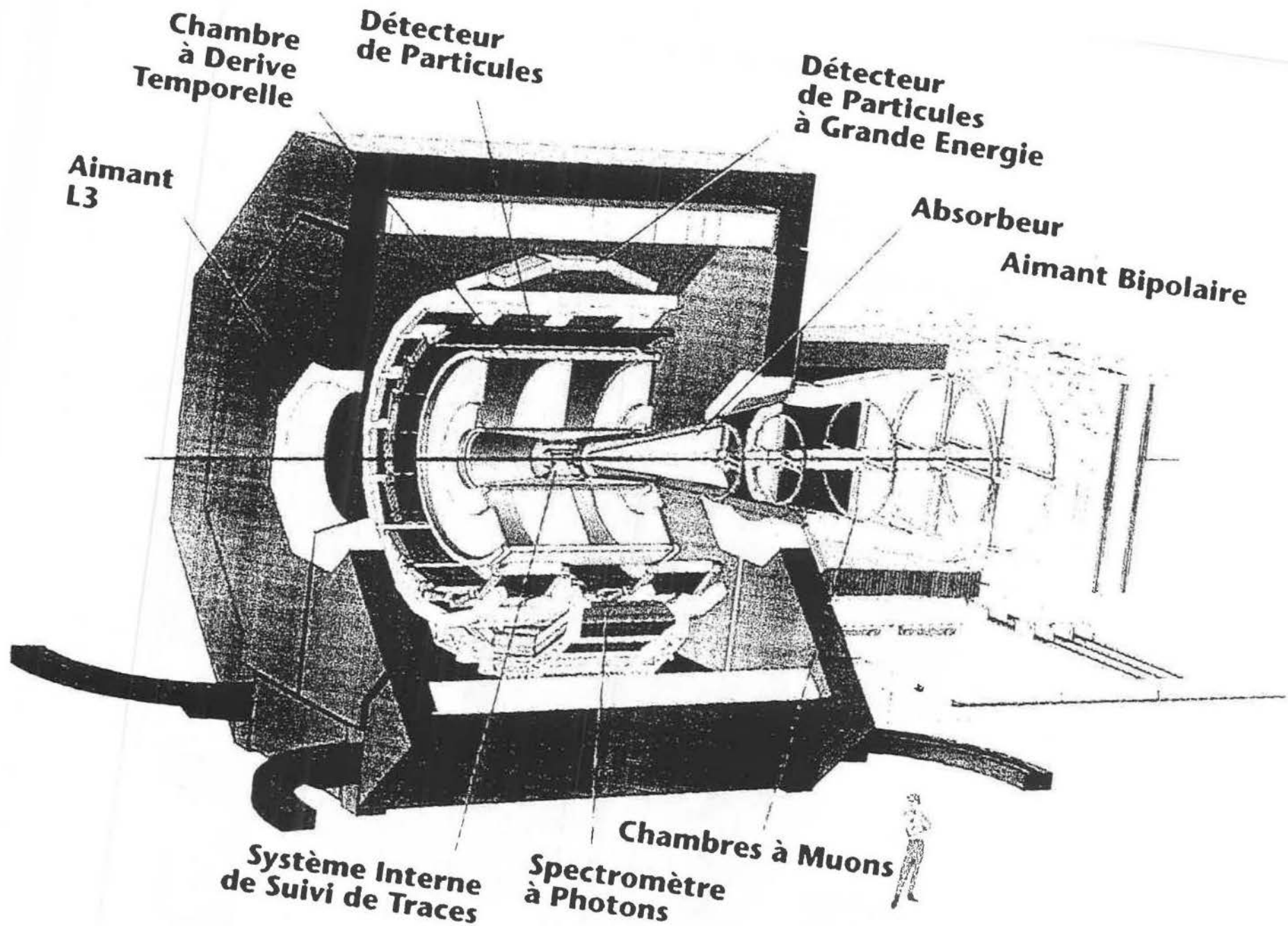


Figure III.47 – Expérience ALICE

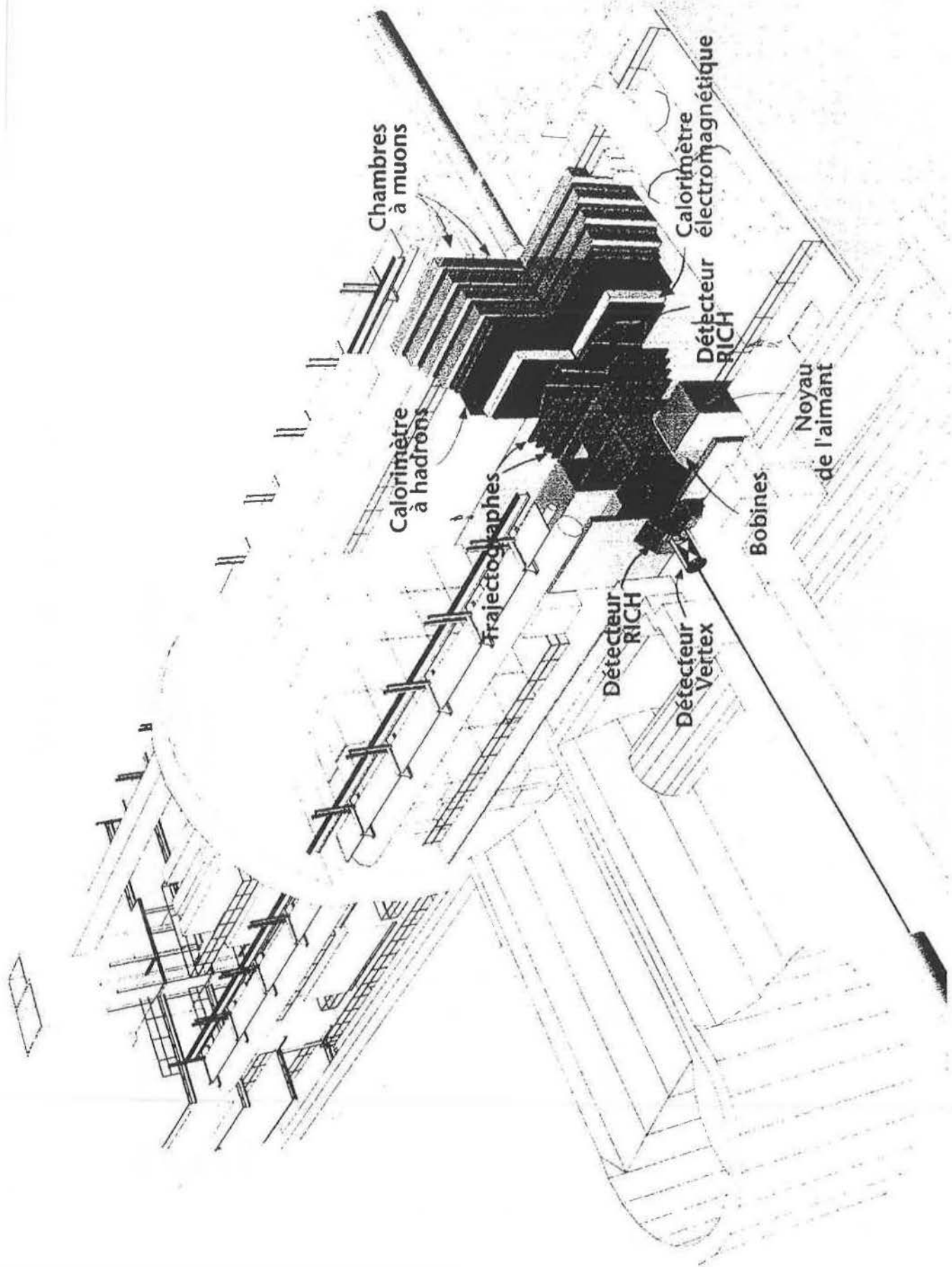
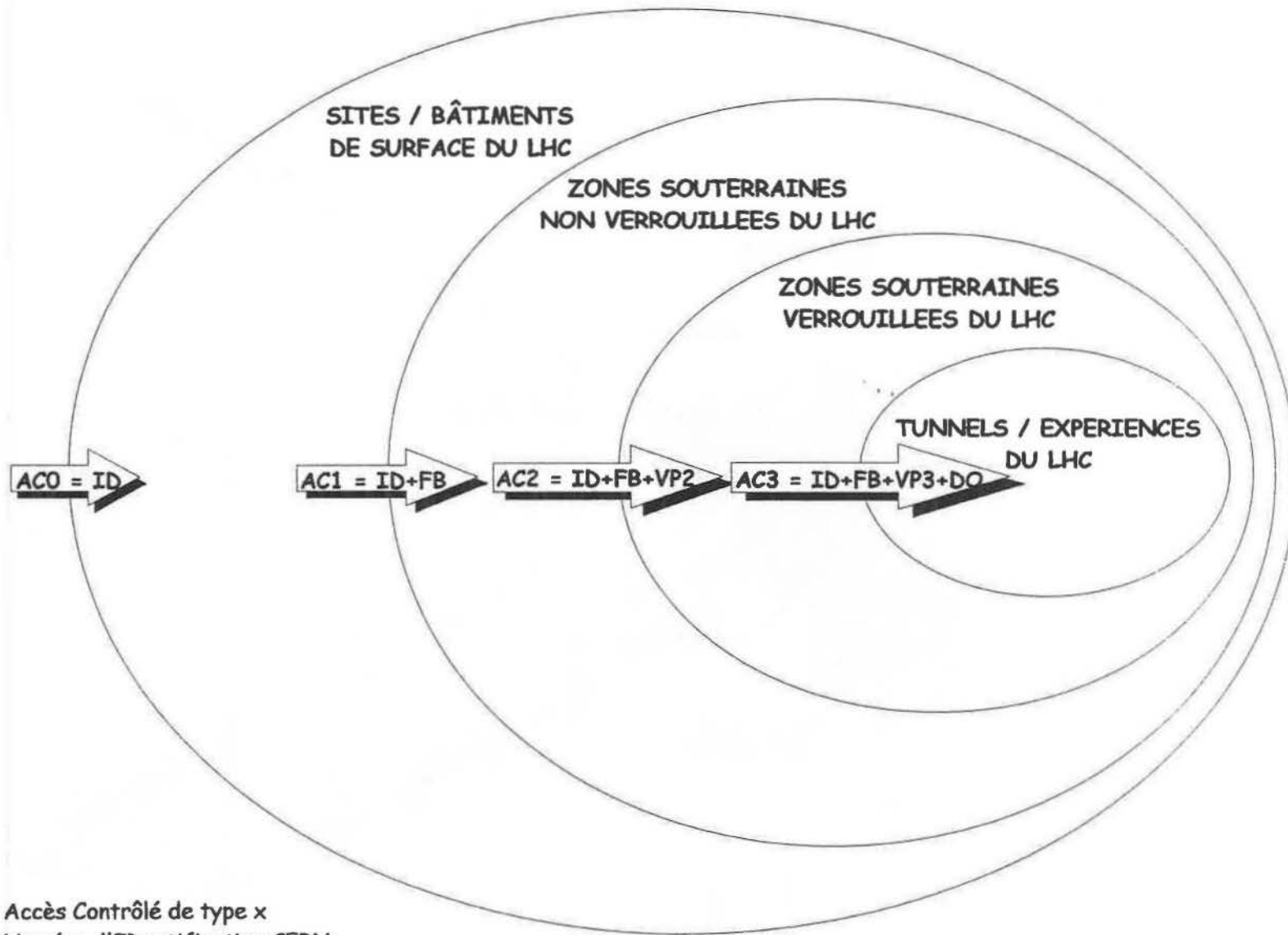


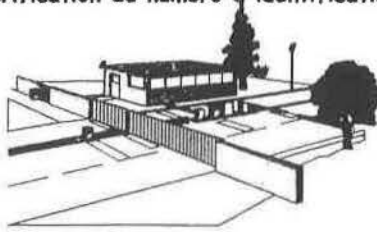
Figure III.48 – Expérience LHC-B



- ACx : Accès Contrôlé de type x
- ID : Numéro d'IDentification CERN
- FB : Film-Badge (Equipement de Radioprotection)
- VPx : Verrouillage Personnel de la machine associé aux ACx
- DO : Dosimètre Opérationnel (en fonction des types de risques)

Figure III.49 – Concept d'accès au LHC

ACCÈS CONTRÔLÉ DE TYPE 0 - AC0 - : Accès aux sites et bâtiments du CERN.
 - ID : Vérification du numéro d'identification CERN.

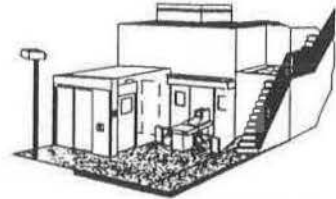


Ilot Routier



Ilot Bâtiment

ACCÈS CONTRÔLÉ DE TYPE 1 - AC1 - : Accès aux zones souterraines non verrouillées du LHC.
 - ID : Vérification du numéro d'identification CERN.
 - FB : Vérification de la détention du Film-Badge.

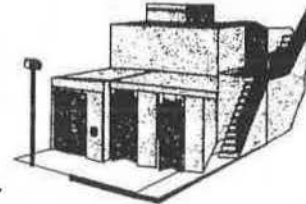


Ilot Tête-de-puits avec tourniquets horizontaux

ACCÈS CONTRÔLÉ DE TYPE 2 - AC2 - : Accès aux zones souterraines verrouillées du LHC.
 - ID : Vérification du numéro d'identification CERN.
 - FB : Vérification de la détention du Film-Badge.
 - VP2 : Délivrance d'un équipement de verrouillage personnel associé à AC2.

(AC2/3 : DO disponible)

- VP3 : Délivrance d'un équipement de verrouillage personnel associé à AC3.
 - DO : Vérification de la détention d'un équipement de Dosimétrie Opérationnelle.

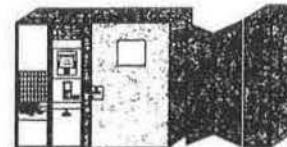


Ilot Tête-de-puits avec tourniquets verticaux

ACCÈS CONTRÔLÉ DE TYPE 3 - AC3 - : Accès aux tunnels et aux expériences du LHC (accès dédié au Personnel).

Accès contrôlé de type 3 - principal - AC3p -

- ID : Vérification du numéro d'identification CERN.
 - FB : Vérification de la détention du Film-Badge.
 - VP3 : Délivrance d'un équipement de verrouillage personnel associé à AC3.
 - DO : Vérification de la détention d'un équipement de Dosimétrie Opérationnelle.



Point d'Accès LHC

Accès contrôlé de type 3 - secondaire - AC3s -

- Activation de l'équipement d'accès au moyen de VP3 uniquement.



Grille de secteur

ACCÈS CONTRÔLÉ DE TYPE 4 - AC4 - : Accès aux tunnels et aux expériences du LHC (accès dédié au Matériel).

- Barrière physique appartenant au système de verrouillage de la machine (ex. passage de câbles).



Figure III.50 – Catégories "d'Accès contrôlé"

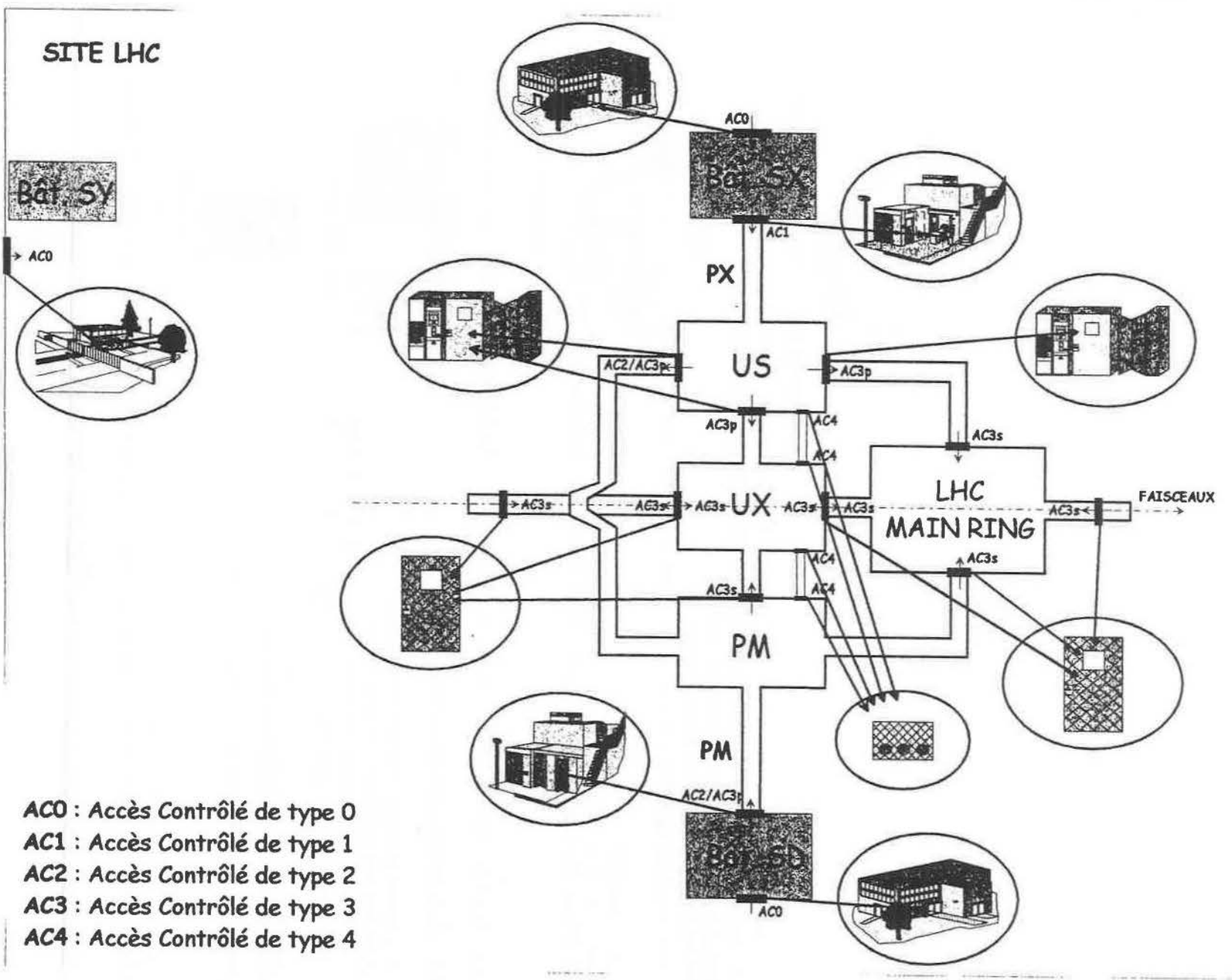


Figure III.51 – Principe d’implantation des “Systèmes d’accès contrôlé”

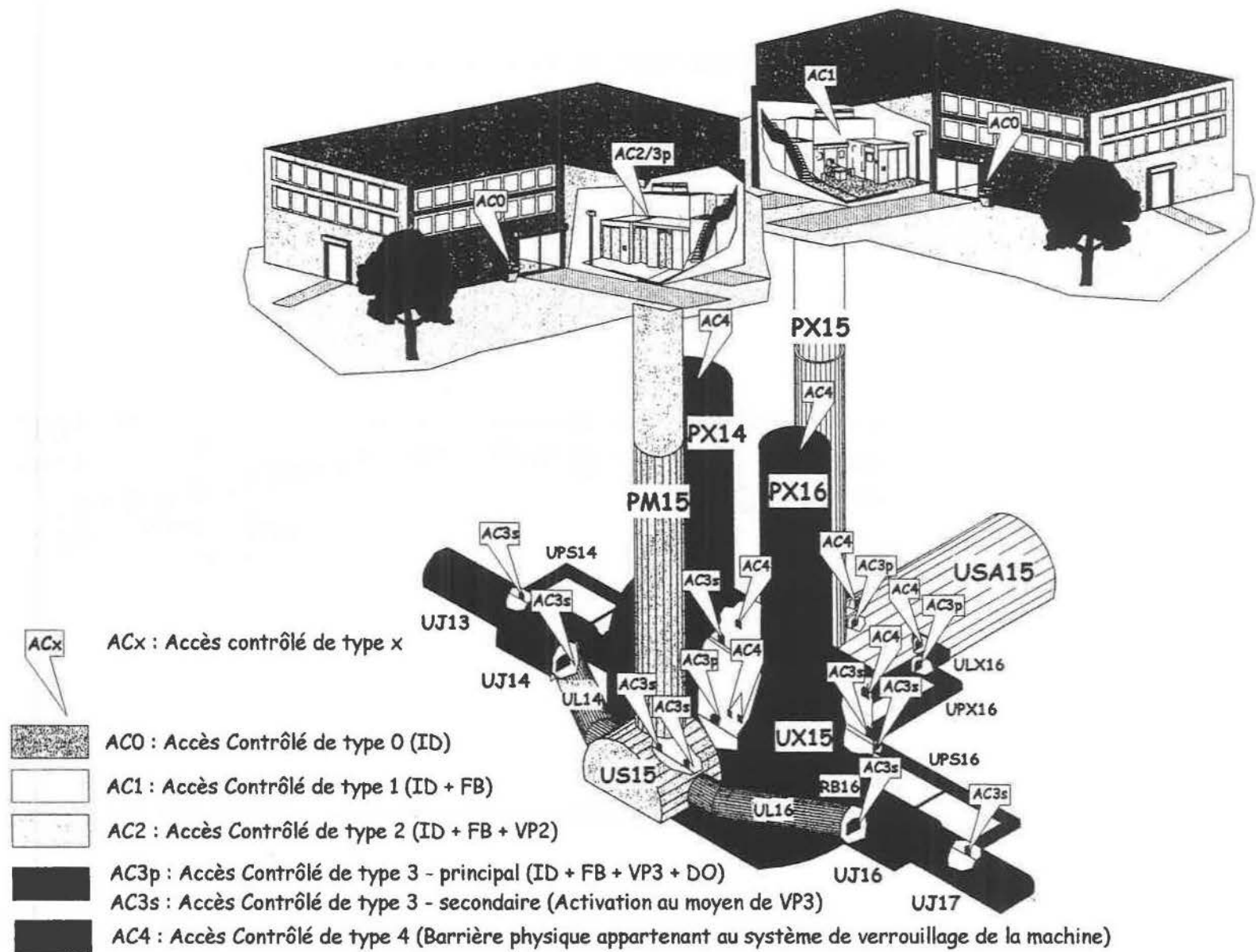


Figure III.52 – Concept et principe d’implantation appliqués au LHC

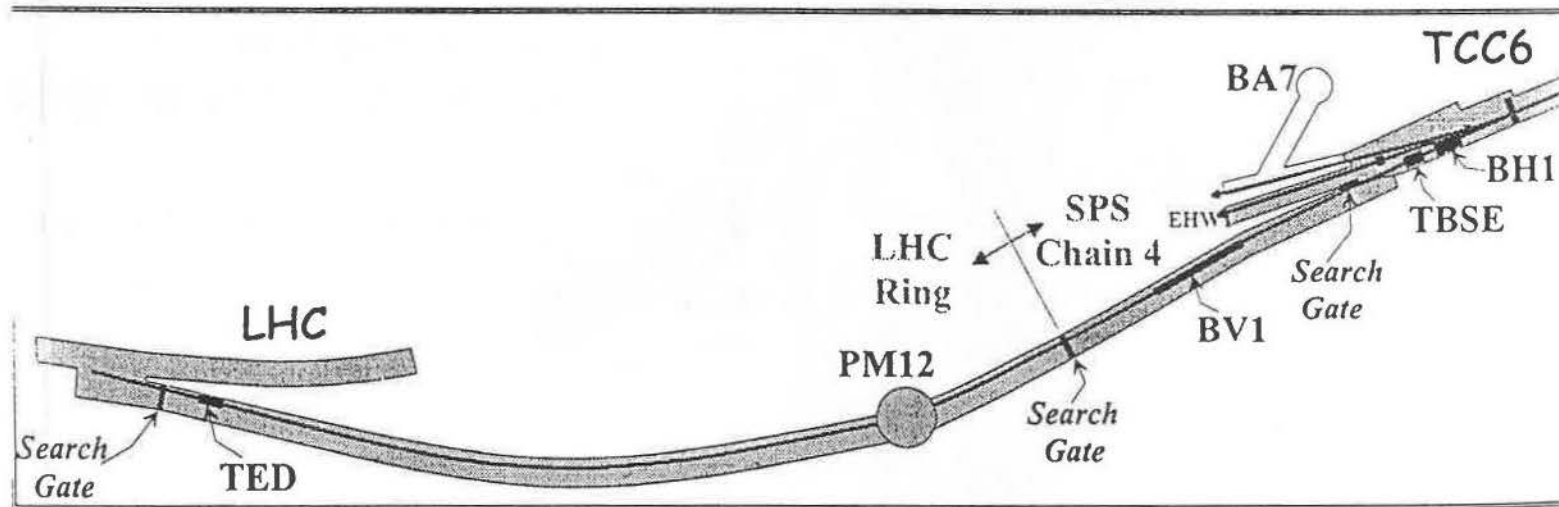


Figure III.53 – Eléments importants pour la sécurité (EIS) TI2

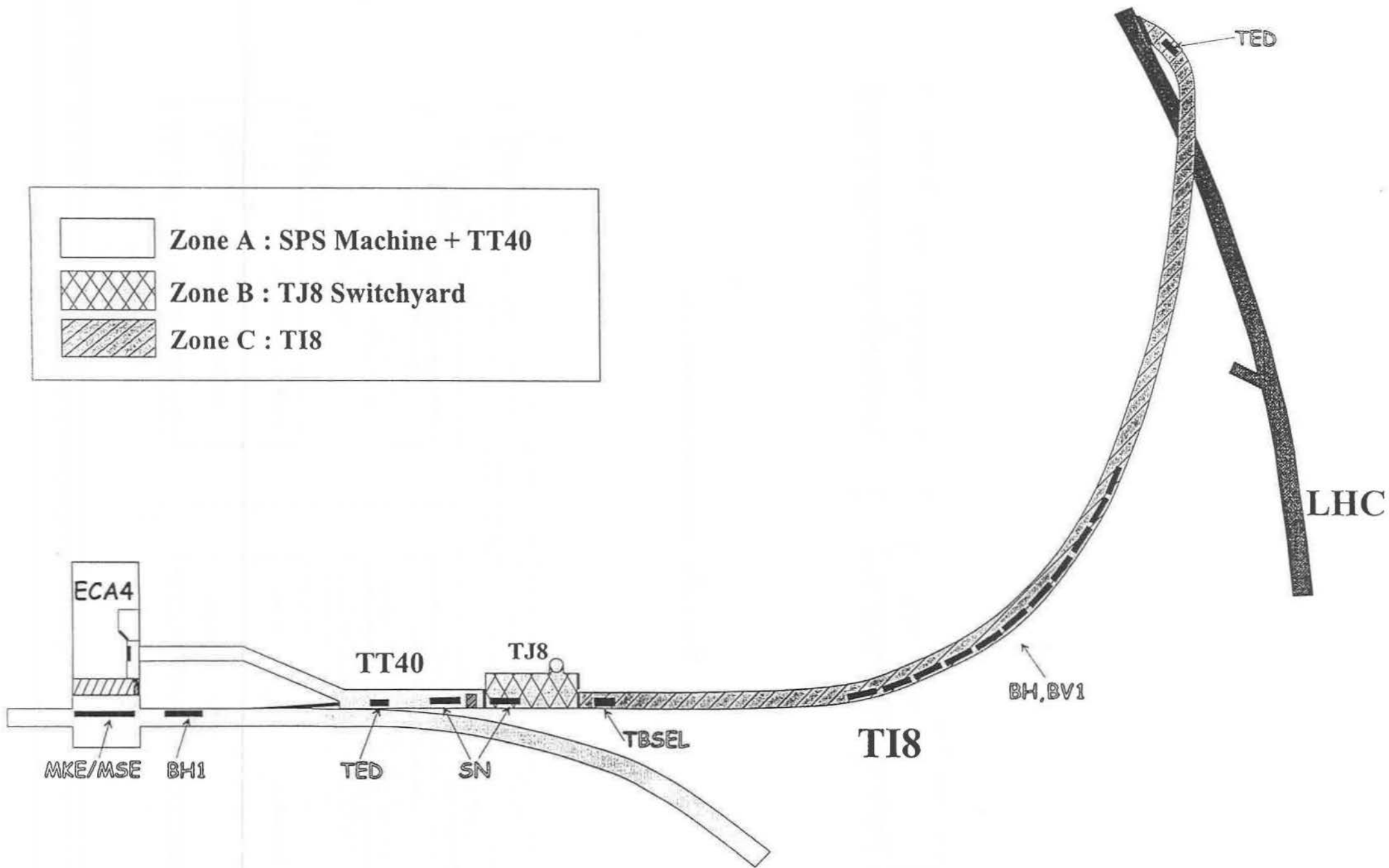
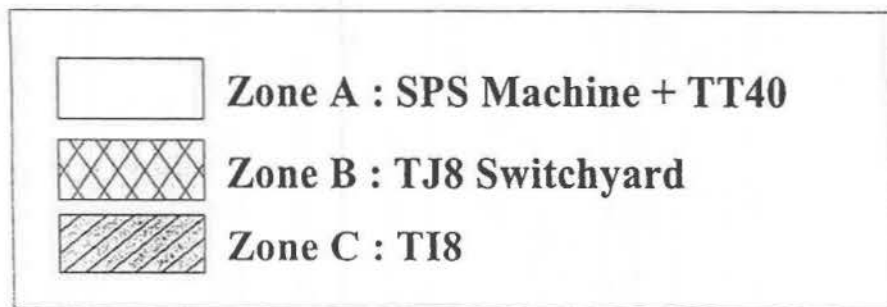


Figure III.54 - Eléments importants pour la sécurité (EIS) TI8

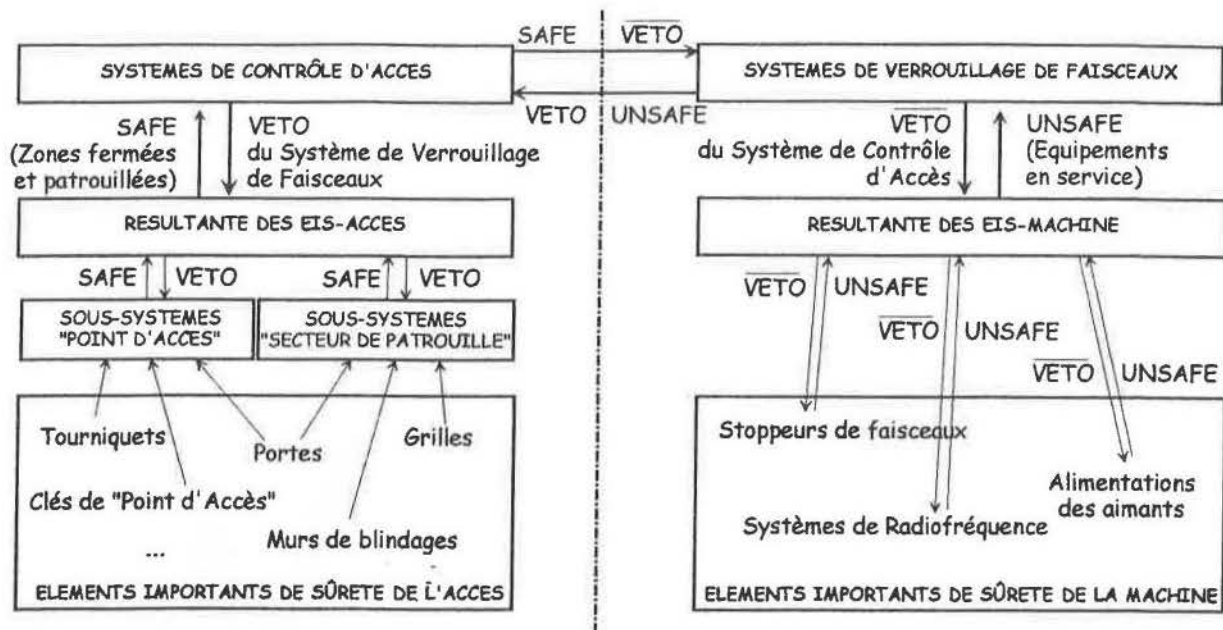


Figure III.55 – Exploitation en mode d'accès

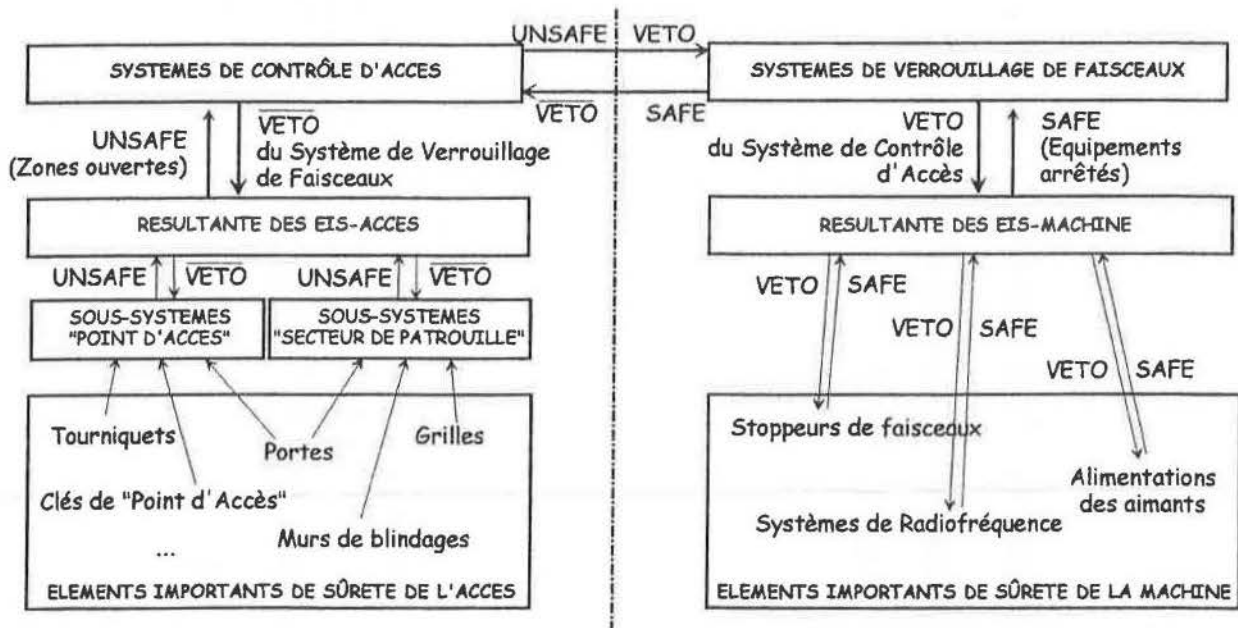


Figure III.56 – Exploitation en mode d'accès

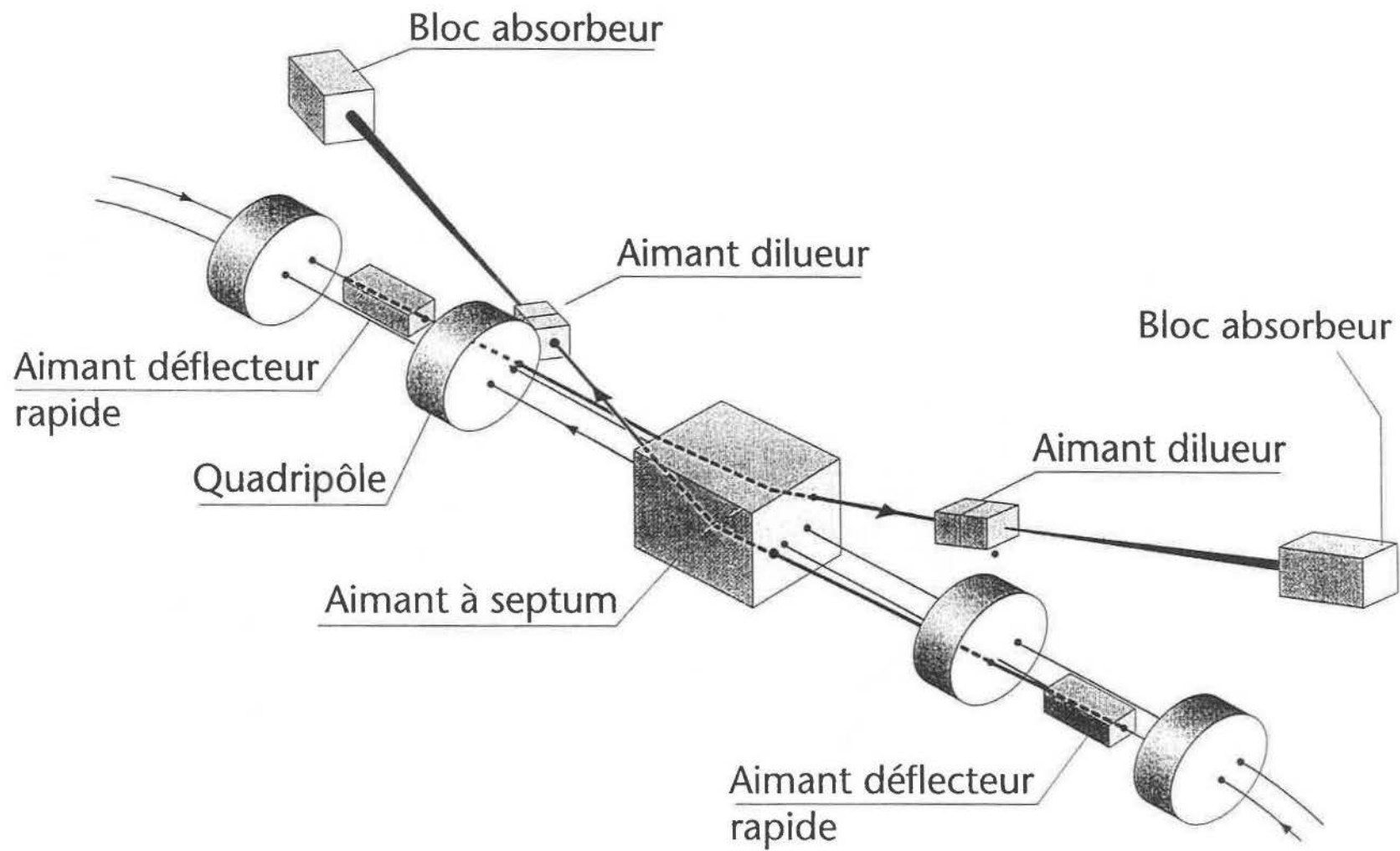


Figure III.57 – Configuration du système d'arrêt de faisceau

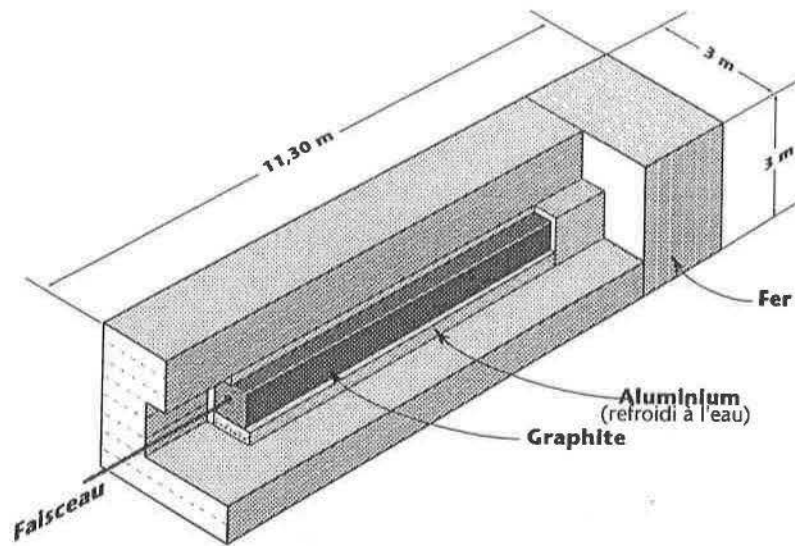


Figure III.58 – Principe de construction des blocs absorbeurs

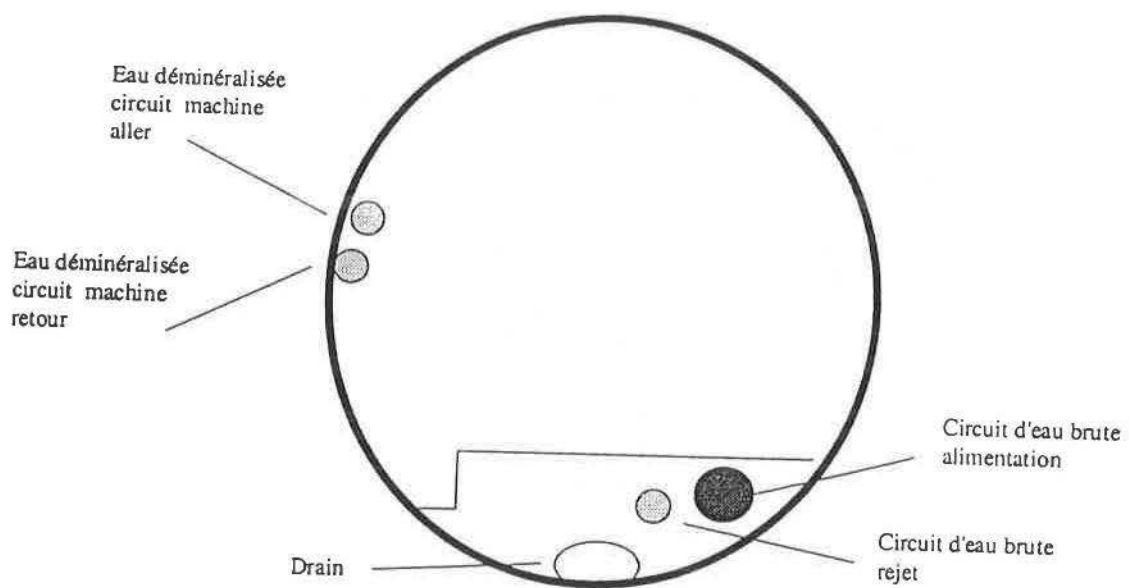


Figure III.59 – Coupe du tunnel LHC avec la position des différents circuits d'eau

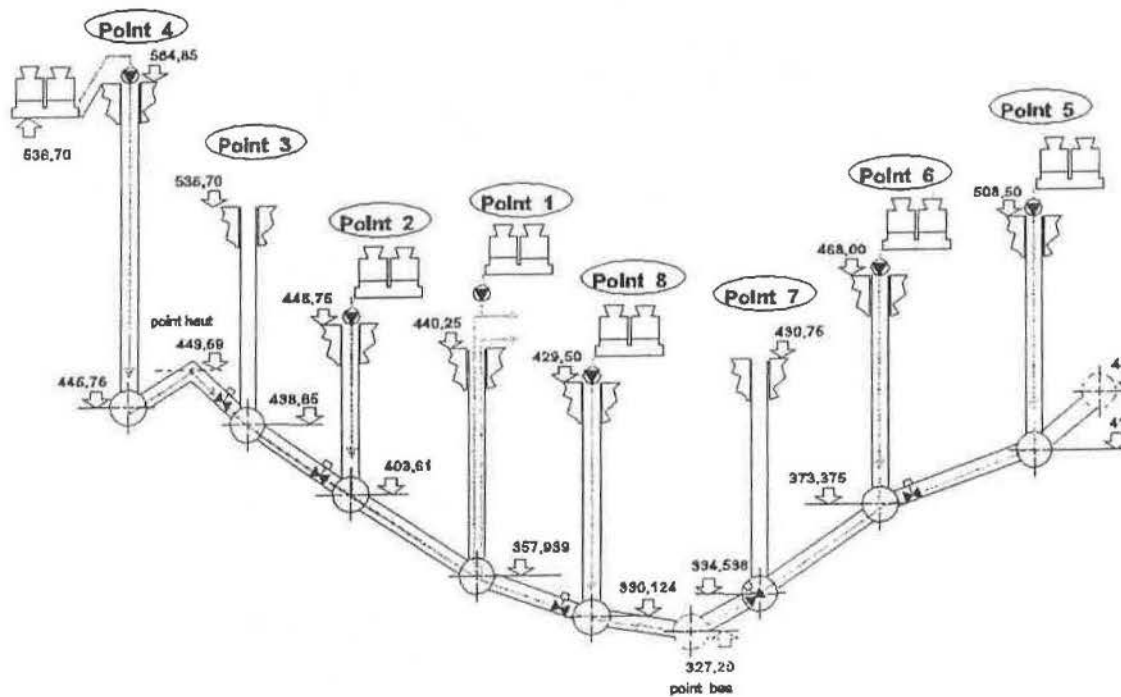


Figure III.60 – Circuits de rejet d'eau brute

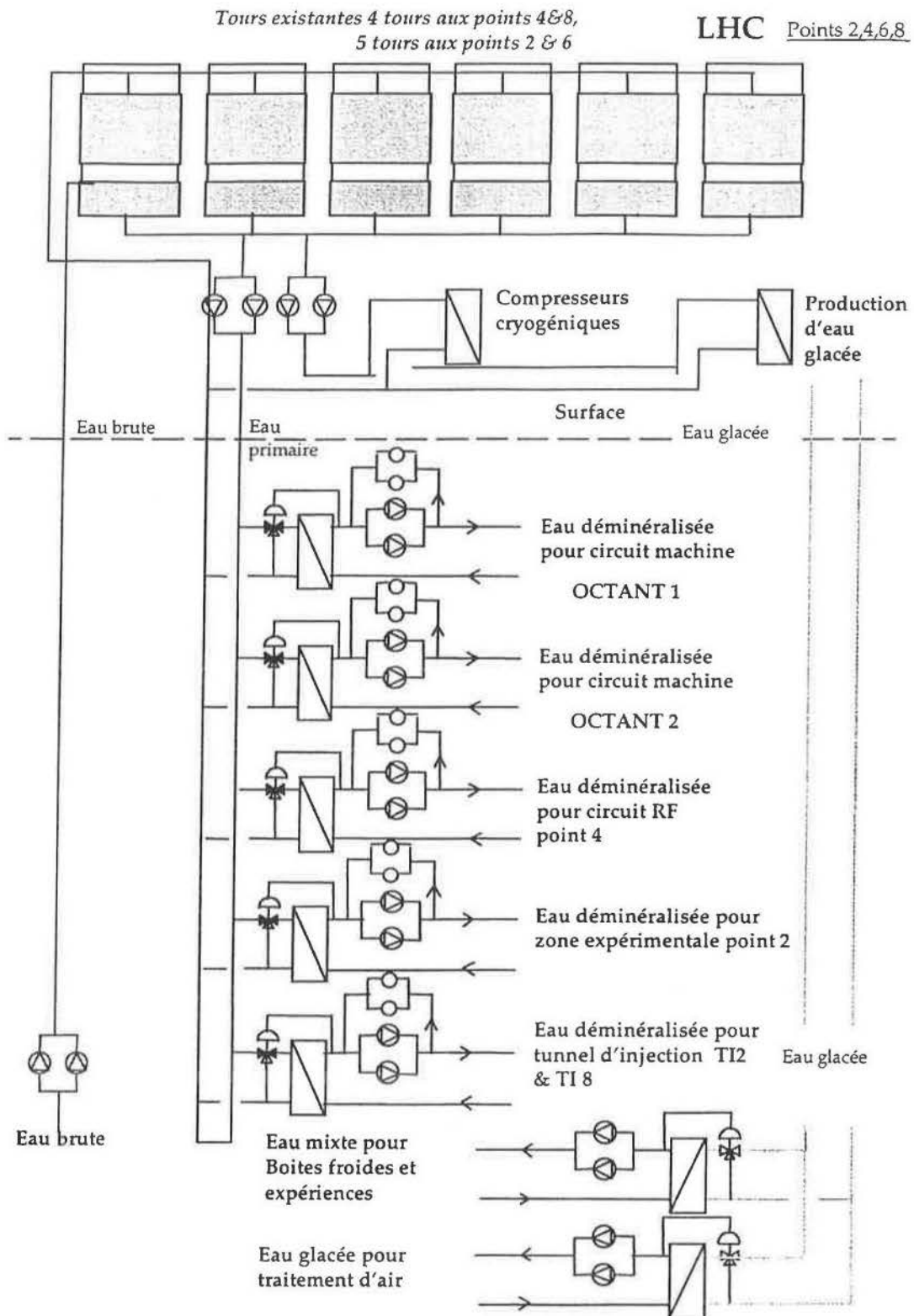


Figure III.61 – Schéma de principe des différents circuits d'eau

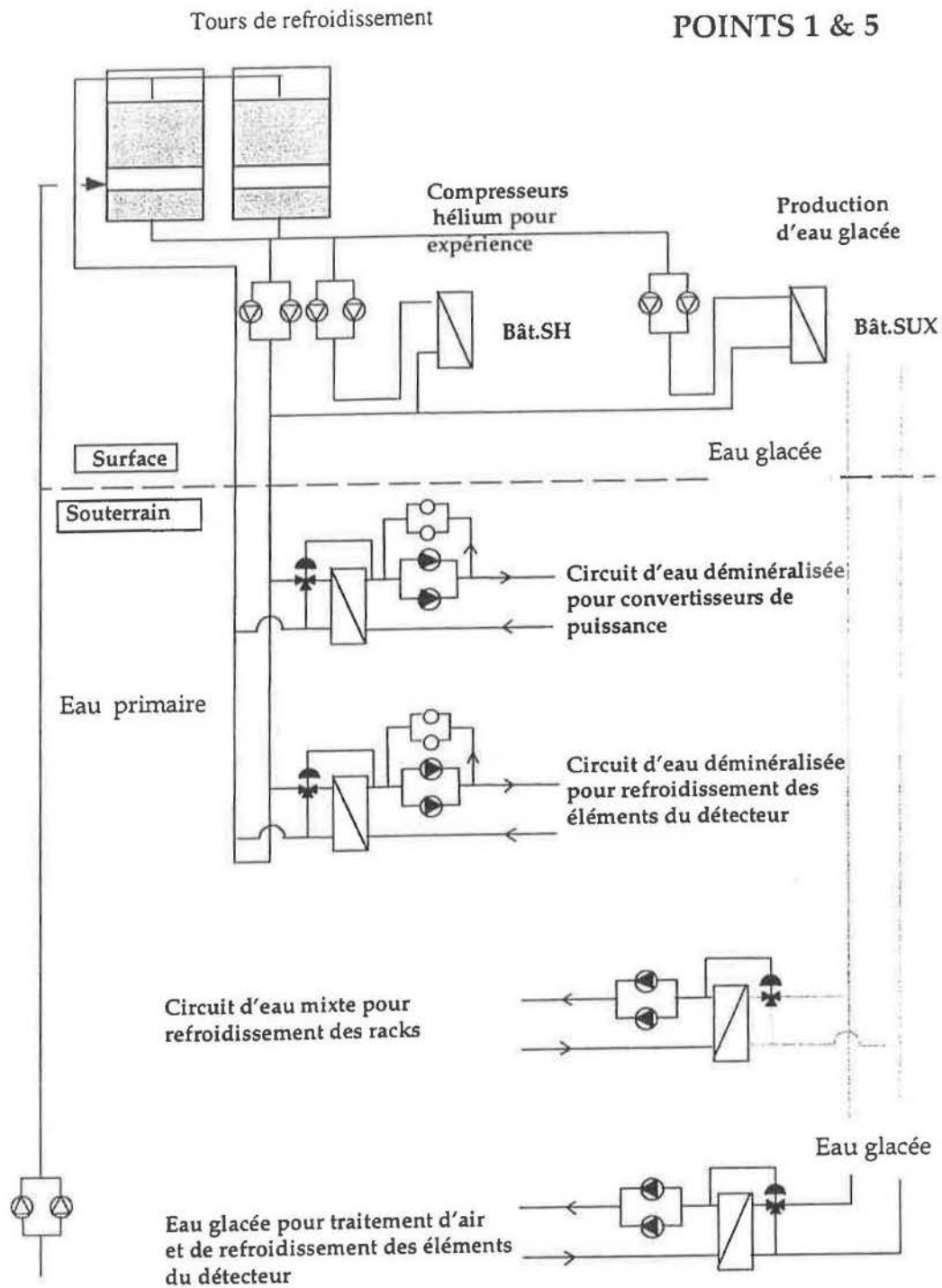


Figure III.62 – Schéma de principe de distribution d'eau pour les zones d'expérience aux points 1 et 5

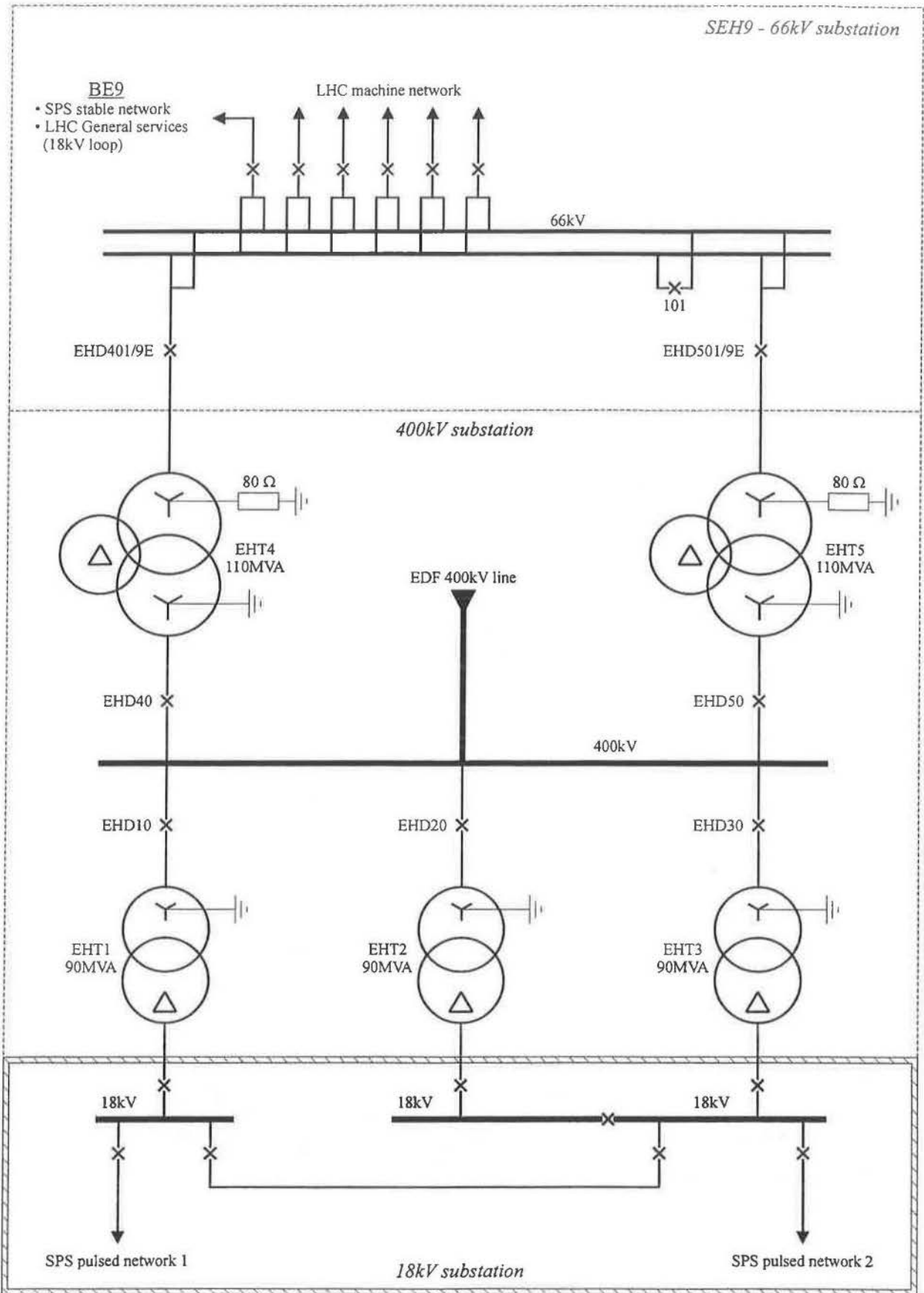


Figure III.63 – Sous-station principale 400kV/66kV

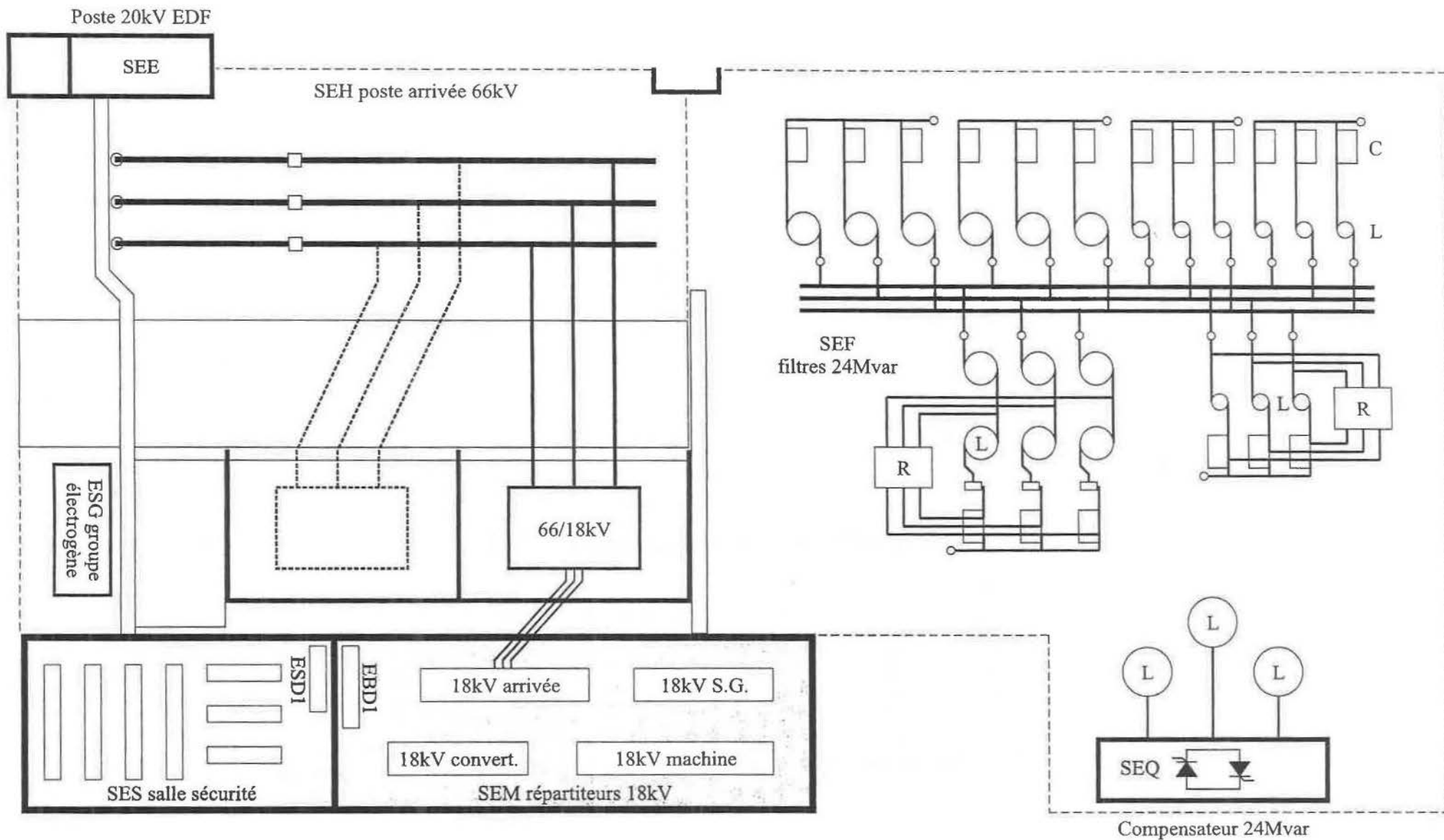


Figure III.64 – Sous-station typique des points pairs

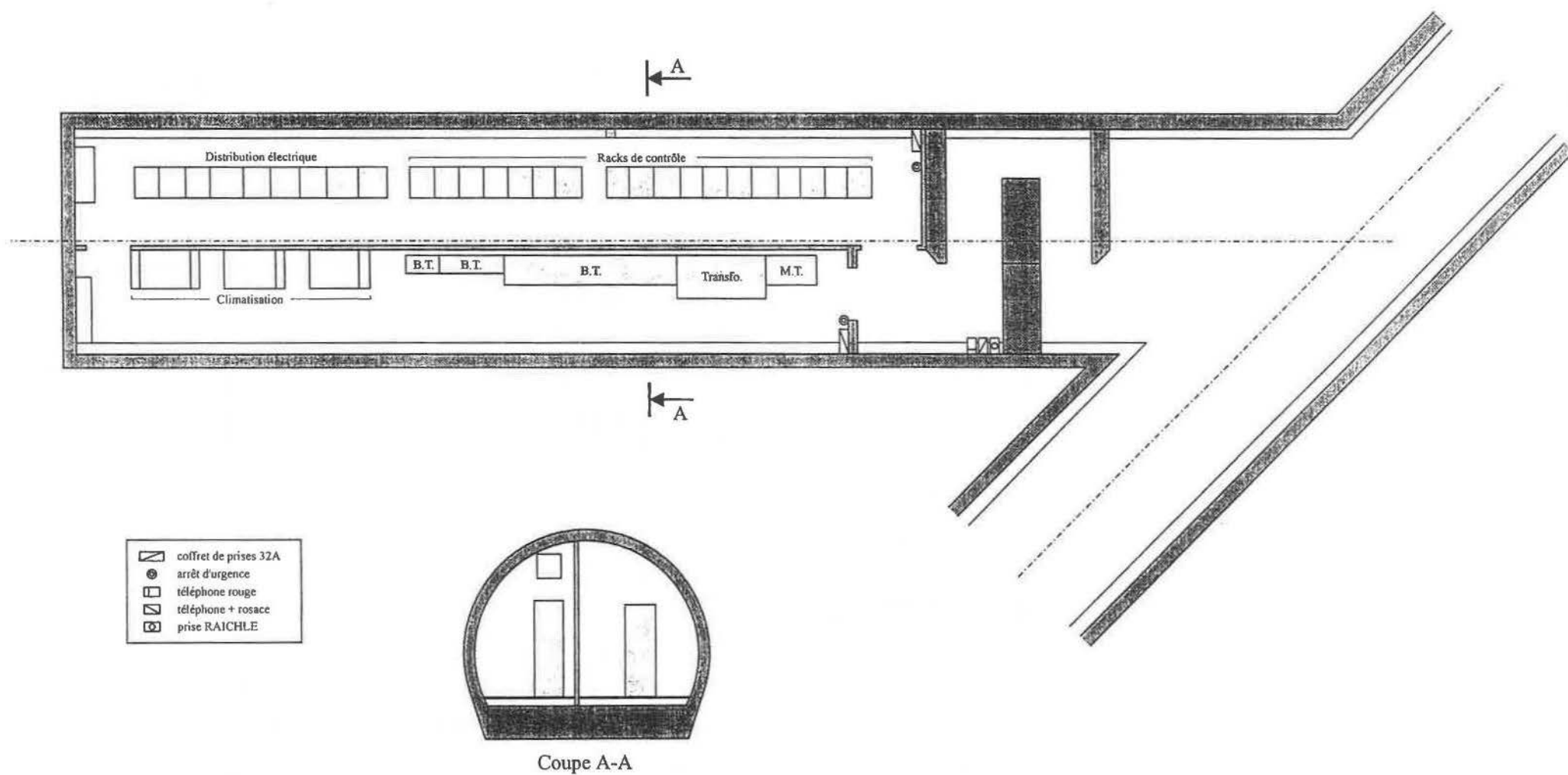


Figure III.65 – Disposition type des alvéoles électriques

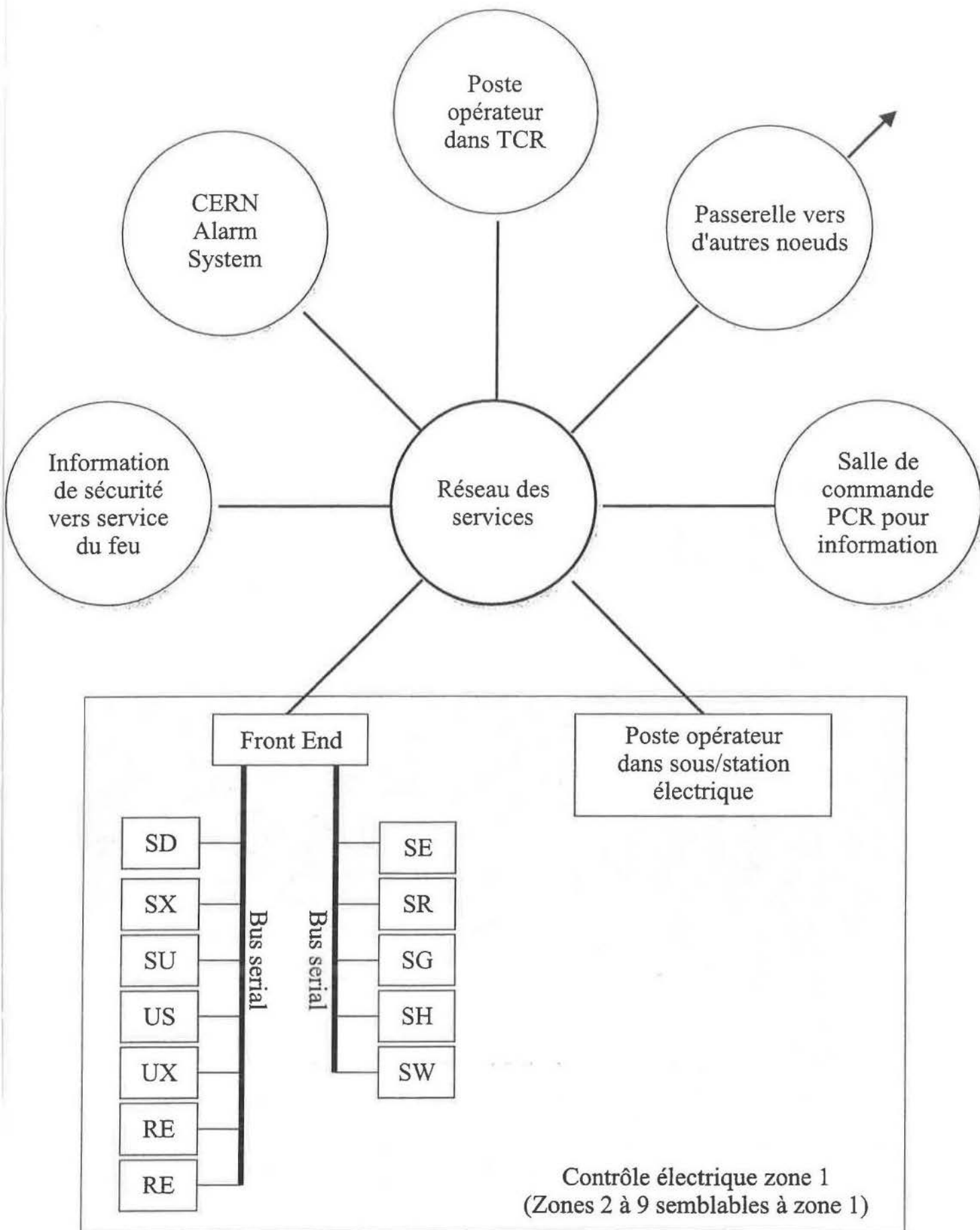


Figure III.66 – Contrôle du réseau électrique

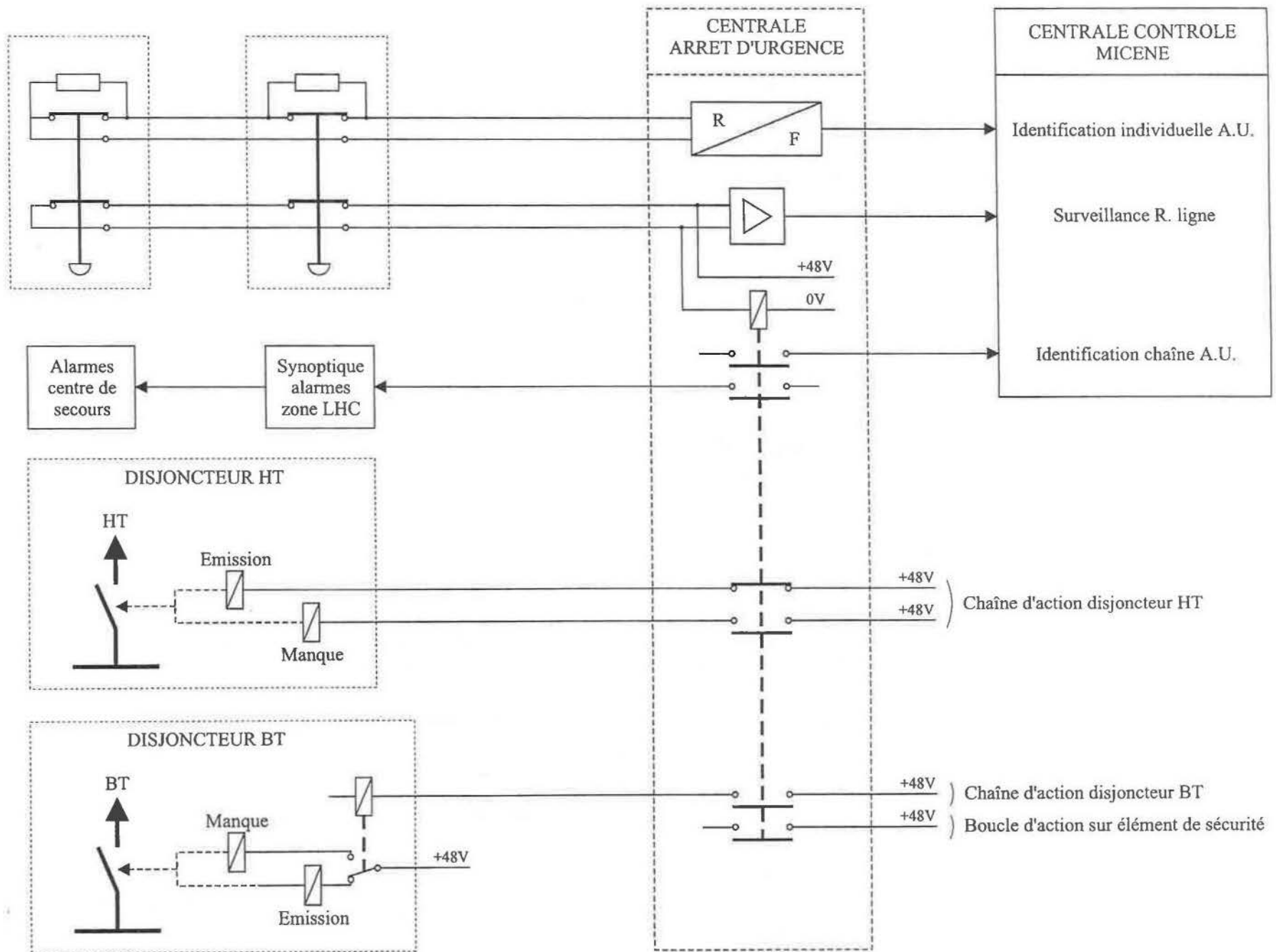


Figure III.67 – Schéma de principe des arrêts d'urgence

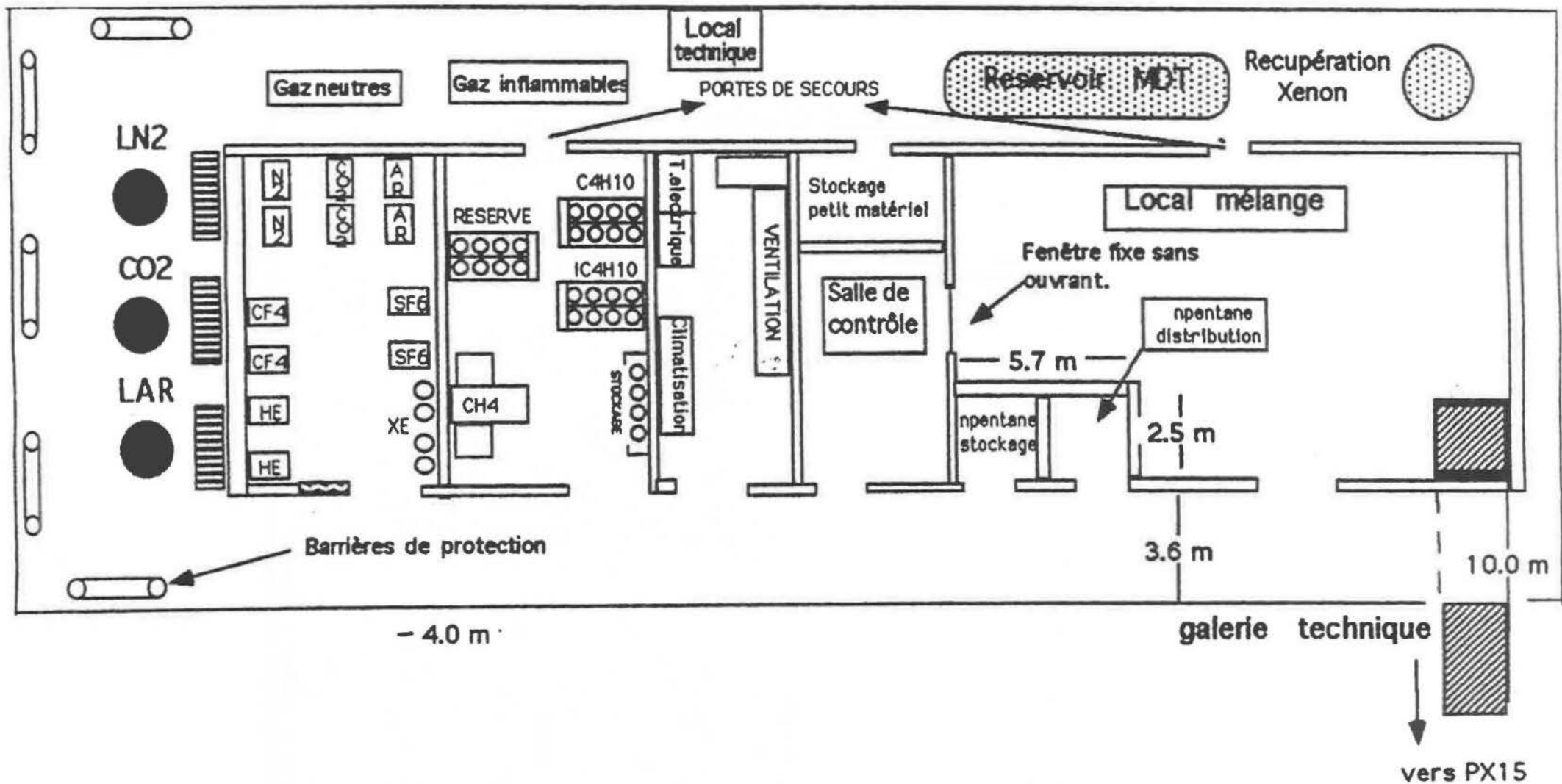


Figure III.68 – Projet bâtiment SGX au point 1 (ATLAS)

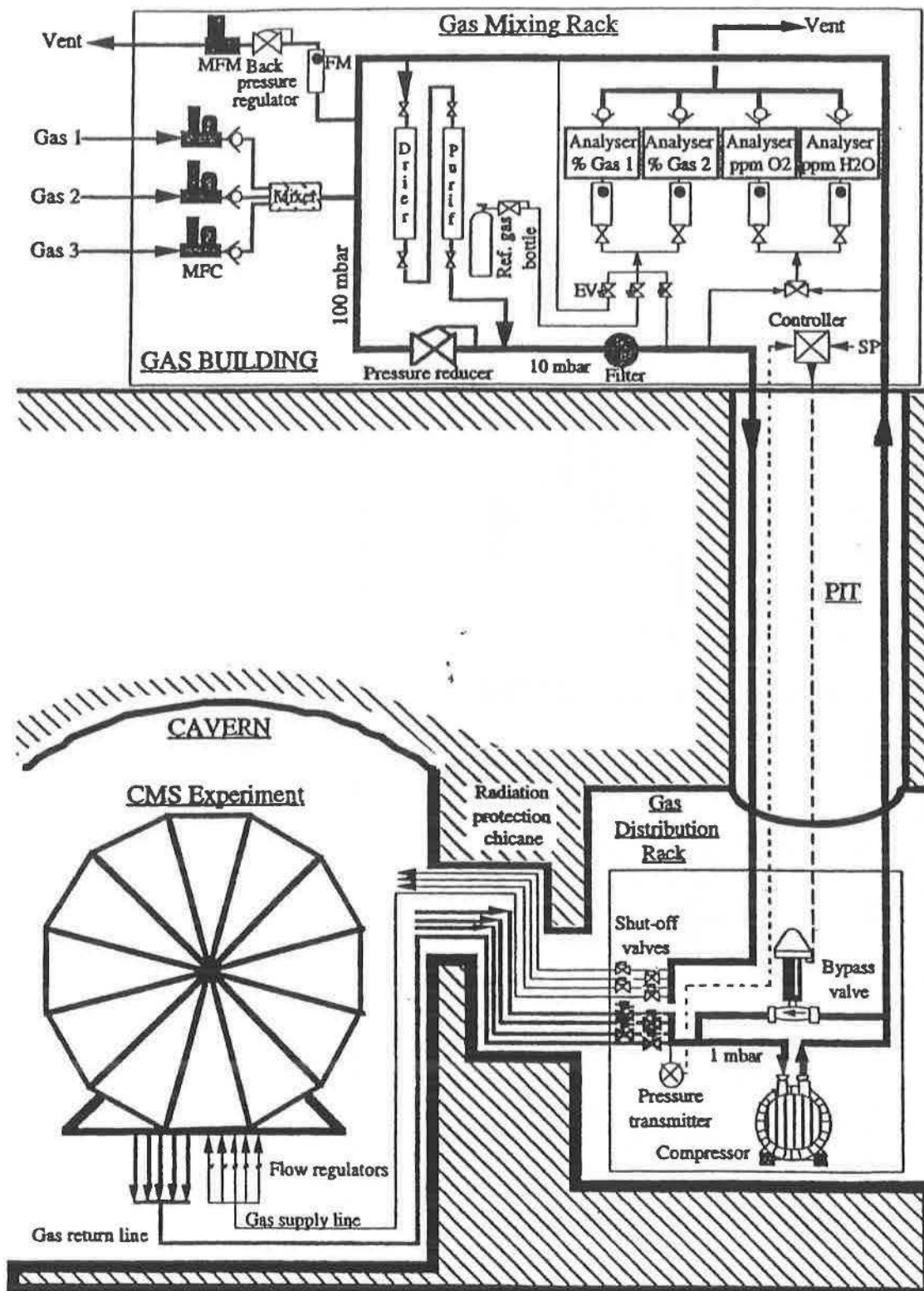


Figure III.69 – Projet de distribution de gaz pour CMS au point 5

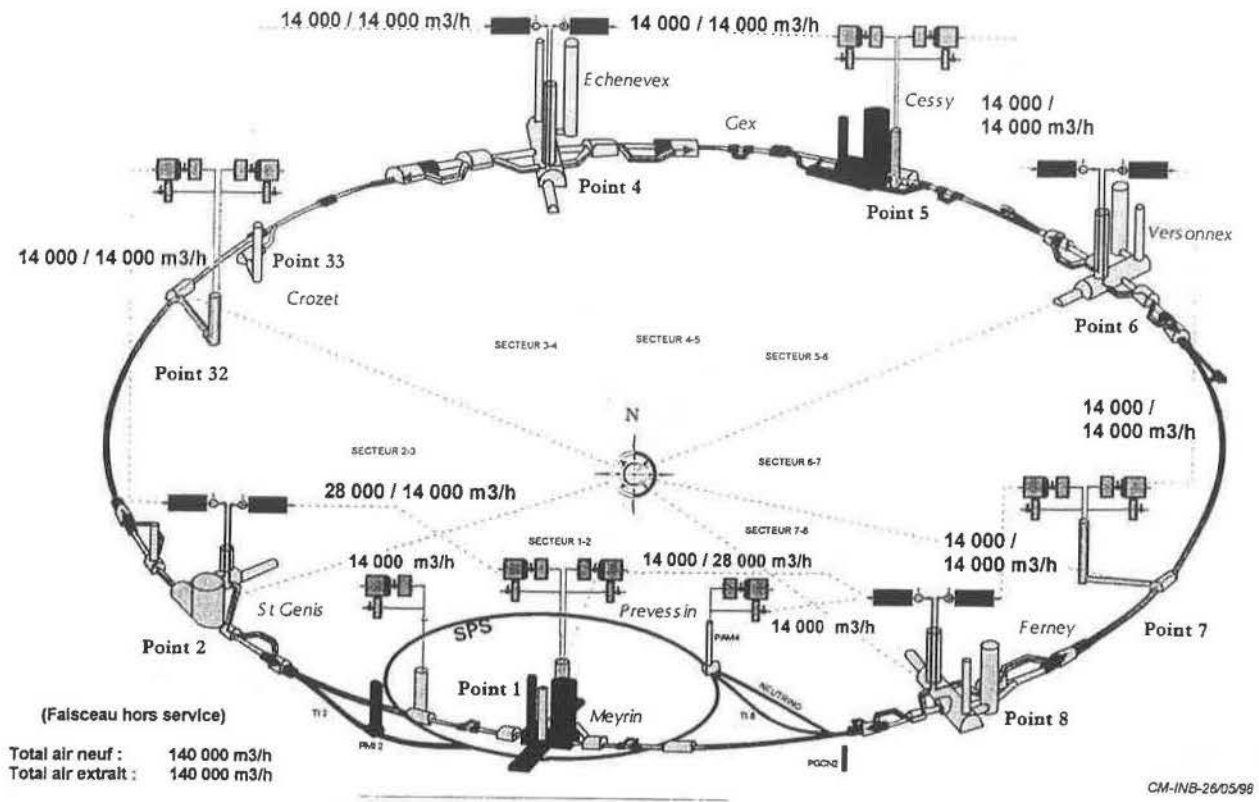


Figure III.70 – Traitement d'air; tunnel accessible

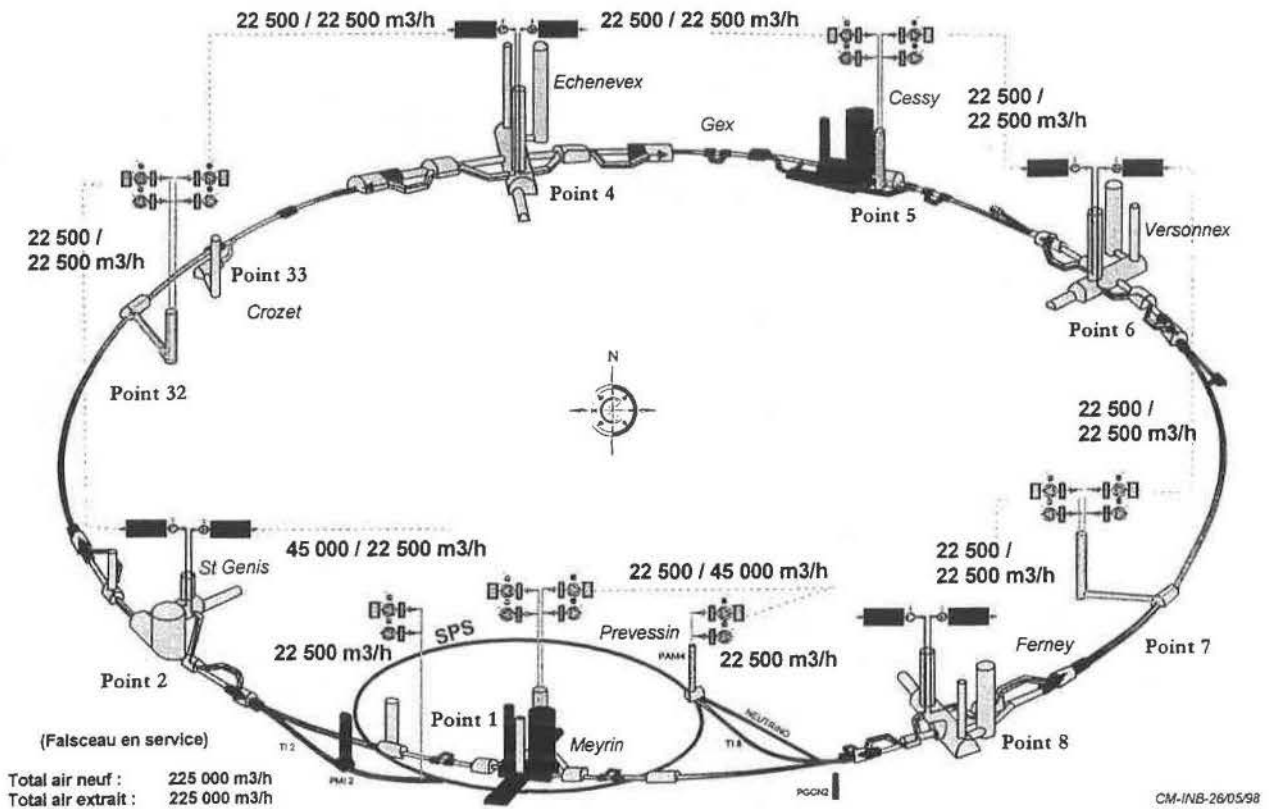
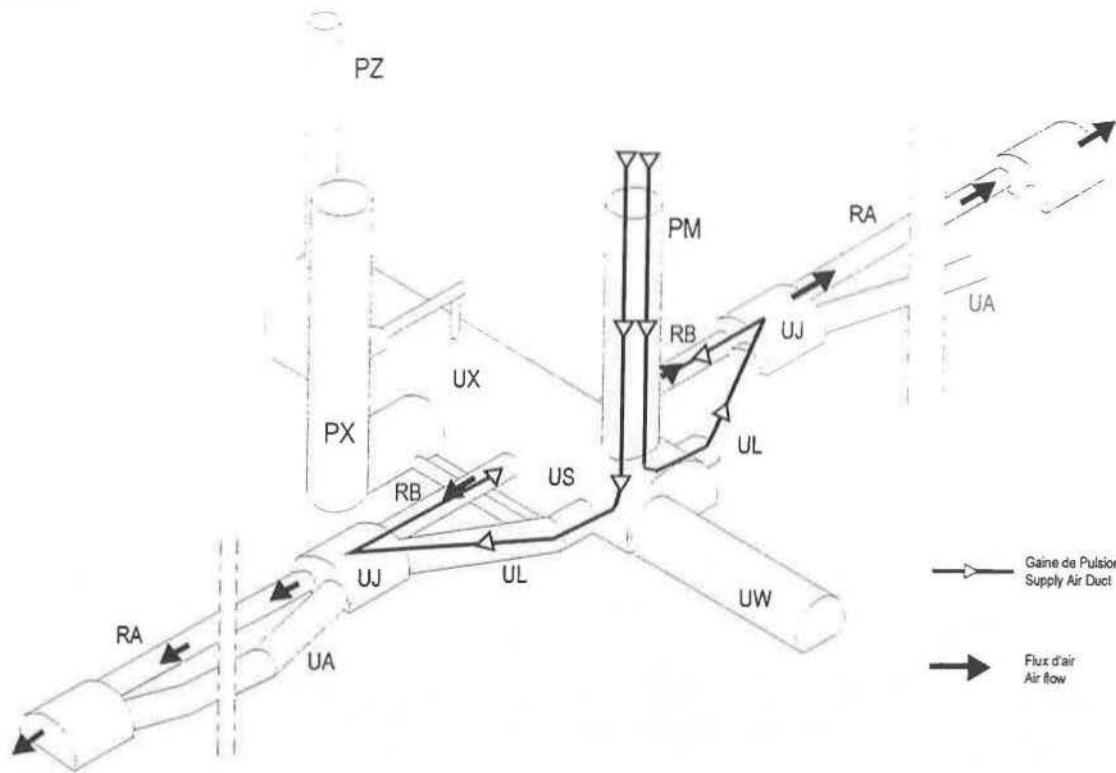
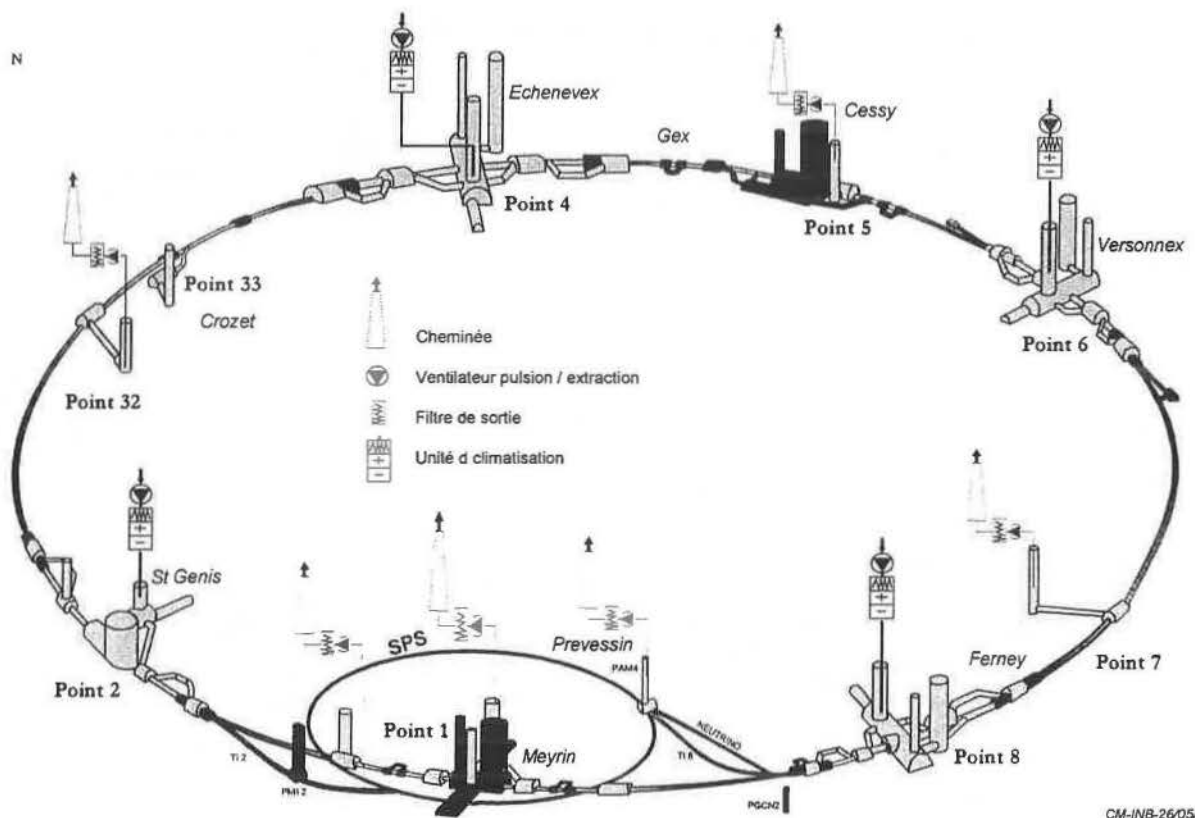


Figure III.71 – Traitement d'air; tunnel non accessible



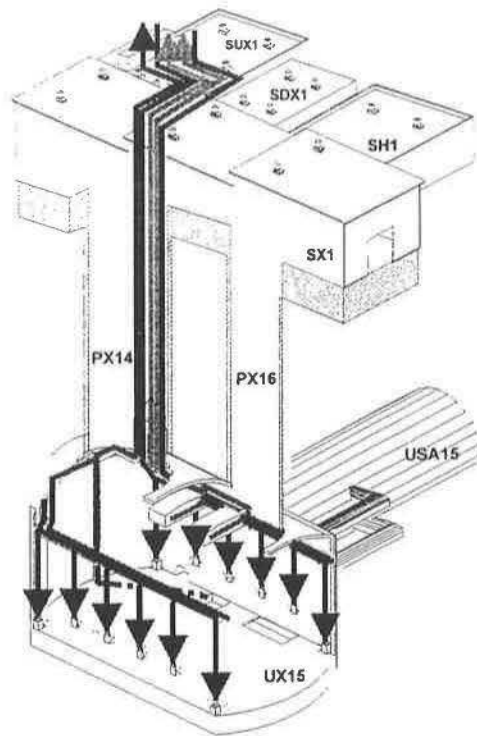
CM-INB-26/05/98

Figure III.72 – Ventilation du tunnel de l’anneau



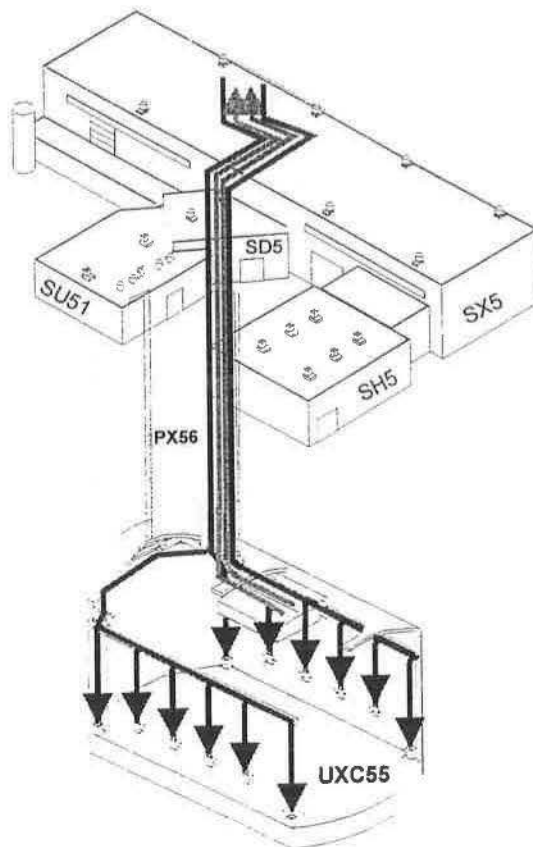
CM-INB-26/05/98

Figure III.73 – Schéma général ventilation tunnel LHC



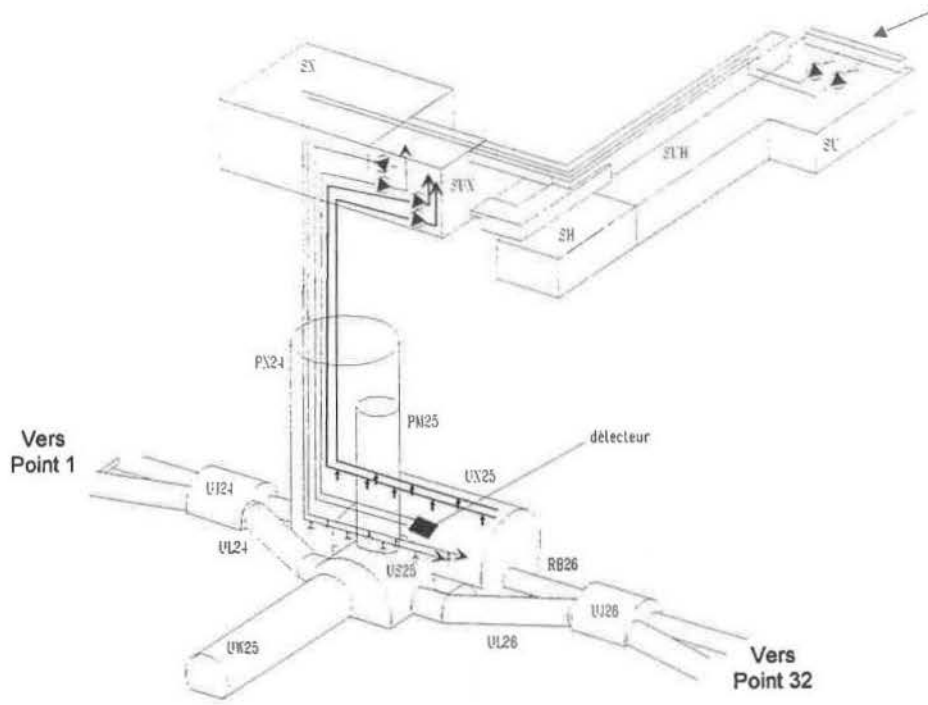
CM-INB-26/05/98

Figure III.74 – Zone expérimentale ATLAS - Point 1



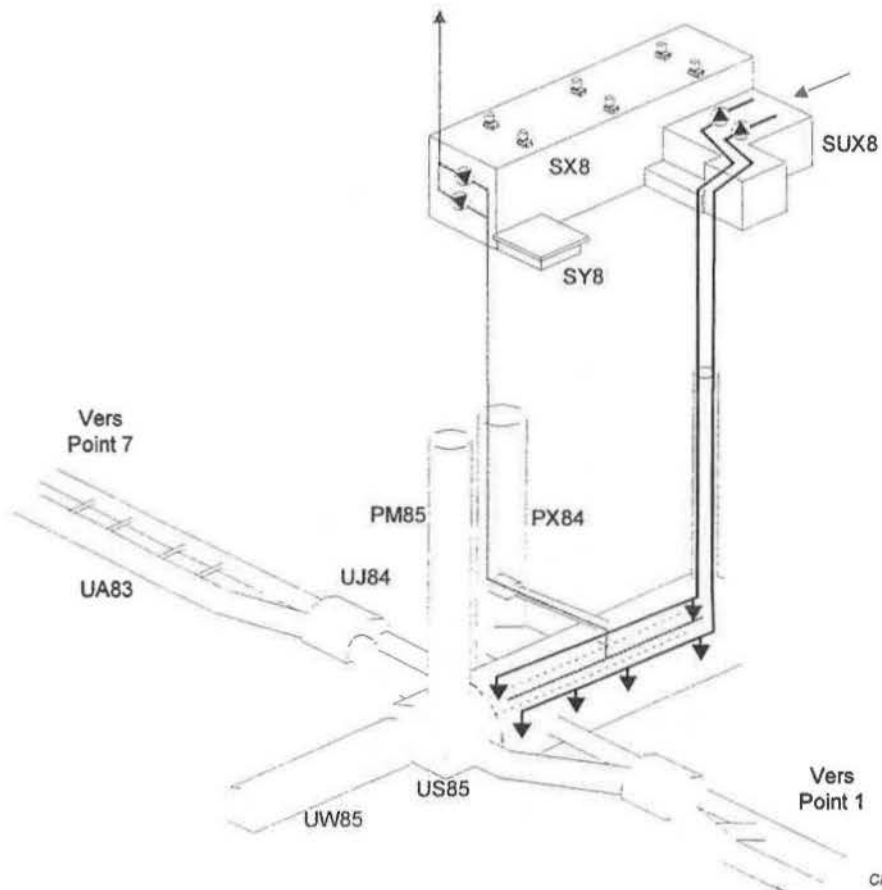
CM-INB-26/05/98

Figure III.75 – Zone expérimentale CMS – Point 5



CM-INB-26/05/98

Figure III.76 – Zone expérimentale ALICE - Point 2



CM-INB-26/05/98

Figure III.77 – Zone expérimentale LHC-B – Point 8

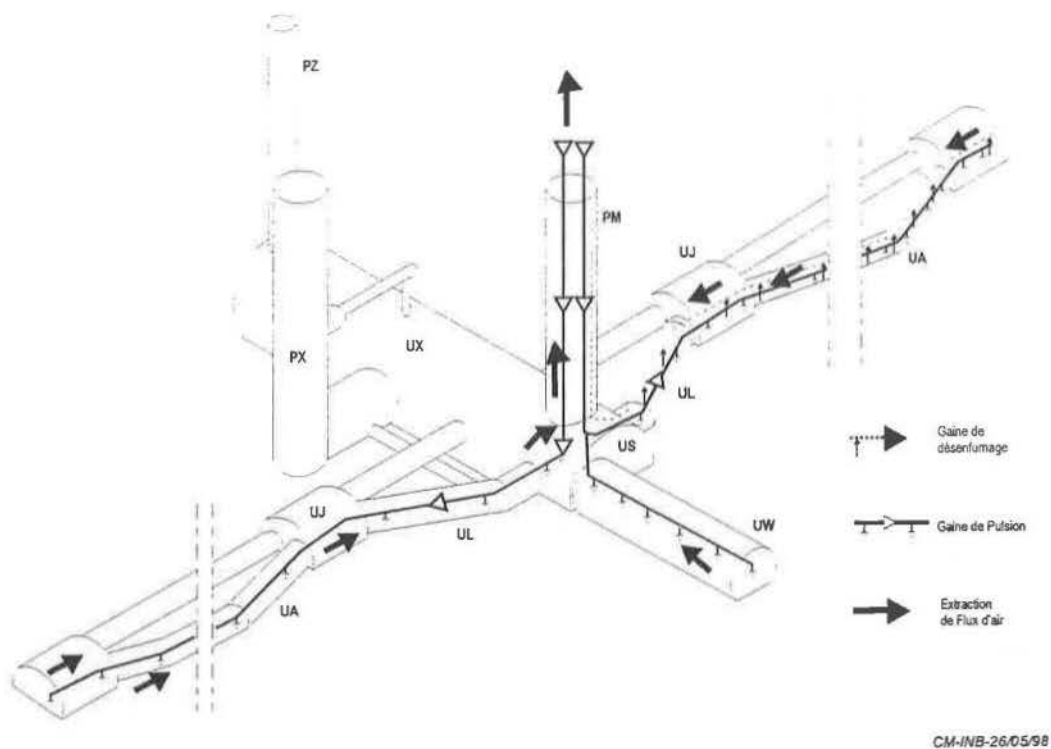


Figure III.78 – Ventilation des zones techniques accessibles/non accessibles

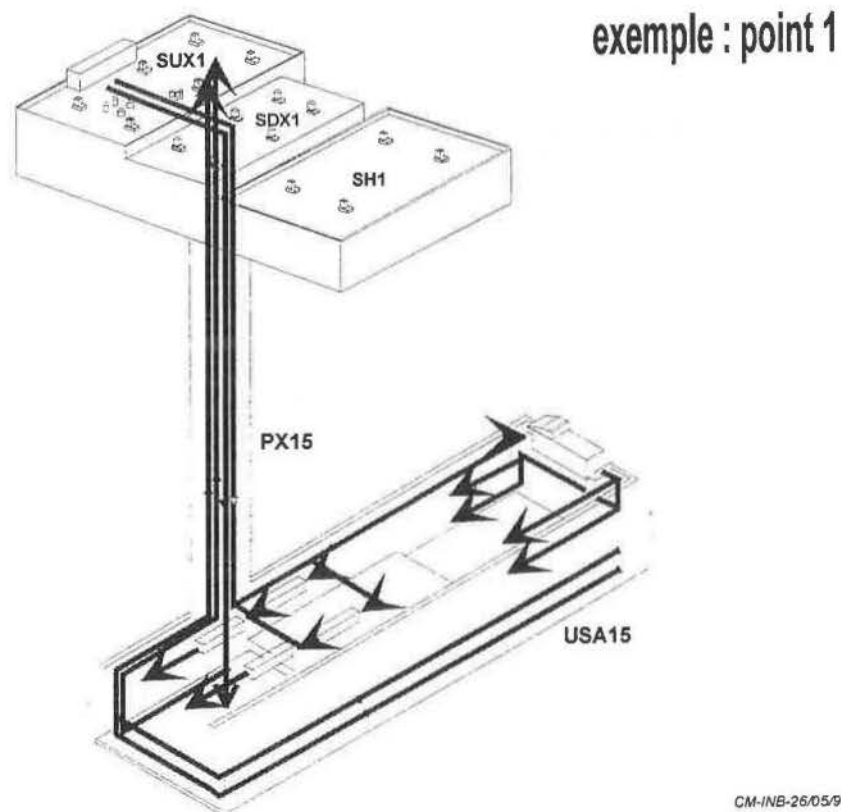


Figure III.79 – Ventilation des zones techniques accessibles en permanence

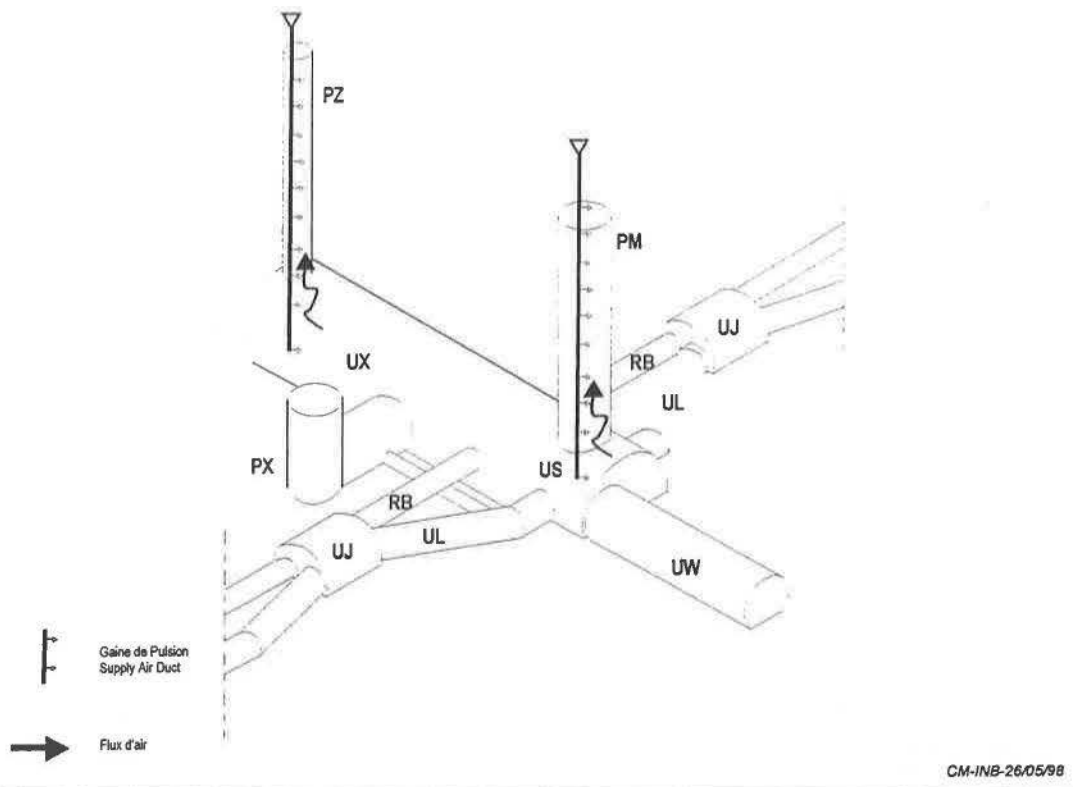


Schéma fonctionnel

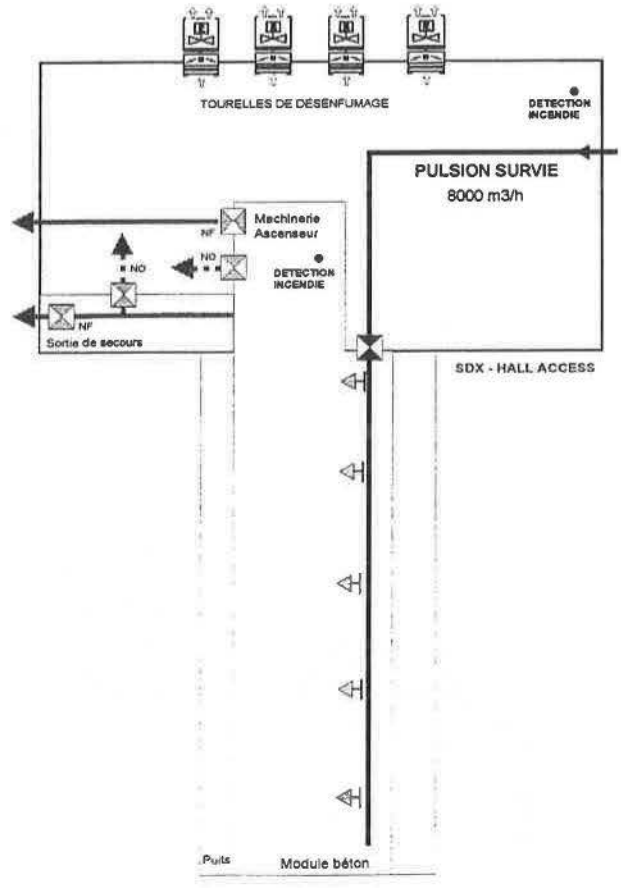


Figure III.80 – Pressurisation des zones de sécurité

IV INVENTAIRE DES RISQUES RADIOLOGIQUES

1 INTRODUCTION

Le collisionneur protons-protons de 7 TeV, le *Large Hadron Collider* (LHC), comporte, comme tous les accélérateurs de particules, des risques radiologiques pendant l'exploitation et à l'arrêt. L'inventaire de ces risques est résumé dans ce chapitre.

1.1 Rappel des interactions de protons à haute énergie

Les faisceaux de protons de 7 TeV représentent une source de rayonnement ionisant mais ne posent pas de problème radiologique en circulant dans la chambre à vide du collisionneur. Les sources de rayonnement qui engendrent des risques radiologiques se développent à partir des interactions de ces faisceaux avec la matière. Après l'interaction d'un proton de quelques GeV, les cascades hadroniques qui se développent sont le processus dominant dans la propagation du rayonnement ionisant et la production de radioactivité induite dans la matière. Ces cascades sont générées par des protons primaires, puis par d'autres hadrons de haute énergie qui produisent davantage de nouvelles particules en interagissant avec la matière. Les noyaux ainsi sollicités se trouvent dans un état excité et sont les sources principales des neutrons d'évaporation d'une énergie jusqu'à 20 MeV, à l'origine de la radioactivité induite dans des structures entourant les points d'interaction. Les radionucléides se forment également suite aux interactions de spallation dans lesquelles le noyau surchauffé, suite à l'apport de l'énergie, se casse en plusieurs morceaux. Toutes ces interactions induisent une radioactivité rémanente dans les structures autour du LHC, qui subsiste quand la machine est arrêtée mais qui décroît en fonction des types de radionucléides créés.

Dans une cascade hadronique, la production de muons par le mécanisme de la désintégration des mésons π (pions) et K (kaons) est importante mais il y a aussi production de muons de très haute énergie directement dans des interactions inélastiques profondes quand l'énergie des protons dépasse quelques centaines de GeV. La présence des photons et des électrons ou positons de haute énergie provoque le développement des cascades électromagnétiques et leur propagation par les processus du rayonnement de freinage, de la production de paires électron-positon et de l'effet de Compton.

Contrairement à un anneau de stockage à électrons ou positons, le rayonnement synchrotron n'a pas d'importance radiologique pour le LHC. Le spectre du rayonnement synchrotron caractérisé par le paramètre «énergie critique» est de l'ordre de 50 eV dans le cas du LHC. Ce spectre se situe donc dans la gamme d'énergie d'ultraviolet dur et ce rayonnement ne peut pas traverser la paroi de la chambre à vide du LHC.

1.2 Nature et localisation des sources de rayonnement ionisant

1.2.1 Nature de la radioactivité dans le LHC

L'inventaire des radionucléides autour des accélérateurs de haute énergie est différent de celui qu'on trouve dans les réacteurs. Dans les composants des accélérateurs touchés par des faisceaux de particules et leurs secondaires, on ne trouve ni produits de fission ni émetteurs alpha. Les radionucléides identifiés sont des émetteurs de rayonnements bêta et gamma caractérisés par une

prédominance des émetteurs de positons. Le risque radiologique en manipulant ces éléments radioactifs se limite à une exposition externe. Une longue expérience a montré que les matériaux activés dans les accélérateurs du CERN sont non contaminants. Même les produits de corrosion éventuelle, vu leur faible quantité et leur petite activité, ne présentent pas de risque de contamination.

Les radioéléments typiques produits dans les composants du LHC sont présentés dans le tableau IV.1. Ils sont formés principalement par trois processus. La voie classique est la formation des radionucléides dans la réaction (n,γ). Les neutrons, non chargés, pénètrent facilement dans les noyaux pour réagir. L'efficacité de ce type de réaction est généralement très grande si les neutrons ont atteint des énergies thermiques. L'exemple bien connu est la réaction $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$.

Les réactions inverses du type (γ,n) ont normalement des sections efficaces petites et ont peu d'importance dans des accélérateurs à protons. L'exemple typique est la réaction $^{23}\text{Na}(\gamma,n)^{22}\text{Na}$.

La voie d'activation la plus importante dans des accélérateurs à protons est l'interaction hadronique des particules de haute énergie avec les nuclei des matériaux. Du fait que l'énergie des particules interagissantes est beaucoup plus grande que l'énergie de la barrière Coulomb, ni la charge des noyaux ni celle des hadrons (protons, pions) ne joue de rôle dans la probabilité d'une telle réaction. Suite à l'interaction initiale, des hadrons de cascade sont éjectés dans un premier temps, puis le nucleus «chauffé» évapore des neutrons qui induisent à leur tour de la radioactivité dans des réactions (n,γ). Finalement, le nucleus restant se stabilise en émettant un rayonnement gamma ou se casse en petits morceaux. Ces produits de spallation ont généralement un déficit en neutrons, ce qui entraîne la décroissance des radionucléides formés principalement par l'émission d'un positon ou la capture d'électron. Le ^3H et le ^7Be sont les produits de spallation typiques que l'on retrouve dans tous les matériaux activés.

1.2.2 Estimation de la radioactivité dans le LHC

Le nombre d'interactions inélastiques par proton dans les composants du LHC est évalué à l'aide d'un calcul Monte-Carlo. La radioactivité induite A_i (en Bq) pour un radionucléide i peut être calculée de la façon suivante :

$$A_i = N_p S P_i [1 - \exp(-0.693 t_{\text{irr}} / T_i)]$$

N_p est le nombre de protons par seconde pour un temps d'irradiation t_{irr} (valeur moyenne), S est le nombre d'interactions inélastiques par proton, P_i la probabilité pour la formation d'un radionucléide i et T_i sa période radioactive.

Pour les radionucléides d'une période radioactive plus grande qu'une année, la radioactivité se calcule en utilisant une valeur moyenne de N_p pour le temps d'irradiation $t_{\text{irr}} = 10$ ans (y compris le temps d'arrêt de l'accélérateur). Pour des radionucléides d'une période radioactive plus courte (exemple : ^7Be) où l'activité arrive presque à saturation après six mois, on utilise une valeur moyenne de 4500 h de fonctionnement du LHC par an.

Tableau IV.1 - Principaux radionucléides produits dans les composants du LHC

Matériel	Nucléide	Période radioactive
Graphite (centre des blocs absorbeurs)	^3H	12,4 a
	^7Be	53,3 j
Aluminium (ex. blocs absorbeurs)	Comme pour le graphite mais en plus:	
	^{22}Na ^{24}Na	2,6 a 15 h
Acier (ex. blocs absorbeurs)	Comme pour l'aluminium mais en plus:	
	^{44}Ti	48 a
	^{46}Sc	84 j
	^{48}V	16 j
	^{51}Cr	27,8j
	^{54}Mn	312 j
	^{56}Co	77 j
	^{57}Co	270 j
	^{58}Co	72 j
	^{60}Co	5,27 a
	^{55}Fe	2,94 a
	^{59}Fe	45,1 j
^{63}Ni	120 j	
Cuivre	Comme pour l'acier mais en plus: ^{65}Zn	245j
Béton armé	Comme pour le cuivre mais en plus:	
	^{45}Ca	164 j
	^{152}Eu ^{154}Eu	12,7 a 16 a
Tungstène (ex. blocs absorbeurs)	Comme pour le béton armé mais en plus:	
	^{146}Gd	46 j
	^{182}Ta	115 j
	^{178}W ^{181}W	21,5 j 140 j

Les sources de rayonnements ionisants, ainsi que la radioactivité induite autour du LHC, sont la conséquence des pertes des protons. Pour estimer ces sources et cette radioactivité, il est nécessaire de connaître le nombre de protons impliqués ainsi que les endroits où ces pertes sont attendues [Höf95a]. Des paramètres, comme la pression résiduelle dans la chambre à vide ou l'efficacité des collimateurs ont été étudiés pour trouver les valeurs les plus réalistes pour les nombre des protons perdus. Ensuite, la distribution des particules secondaires dans les structures qui entourent les pertes et qui déterminent la propagation des rayonnements et la radioactivité induite peut être estimée par des calculs Monte-Carlo.

Le temps maximum entre deux remplissages successifs du LHC avec de nouveaux faisceaux est principalement déterminé par la décroissance de la luminosité due aux interactions inélastiques entre les deux faisceaux dans les zones d'expériences. Après un remplissage, le nombre de protons qui circulent dans la machine diminue graduellement et les pertes diminuent en proportion. Il est prévu qu'après 8 ou 20 h de collisions, les deux faisceaux du LHC seront extraits par deux systèmes de décharge au point 6 vers des blocs absorbeurs. Ainsi, presque deux tiers des protons qui circulent

dans le LHC seront absorbés dans ces deux blocs conçus pour être capable d'intercepter sans dommage toute l'énergie stockée dans un faisceau d'une intensité maximale (~ 333 MJ).

Pour arriver au nombre total des protons utilisés dans le LHC, deux scénarios basés sur 180 jours de fonctionnement en une année sont envisagés: un remplissage par jour d'une durée de 4 h suivi d'un fonctionnement du LHC comme collisionneur pendant 20 h ou deux remplissages par jour de 4 h suivis de 8 h de fonctionnement. De plus, pour une estimation de la radioactivité, il est nécessaire de différencier la machine nominale et une machine ultime, pour laquelle l'énergie et l'intensité du fonctionnement sont limitées. S'il est difficile, au début de l'exploitation du LHC, d'atteindre les valeurs de l'intensité nominale, il n'est pas exclu qu'avec l'expérience dans le temps, on arrivera à des intensités se rapprochant de celles de la machine ultime.

Les estimations de la radioactivité dans les composants du LHC sont basées sur les prévisions de pertes de protons : 63% des protons sont perdus dans les blocs absorbeurs, 10% dans les expériences et 25% sur les collimateurs. Les pertes des deux faisceaux autour de l'anneau du LHC sont de l'ordre de 2% des protons accélérés. Toutes les estimations sur l'activation traitées dans ce chapitre sont basées sur un temps de fonctionnement de 10 ans suivi de différents temps de refroidissement.

1.2.3 Les collimateurs

Pour éviter que les halos des faisceaux circulants, créés essentiellement par les interactions élastiques dans les zones d'expériences, ne touchent les structures supraconductrices, un système très efficace de collimateurs sera installé dans les points 3 et 7 pour nettoyer les faisceaux. Il est impératif que la puissance déposée par les pertes de faisceau dans les bobines supraconductrices du LHC reste en-dessous de quelques mW/cm^3 , pour éviter que les aimants ne retrouvent leur état résistif. Une telle puissance correspond à une perte locale maximale tolérable de $7 \cdot 10^6$ protons/seconde et mètre à 7 TeV [Lef95]. Cette minimisation des pertes de protons autour de la machine a pour conséquence que l'anneau du LHC ne sera que très légèrement radioactif. Par contre, une grande partie de la radioactivité induite sera concentrée dans les zones des collimateurs de nettoyage.

Les intensités de protons perdus sur les systèmes de collimateurs dépendent aussi largement du gonflement des faisceaux qui est une fonction des interactions des protons avec les gaz résiduels dans la chambre à vide. Par contre, les taux d'interactions dépendent peu de la durée de vie des faisceaux et de l'efficacité des collimateurs. Les pertes de faisceau sur les collimateurs sont données dans le tableau IV.2.

Chaque collimateur servant à nettoyer les faisceaux est composé de barres de tungstène de 1 à 30 cm d'épaisseur, placées de chaque côté du faisceau et suivies de plusieurs absorbeurs en cuivre de 3 à 5,3 m de longueur. Pour une estimation de la radioactivité induite, l'ensemble des collimateurs et absorbeurs, ainsi que les aimants qui les suivent ont été simulés par un calcul «Monte-Carlo». La simulation inclut également la radioactivité induite dans le système de collimateurs par les protons perdus dans le système de collimateurs de l'autre faisceau. Le système de collimateurs est frappé par $4 \cdot 10^{16}$ protons par an, tandis que la grande majorité de la radioactivité est produite dans les aimants dipôles qui les contiennent. Seulement 15% de l'activité totale de 9,4 TBq se trouvent concentrés dans les collimateurs de cuivre et l'activité dans les barres de tungstène n'est que de 2% de l'activité totale [Ste92a]. De plus, la radioactivité est également induite par les hadrons secondaires dans les aimants et la structure du tunnel qui suivent les

collimateurs. De nouveaux calculs sont actuellement en cours. Leurs résultats ne changeront vraisemblablement pas l'ordre de grandeur de l'activité totale mais plutôt leur distribution.

1.2.4 Les zones expérimentales

Les pertes de faisceau dans des collisions proton-proton sont données dans le tableau IV.2. Les particules secondaires créées dans les interactions entre les deux faisceaux de protons sont, pour la plupart, perdues autour de ces expériences. Ainsi, les insertions «faible bêta» seront touchées et deviendront radioactives. Les particules neutres issues des interactions entre les protons n'étant pas déviées par les champs magnétiques, elles continuent dans la direction initiale des faisceaux de protons primaires et sont capturées sur des arrêts de faisceau neutre des deux côtés du point d'interaction.

Tableau IV.2 - Intensités et nombre de protons retenus pour des estimations radiologiques du LHC

	Machine ultime	Machine nominale	Unités
Protons accélérés	$4,7 \cdot 10^{14}$	$2,8 \cdot 10^{14}$	a. r.*
Luminosité maximale	$2,5 \cdot 10^{34}$	$1,0 \cdot 10^{34}$	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Luminosité moyenne	$1,3 \cdot 10^{34}$	$5,0 \cdot 10^{33}$	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Interactions inélastiques dans ATLAS ou CMS	$1,0 \cdot 10^9$	$3,5 \cdot 10^8$	s^{-1}
	$1,6 \cdot 10^{16}$	$5,5 \cdot 10^{15}$	a^{-1}
Protons dans un arrêt de faisceau	$5,6 \cdot 10^{14}$	$2,8 \cdot 10^{14}$	j^{-1}
	$1,0 \cdot 10^{17}$	$5,0 \cdot 10^{16}$	a^{-1}
Protons perdus sur les collimateurs #	$2,5 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^9$	s^{-1}
	$4,0 \cdot 10^{16}$	$1,6 \cdot 10^{16}$	a^{-1}
Protons perdus tout autour de l'anneau #	$2,2 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^8$	s^{-1}
	$3,4 \cdot 10^{15}$	$2,2 \cdot 10^{15}$	a^{-1}

* a. r. = après remplissage ;

= par faisceau

La luminosité élevée du LHC de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ produit un nombre d'interactions inélastiques élevé dans les détecteurs et les composants du LHC de chaque côté du point de collision. Le détecteur d'une expérience est composé de différents matériaux. Leur activation par des interactions dans le point de collision a été étudiée en détail pour l'expérience CMS [Huh98]. Les valeurs trouvées sont aussi représentatives pour l'expérience ATLAS qui a une structure et des intensités de faisceau semblables. Pour l'estimation détaillée de la radioactivité dans les expériences, on a considéré que la luminosité maximale n'est atteinte qu'après trois ans de fonctionnement du LHC.

Des estimations d'activation sont données dans le tableau IV.3 pour les différents éléments de l'expérience CMS. Elles se distinguent soit par une activité massique élevée, soit par leur grande masse d'une activité massique modérée.

Tableau IV.3 - Activités totales et massiques produites dans différents composants de l'expérience CMS pour un temps d'irradiation de 10 ans et pour différents temps t de refroidissement [Huh98].

Composant	t = 1 an		t = 10 ans		t = 30 ans	
	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g
Calorimètre en aval	150	910	5,6	35	0,22	1,4
Blindage mobile mince	16	260	0,53	8,8	0,02	0,37
Blindage mobile épais	6,3	37	0,14	0,82	0,01	0,07
Chambre à vide	1,0	4900	0,08	410	0,009	46
Collimateur en aval	56	14000	11	2700	4,4	1100
Blindage du collimateur	220	1700	6,5	50	0,26	2

Suite aux calculs détaillés, il a été possible de donner une estimation des masses activées (en tonnes) pour les différentes classes d'activité massique et pour les temps de refroidissement de 1, 10 et 30 ans (voir tableau IV.4).

Tableau IV.4 - Masses activées en tonnes dans l'expérience CMS pour un temps d'irradiation de 10 ans et pour différents temps t de refroidissement selon différentes classes de radioactivités massiques [Huh98].

Classe de l'activité massique en Bq/g	t = 1 an	t = 10 ans	t = 30 ans
1-10	1920	406	322
10 - 100	667	291	0,2
>100	351	4,2	4,0

Ce tableau montre qu'après 30 ans, presque toute la radioactivité massique sera en dessous de 10 Bq/g sauf 4 tonnes qui correspondent principalement aux collimateurs autour de l'expérience.

Les calculs pour l'expérience CMS ont été poussés pour identifier les radionucléides induits. Il a été montré qu'en plus du ^{54}Mn et du ^{51}Cr , le ^{55}Fe est produit en quantité non négligeable dans le fer. Une bibliothèque complète des sections efficaces pour la production de différents radionucléides existe déjà pour les éléments légers (ex : activation de l'air). Des travaux sont actuellement en cours pour établir une telle bibliothèque pour les éléments plus lourds comme le fer et le cuivre.

1.2.5 Les blocs absorbeurs

Le système des blocs absorbeurs est la troisième zone où les pertes de faisceau sont localisées. Tous les protons qui ne sont ni utilisés dans les expériences de physique ni perdus dans la machine sont envoyés à la fin d'un cycle d'expériences de physique sur les blocs absorbeurs (voir figure III.58). La partie centrale des blocs absorbeurs est constituée de graphite; elle est entourée d'un bloc d'aluminium. Le tout est blindé par du fer qui assure la protection radiologique principale. Il faut également garantir que la totalité des faisceaux soit extraite de la machine d'une façon sûre, propre et rapide vers les blocs absorbeurs au moyen d'un système de décharge.

Le ^7Be et le ^3H (tableau IV.1) sont les radionucléides de périodes radioactives longues pouvant être produits dans le graphite. En utilisant le nombre total d'interactions inélastiques, la production de ^7Be et de ^3H dans un bloc de graphite d'un rayon de 50 cm pour un total de 10^{17}

protons absorbés par an et après 10 ans de fonctionnement du LHC, est indiquée dans le tableau IV.5.

En ce qui concerne l'aluminium, l'activité massique est prise dans la partie la plus chaude du cylindre autour du coeur en graphite. Compte tenu de la période courte de ^{24}Na (15 h), seuls ^{22}Na , ^7Be et ^3H sont retenus. Les activités totales calculées sont présentées dans le tableau IV.6.

Pour le blindage en fer qui entoure l'aluminium, une activité globale est estimée à partir des interactions inélastiques. En supposant que chaque interaction forte mène à la production d'un radionucléide dans le fer, la radioactivité du blindage est surestimée. Pour une irradiation d'un temps infini, on arrive à la saturation de la radioactivité, c'est-à-dire que la décroissance de la radioactivité induite est égale à sa production. Les valeurs de la radioactivité gamma, pour des temps de décroissance de 1 et 30 ans sont données dans le tableau IV.7. La production de ^3H dans le fer après dix ans de fonctionnement est également indiquée dans ce tableau. Enfin, la radioactivité dans le béton de blindage a été calculée. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau IV.8.

Tableau IV.5 - Activités totales et massiques produites dans la partie centrale en graphite du bloc absorbeur pour un temps d'irradiation de 10 ans et pour différents temps t de refroidissement [Daw98].

Radionucléide	t = 1 an		t = 10 ans		t = 30 ans	
	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g
^3H	250	51000	150	31000	50	10000
^7Be	9,2	1900	-	-	-	-

Tableau IV.6 - Activités totales et massiques produites dans l'aluminium placé autour de la partie centrale du bloc absorbeur pour un temps d'irradiation de 10 ans et pour différents temps t de refroidissement [Daw98].

Radionucléide	t = 1 an		t = 10 ans		t = 30 ans	
	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g
^3H	279	25000	163	15000	54	4900
^7Be	1,64	150	-	-	-	-
^{22}Na	110	10000	10	900	0,047	4,4

Tableau IV.7 - Activités totales et massiques produites dans le blindage en fer d'un bloc absorbeur pour un temps d'irradiation de 10 ans et pour différents temps t de refroidissement [Daw98].

Radionucléide	t = 1 an		t = 30 ans	
	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g
^3H	530	680	103	130
Gamma total	280	350	33	42

Tableau IV.8 - Activités totales et massiques produites dans le béton placé autour du bloc absorbeur pour un temps d'irradiation de 10 ans et pour différents temps t de refroidissement [Daw98].

Radionucléide	t = 1 an		t = 10 ans		t = 30 ans	
	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g	GBq	Bq/g
^3H	1,7	17	1,0	10	0,33	3,3
^7Be	0,021	0,21	-	-	-	-
^{22}Na	0,57	5,8	0,051	0,53		
^{55}Fe	22	220	2,2	22	0,013	0,13

Après 10 ans de refroidissement, la radioactivité massique dans le béton qui entoure le bloc absorbeur sera en dessous des limites d'exemption figurant dans la Directive Européenne [Dir96]. C'est également le cas pour la majeure partie du fer et de l'aluminium après 30 ans de décroissance car la plupart de la radioactivité est concentrée vers l'intérieur.

1.2.6 Les pertes de faisceau autour du LHC

Les pertes de faisceau autour du LHC sont une fonction de l'efficacité des collimateurs mentionnés ainsi que du taux moyen d'interactions avec les gaz résiduels dans la chambre à vide de la machine. Les paramètres radiologiques du LHC se basent sur des prévisions réalistes concernant les pertes de faisceau autour de la machine qui découlent des régimes de fonctionnement et des intensités des faisceaux prévues (tableau IV.2). On peut distinguer trois types de pertes [Lef95] :

- i) Des pertes de protons dues à un gonflement lent des faisceaux causé par des interactions faisceau-faisceau, par l'action répétitive des petites imperfections des champs magnétiques et par les petites instabilités des alimentations, sont estimées à $1,7 \cdot 10^9$ pour $3 \cdot 10^{14}$ protons dans un faisceau. Ces protons contribuent à la croissance graduelle de l'émission, c'est-à-dire du halo capté par les collimateurs.
- ii) Pour chaque faisceau de $3 \cdot 10^{14}$ protons, environ 10^9 protons par seconde sont perdus par leur interaction directe avec les gaz résiduels dont environ 30% sont absorbés dans les collimateurs, tandis que 70% se perdent dans la chambre à vide tout autour du LHC. En fonctionnement normal avec les collimateurs bien ajustés, ceci constitue la seule perte de protons tout autour de l'anneau. La valeur estimée à 10^9 protons est une limite supérieure pour les pertes faisceau-gaz résiduel. En réalité, on s'attend à un facteur de perte trois fois plus bas.
- iii) Quand deux faisceaux de $3 \cdot 10^{14}$ p circulent dans la machine, il y a 10^9 interactions proton-proton par seconde dans une expérience de physique. Environ 60% de ces interactions sont des interactions inélastiques d'où les particules sortent à des angles transversaux tels qu'elles se perdent essentiellement dans les grands détecteurs ou ailleurs dans les régions d'interaction. Le reste des interactions est de type élastique d'où les protons émergent avec une dispersion angulaire comparable à celle des faisceaux. Ainsi, ces protons contribuent à la croissance graduelle de l'émission, c'est-à-dire à la formation d'un halo autour des faisceaux. Pour éviter que ce halo ne grandisse trop, puisse interagir avec la chambre à vide et, par la suite, dépose de l'énergie dans les aimants supraconducteurs, les faisceaux seront «nettoyés» en permanence par les systèmes de collimateurs déjà mentionnés.

Dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement», tous les calculs ont été basés sur les paramètres d'une machine ultime [Höf97]. En particulier pour les épaisseurs des blindages. Les arrêts de faisceau sont également conçus pour recevoir les intensités maximales d'une telle machine. Pour tout ce qui concerne les blindages ainsi que les estimations des débits de

dose à partir de la radioactivité induite et les doses absorbées par les composants les intensités choisies sont celles d'une machine nominale. Les intensités et nombre de protons pour les différents processus dans des machines ultimes ou nominales se trouvent dans le tableau IV.2. Les valeurs sont données pour un seul faisceau circulant. Les pertes par seconde sont des valeurs moyennes sur 24 h de fonctionnement y compris le temps entre les remplissages. Ces pertes moyennes varient peu par rapport à la valeur prise pour le temps d'un remplissage.

Une étude des scénarios possibles de pertes des faisceaux autour du LHC mentionne l'éventualité d'une perte maximale due au mauvais fonctionnement de certains éléments de la machine [Bur93]. Des moniteurs de pertes de faisceaux redondants situés à proximité des collimateurs détecteront toutes les pertes anormales et déclencheront immédiatement le processus d'éjection des faisceaux vers les blocs absorbeurs. Ces pertes n'ont aucune conséquence importante sur la machine ou l'environnement. Le seul scénario vraiment accidentel, très improbable, serait lié au non fonctionnement du système d'éjection des faisceaux vers les blocs absorbeurs. Ce cas, entraînant la destruction d'éléments autour du point de perte sera traité dans le chapitre VIII de ce rapport.

En moyenne, durant une année, la perte de protons autour de la machine sera de $3,4 \cdot 10^{15}$ protons par faisceau. Selon cette hypothèse, la radioactivité massique induite restera très petite. L'activité totale dans les aimants le long de l'anneau du LHC sera de 120 GBq (^3H) et de 520 GBq pour les autres activités bêta/gamma [Ste92b].

1.3 Fonctionnement du LHC avec des ions lourds

Il est prévu de stocker des ions lourds dans le LHC et de les mettre en collision dans l'expérience ALICE [ALI95]. Les estimations radiologiques pour ces ions sont caractérisées par leur faible intensité en comparaison aux faisceaux de protons. Dans l'étude sur l'importance radiologique des ions, la valeur maximale, comparée à une valeur moyenne pour les protons, est retenue. Des intensités d'ions par faisceau sont données dans le tableau IV.9 [Roe98a].

Tableau IV.9 - Intensités et nombre d'ions retenus pour des estimations radiologiques du LHC

Ion	Nombre d'ions	
	Lef95	ALI95
p*	$2,8 \cdot 10^{14}$	
He		$4,5 \cdot 10^{13}$
O		$7,2 \cdot 10^{12}$
Ca		$1,8 \cdot 10^{12}$
Nb		$3,3 \cdot 10^{11}$
Pb	$3,8 \cdot 10^{10}$	$4,1 \cdot 10^{10}$

*valeur moyenne

Les résultats des calculs montrent que les estimations radiologiques pour les protons englobent largement celles pour les ions lourds. Une légère augmentation d'activation à l'intensité initiale calculée pour des ions d'hélium n'a pas de conséquence car ce type d'ion sera plutôt utilisé pendant de courtes périodes pour étudier la machine. Actuellement, il est prévu d'utiliser essentiellement des ions de plomb pour les expériences de physique.

1.4 Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement

En 1997, l'étude «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement» a été publiée [Höf97]. Les conclusions principales de cette étude se résument comme suit:

- les débits de dose à la surface engendrés par le fonctionnement en souterrain du collisionneur seront négligeables et très inférieurs aux normes en vigueur;
- la radioactivité supplémentaire induite dans la roche autour du tunnel sera négligeable et n'aura pas de conséquence sur l'environnement;
- les quantités de radioactivité rejetées dans l'environnement seront insignifiantes et resteront dans tous les cas en-dessous des limites fixées par la législation des pays hôtes et les règlements du CERN.

1.5 Les rayonnements diffusés et les blindages du LHC

Il n'y aura pas d'accès pour le personnel aux zones souterraines pendant le fonctionnement du LHC à l'exception des cavernes de service (US) qui se trouvent à proximité des grandes cavernes abritant les expériences. Des blindages de protection entre la machine et des cavernes de services doivent donc être définis.

Les spécifications pour le blindage d'un anneau de stockage à protons utilisant des aimants supraconducteurs ne peuvent pas être basées sur les pertes occasionnées pendant le fonctionnement normal des installations car ces pertes doivent être maintenues au strict minimum pour que l'anneau de stockage puisse fonctionner. Un des principaux critères pour déterminer l'épaisseur du blindage est l'exposition potentielle des personnes, en cas d'une perte inattendue à un seul endroit. Dans ce cas, l'endommagement de l'accélérateur serait dramatique. Tous les efforts sont donc faits pour que la probabilité d'un tel événement soit extrêmement faible. Néanmoins, une perte totale du faisceau ne peut jamais être totalement exclue (voir chapitre VIII, section 1).

Une des contraintes conceptuelles choisie pour le LHC est que la perte complète d'un des deux faisceaux circulants dans un scénario réaliste ne doit pas donner un équivalent de dose ambiante de plus de 50 mSv à la surface extérieure du blindage entourant la zone contrôlée concernée [Höf95a]. Si une personne est impliquée dans un tel incident, sa dose efficace restera en dessous de la limite de dose annuelle de 20 mSv, ce qui ne sera pas considéré comme un accident radiologique.

Deux autres contraintes conceptuelles existent pour les zones accessibles autour du LHC:

- i. le débit de l'équivalent de dose ambiant dû à la perte du faisceau injecté à partir du SPS ne doit jamais excéder 100 mSv/h ;
- ii. le débit de dose pour les situations normales dans les zones contrôlées autour du LHC doit rester inférieur à 10 μ Sv/h.

Comme il est montré dans l'annexe A1 de ce chapitre, il existe une relation entre ces trois contraintes. La contrainte conceptuelle de 10 μ Sv/h dans des zones accessibles demande qu'un système actif de surveillance des niveaux de rayonnements ionisants soit installé. Les opérateurs de la machine sont avertis lorsque le débit de dose dépasse le niveau de 30 μ Sv/h pour qu'ils puissent régler les paramètres de la machine afin de réduire les pertes de faisceau. Si le débit de dose dans ces endroits dépasse 100 μ Sv/h, les faisceaux seront éjectés.

1.6 La protection de l'environnement

La protection de l'environnement est une préoccupation majeure dans le projet LHC. Toutes les mesures sont prises pour que la radioactivité dans les effluents ainsi que les niveaux des rayonnements diffusés soient gardés ALARA.

Les valeurs globales de la radioactivité dans l'air du LHC, calculées pour un rejet intégré sur une année sont pour les radionucléides avec une période $T > 1$ jour (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{37}Ar) d'environ 3 GBq. Pour les radionucléides d'une période $T < 1$ jour (^{11}C , ^{14}O , ^{15}O , ^{37}S , ^{41}Ar), un rejet d'environ 22 TBq par an a été estimé (voir les détails dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement») [Höf97].

En ce qui concerne la radioactivité pouvant être rejetée dans l'air et l'eau, le CERN tient compte des facteurs de dose calculés pour le site de Meyrin (voir tableau IV.10) mais qui peuvent également être utilisés pour les estimations de dose dues aux rejets du LHC. Ces facteurs de dose permettent de calculer, pour chaque catégorie de radionucléides (voir tableau IV.10), la dose efficace aux groupes critiques de la population, c'est-à-dire aux personnes les plus exposées à partir des émissions mesurées dans l'air ou l'eau. Les calculs détaillés pour tous les points de rejet autour du LHC sont actuellement en cours et seront présentés ultérieurement.

Ce calcul exige plusieurs étapes où chacune incorpore un certain degré de conservatisme. Dans un accélérateur, l'émission d'une radioactivité importante instantanée n'est pas possible. Il suffit donc de calculer un rejet quasi continu où une moyenne des conditions météorologiques sur une année (avec la direction du vent la plus probable) est retenue pour la dispersion dans l'atmosphère [Voj98].

Les facteurs de dose pour le groupe critique de la population sont calculés en utilisant les méthodes publiées dans la recommandation suisse HSK-R-41/d [HSK97]. Ce guide est largement en accord avec les normes internationales comme par exemple les recommandations de l'IAEA [IAEA80]. Dans ces calculs, la dispersion dans l'air des aérosols radioactifs est simulée par un modèle représentant un nuage d'une forme gaussienne. Tous les modes de transport de la radioactivité dans l'environnement y sont abordés : la déposition sur la terre et la végétation par les retombées («fallout») et les précipitations («washout»), le transfert de la radioactivité de la terre à la végétation et le transfert de la végétation aux animaux (viande et lait). La dose totale au public est donnée en considérant toutes les voies possibles pour une personne hypothétique qui cumulerait :

- la dose externe par immersion dans l'air radioactif,
- la dose externe par rayonnement direct de la radioactivité déposée sur la terre et la végétation,
- la dose interne par inhalation de l'air radioactif,
- la dose interne par ingestion de végétaux cultivés dans la zone concernée,
- la dose interne par ingestion de viande et de lait d'animaux élevés dans la zone concernée.

Tableau IV.10 - Facteurs de dose dus aux rejets radioactifs calculés sur la base de la recommandation suisse HSK-R-41/d pour le site de Meyrin [HSK97, Voj98]

Facteurs de dose en Sv/Bq	
Pour les rejets gazeux:	
Tritium (en forme HTO gazeuse)	$2,8 \cdot 10^{-20}$
^7Be (en aérosol)	$9,4 \cdot 10^{-18}$
Activités bêta/gamma (T < 1 jour)	$2,6 \cdot 10^{-19}$
Autres émetteurs bêta/gamma (T > 1 jour)	$7,3 \cdot 10^{-15}$
Iodes radioactifs	$1,9 \cdot 10^{-16}$
Emetteurs alpha (en aérosol)	$2,6 \cdot 10^{-14}$
Pour les rejets liquides:	
Tritium (sous forme HTO)	$9,5 \cdot 10^{-20}$
^7Be	$5,9 \cdot 10^{-18}$
Activités bêta/gamma (T < 1 jour)	$3,8 \cdot 10^{-18}$
Autres émetteurs bêta/gamma (T > 1 jour)	$7,1 \cdot 10^{-16}$
Emetteurs alpha	$7,2 \cdot 10^{-13}$

2 EVALUATION DES RISQUES RADIOLOGIQUES EN GENERAL

Le programme FLUKA est utilisé au CERN pour les études de blindage des accélérateurs et le calcul de la radioactivité induite. FLUKA simule la propagation des cascades initiées par n'importe quelle particule de haute énergie jusqu'à 20 TeV. Les composantes les plus importantes du champ de rayonnements (hadrons, électrons, photons, neutrons thermiques) peuvent être transportées en un seul passage du programme avec le même degré d'exactitude jusqu'à des énergies très basses (thermiques pour les neutrons et 1 keV pour toute autre particule). La modélisation de la physique qui est à la base du programme, ainsi que les sections efficaces sont mises à jour continuellement et le programme est régulièrement soumis à des vérifications expérimentales. Une description plus détaillée du programme FLUKA est donnée dans l'annexe A2 de ce chapitre.

2.1 La transformation des champs de rayonnements en dose

L'équivalent de dose dans une simulation FLUKA peut être estimé par trois moyens:

- en multipliant la dose (l'énergie déposée) par un facteur de qualité ;
- en multipliant la densité des interactions inélastiques produites par les particules dans la cascade ayant une énergie supérieure à 50 MeV (les étoiles) par un facteur prédéterminé ;
- en multipliant le flux des particules par des facteurs de conversion qui sont proposés par la Commission Internationale de la Protection Radiologique (CIPR) et qui dépendent de l'énergie et du type de particule.

Ces trois méthodes donnent des résultats tout à fait consistants. Elles sont comparées et discutées en annexe A3 de ce chapitre.

2.2 L'évaluation de la radioactivité

Les composants de la machine

La radioactivité dans les éléments de la machine, constitués essentiellement de fer ou de cuivre, peut être estimée sur la base du nombre des interactions inélastiques engendrées par un hadron d'une énergie supérieure à 50 MeV (étoiles) dans ces éléments. En effet, l'activité de saturation est proportionnelle au taux de production d'étoiles. En ce qui concerne la nature des radionucléides créés, cette méthode se base sur une longue expérience autour des accélérateurs et donne des résultats tout à fait satisfaisants. Néanmoins, des travaux se poursuivent en vue de créer un inventaire des sections efficaces pouvant entraîner la production de radionucléides dans des matériaux comme le fer ou le cuivre à partir de spectres de longueurs de traces de différents hadrons en fonction de l'énergie fournie par les simulations de FLUKA [Huh98a]. Ces sections efficaces existent déjà pour les matériaux de structure légère comme l'aluminium, ce qui permet de calculer directement, par exemple, la production de ^{24}Na et de ^{22}Na . On dispose également de sections efficaces partielles pour la production de tritium et de ^7Be dans les noyaux en graphite des blocs absorbeurs.

La roche et l'eau souterraine

La radioactivité dans la roche entourant les structures du LHC peut également être estimée à partir du taux de production d'étoiles dans la roche. Des mesures expérimentales obtenues au Synchrotron à proton (PS) du CERN et au Fermilab aux Etats Unis ont permis d'estimer le rapport de la section efficace de production des principaux radionucléides à la section efficace de production d'étoiles. Des travaux se poursuivent actuellement en vue de réviser ces sections efficaces de production sur la base des données concernant la molasse prélevée autour des excavations pour le LHC [Ste98a]. Suite à des expériences au Fermilab, les seuls isotopes créés dans la molasse et pouvant être entraînés par les eaux souterraines et éventuellement transportés à une certaine distance de l'accélérateur sont le tritium et le ^{22}Na [Aws71]. La détermination expérimentale des fractions entraînées et des probabilités de réabsorption, ainsi que le débit de l'eau dans la molasse, permettent d'estimer la production possible dans l'eau potable.

L'air

Des sections efficaces en fonction de l'énergie et du type de hadron ont été déterminées pour 39 radionucléides de période inférieure à quelques minutes qui peuvent être produits par l'interaction avec des noyaux de carbone, d'azote, d'oxygène et d'argon dans l'air [Huh96a,b]. Cela permet d'estimer la production de ces radionucléides sur la base de simulations avec FLUKA utilisant la longueur de trace des hadrons dans les différents volumes d'air en fonction de l'énergie. La détermination de la concentration de ces nucléides dans l'air et de leur rejet par le système de ventilation tient compte de la variation dans le temps des pertes de faisceau dans le LHC ainsi que de la configuration du système de ventilation. Il convient de considérer, pour les différentes parties du LHC, trois modes d'écoulement de l'air:

- un écoulement laminaire au-delà de la zone de perte du faisceau ;
- un mélange complet de l'air dans la zone d'activation avec une évacuation et un remplacement partiels de l'air dans cette zone ;
- une activation instantanée, comme dans le cas de l'air dans la région d'absorption du faisceau, avec une évacuation par écoulement laminaire ou par mélange avec évacuation et remplacement partiels.

Pour les estimations, on a utilisé le mécanisme d'activation et d'évacuation le mieux approprié dans chaque cas.

L'eau de refroidissement et l'eau de drainage

La production de radionucléides dans les circuits d'eau de refroidissement et dans les conduites d'écoulement d'eau noyées dans le béton peut être estimée, soit à partir des sections efficaces concernant la radioactivité dans l'air et les longueurs de trace des hadrons dans les conduites, soit à partir des sections efficaces partielles et des densités d'étoiles dans l'eau. Ces valeurs sont estimées directement ou, si les dimensions des conduites sont trop faibles pour que les simulations donnent des résultats significatifs, à partir des densités d'étoiles dans l'objet métallique ou le béton entourant ces conduites.

Il est également tenu compte de la variation de la production avec le temps pendant un remplissage du LHC, ainsi que de la décroissance pendant l'intervalle de temps où l'eau passe de la région d'activation au point de rejet.

Les autres fluides

L'activité dans l'hélium liquide des circuits cryogéniques est estimée sur la base du rapport de la section efficace partielle de production des différents radionucléides à la section efficace de production d'étoiles et à la densité d'étoiles dans le liquide cryogénique. Cette estimation était faite à partir de la densité d'étoiles dans les objets solides entourant les liquides. Le tritium est le seul radionucléide à considérer dans l'hélium liquide.

2.3 Radioactivité induite et débit de dose

Pour les matériaux courants, une proportionnalité a été établie entre le débit de dose à la surface dû à la radioactivité induite et le nombre des interactions inélastiques produites dans ces matériaux par les particules de la cascade ayant une énergie supérieure à 50 MeV. Dans cette méthode, la densité des étoiles que le programme FLUKA permet de calculer est mise en relation avec le débit de dose mesuré au contact du matériel. Dans le cas du fer, la proportionnalité a été établie et est exprimée par le facteur ω :

$$\omega\{30,1\} = 10^{-8} \text{ Sv h}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$$

Le facteur $\omega\{30,1\}$ représente le débit de dose gamma au contact après une irradiation de 30 jours suivie d'un jour de refroidissement.

L'activité pour les différents temps d'irradiation et de décroissance peut être estimée au moyen de la formule de Sullivan-Overton [Sul65]. Cette méthode ne donnera que des estimations de la radioactivité avec une précision d'un facteur deux à trois pour des temps de décroissance d'un an environ, mais peut conduire à des surestimations pour des temps de décroissance plus longs.

Dans le cas où les sections efficaces sont bien connues, FLUKA permet de calculer les sources photoniques qui sont le résultat de la radioactivité induite dans un matériel. Un programme complémentaire, FIASCO, développé au CERN, transporte ces photons par le matériel en utilisant une procédure «point-kernel» pour déterminer le débit de dose en $\mu\text{Sv/h}$ à la surface [Huh98b].

2.4 Description des risques radiologiques du LHC en général

Accélérateur en fonctionnement

Pendant le fonctionnement normal de l'accélérateur, les débits de dose dans les seules zones accessibles, les cavernes de services, resteront largement en dessous des valeurs limites pour une zone contrôlée et ne dépasseront pas 10 $\mu\text{Sv/h}$. Néanmoins, une perte de faisceau accidentelle dans l'accélérateur pourra causer une augmentation du niveau de rayonnements ionisants dans ces cavernes de service (voir chapitre VIII). Pour un tel événement, cette valeur est fixée à 50 mSv, comme expliqué au paragraphe 1.6 de ce chapitre [Höf95b].

La couche de roche et de terre, d'une épaisseur variant de 50 à 100 m, qui recouvre le tunnel du LHC, assure un blindage suffisant de la machine et des expériences. Les risques pour l'environnement pendant le fonctionnement du LHC ne sont donc dus qu'aux rayonnements diffusés par les puits qui relient les ouvrages souterrains à la surface et aux rejets d'eau et d'air. D'une façon générale, pour une perte de faisceau accidentelle dans l'accélérateur, les valeurs de dose annuelles sont limitées à 2,5 mSv pour une zone surveillée et à 0,3 mSv pour une zone non réglementée. Les doses dues aux muons produits par l'interaction des protons avec différents composants de la machine et des détecteurs restent confinées en sous-sol. On trouve description plus détaillée des risques pour l'environnement dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement» [Höf97].

Accélérateur à l'arrêt

En période d'arrêt, les risques radiologiques dans les zones souterraines sont essentiellement dus à l'activation des matériaux qui varie d'un octant à l'autre selon les pertes de faisceau dans les différentes zones. Les risques d'irradiation pour le personnel sont liés aux travaux d'entretien soit sur les détecteurs, soit sur les différents composants de la machine. A cause de faibles pertes de faisceau attendues dans les sections courbes, les débits de dose dus à la radioactivité induite dans la plupart de la machine resteront en général en dessous de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$. La radioactivité induite sera surtout concentrée autour des quelques zones (voir paragraphe 1.2 de ce chapitre).

Suite à l'activation de la machine et de ses composants ainsi que d'une partie de l'équipement expérimental, un risque radiologique pour l'environnement est représenté par les pièces activées pouvant sortir de la machine et des zones expérimentales pendant les périodes de maintenance de la machine et des détecteurs. En ce qui concerne l'impact de cette radioactivité induite sur l'environnement, il faut souligner que les composants radioactifs du collisionneur n'emprunteront pas les routes publiques mais seront généralement véhiculés à l'intérieur du tunnel vers le puits PM18 pour être réparés dans le hall SM18. Tous les travaux sur des matériaux radioactifs seront effectués dans des zones contrôlées, convenablement agencées, parfois blindées pour ce genre de travail et à l'intérieur de la clôture sur les sites du CERN.

2.5 Autres risques radiologiques

Les risques radiologiques autres que les rayonnements diffusés pendant le fonctionnement du LHC et les expositions possibles dues à la radioactivité à l'arrêt, sont les sources radioactives utilisées par les physiciens pour la calibration de leurs détecteurs. Toutes les sources radioactives sont répertoriées et contrôlées périodiquement suivant le règlement en vigueur au CERN

[CERN96]. Ces sources sont en grande partie installées à l'intérieur de grands détecteurs et ne posent donc pas de problème radiologique du fait qu'elles sont blindées par la masse des détecteurs. Les autres sources mobiles seront gardées dans des châteaux-forts blindés quand elles ne seront pas utilisées.

3 LES RISQUES RADIOLOGIQUES SPECIFIQUES

Octant 1

L'octant 1 du LHC abrite en particulier l'expérience de haute luminosité ATLAS.

Accélérateur en fonctionnement

Risques pour le personnel

L'épaisseur du blindage autour de l'expérience ATLAS a été calculée (voir paragraphe 1.6 de ce chapitre) pour que le débit de dose pendant le fonctionnement normal du LHC ne dépasse pas 10 $\mu\text{Sv/h}$ dans la caverne de service de l'expérience [Fer95a]. Un minimum de 2 m de béton a été spécifié pour le blindage latéral [Fer95b].

Une autre étude s'est penchée sur les débits de dose possibles dans la caverne de service accessible pendant le fonctionnement du LHC, causés par des muons créés dans les expériences ou dus à une perte totale de faisceau de protons dans l'expérience ou dans la machine. Pour ce dernier cas, l'équivalent de dose maximal possible est de 840 μSv [Pot95].

Risques pour l'environnement

Dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement», les rayonnements diffusés passant par les puits d'accès ont été considérés. Un blindage supplémentaire nécessaire pour boucher ces puits a été calculé. Il mesurera 1,2 m pour le puits PX15 et 0,8 m pour le puits PX16 [Fer96]. Pour une telle configuration, le débit de dose dans les bâtiments en surface est limité à 1 $\mu\text{Sv/h}$ de telle façon que ces zones puissent être considérées comme zones surveillées. Ainsi, l'influence du fonctionnement du LHC sur l'environnement restera en dessous de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ à la clôture du domaine du CERN.

Dans l'octant 1, se trouve également le puits PM18 identifié comme une source potentielle de rayonnements diffusés pour l'environnement [Höf97]. Un blindage supplémentaire en bas de ce puits est prévu d'être composé d'une plaque horizontale de béton couvrant la moitié de la surface du puits et d'un mur vertical, également en béton, d'une épaisseur de 1,2 m. Cette construction est complétée par un blindage mobile permettant le passage d'équipement lourd dans le tunnel du LHC. Dans le blindage ajouté se trouve un labyrinthe d'accès qui ne sera utilisé que comme sortie de secours. Comme le puits PM18 ne servira pas comme point d'accès à la machine, le blindage actuel en haut du puits ne changera pas. Une grande attention sera portée sur le passage des tuyaux qui seront blindés spécialement [Ste98a]. Les doses en surface seront ramenées aux valeurs qui correspondent à celles d'une zone surveillée pour des pertes de faisceau maximales.

Les rejets de la radioactivité dans l'air et l'eau à partir du point 1 ont été calculés et sont présentés dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement».

Accélérateur à l'arrêt

A l'arrêt du LHC, les débits de dose à l'intérieur et autour de l'expérience ATLAS causés par des pertes de faisceau sont à considérer. La valeur maximale du débit de dose calculé, pour la partie avant du détecteur dans lequel la plus grande partie des particules secondaires issues des interactions se perdent, est de 300 $\mu\text{Sv/h}$ pour une activation de 30 jours et un temps de refroidissement d'un jour. Cependant, les valeurs typiques sont plutôt de l'ordre de 30 $\mu\text{Sv/h}$ [ATL94].

Des valeurs encore plus importantes ont été calculées autour des collimateurs qui protègent le triplet des quadripôles des particules secondaires originaires des interactions dans l'expérience. Des débits de dose locaux de l'ordre de 50 mSv/h sont prévus, ce qui nécessite la création de zones de restriction locales et probablement la présence d'un équipement de commande à distance pour effectuer des interventions [Daw98a].

Le débit de dose maximal sur les absorbeurs des faisceaux neutres sera d'une centaine de mSv/h suite à une irradiation de 30 jours suivie d'un temps de refroidissement d'un jour [Mok94].

Octant 2

Au point 2 du LHC, qui abrite l'expérience à basse luminosité ALICE, trois puits relient les zones souterraines à la surface. Le PX24 est le puits d'accès. Il sera utilisé pour l'installation des composants du détecteur et abritera la caverne de service de l'expérience. La ligne de faisceau du LHC le traverse directement, c'est à dire qu'il a une vue directe sur les faisceaux.

Le PM25 donne accès soit à la zone dite de «by-pass», soit à la caverne de l'expérience par deux tunnels de part et d'autre du détecteur. Le PGC2 se trouve en aval du détecteur au dessus de la jonction, entre le tunnel «by-pass» et le tunnel machine [ALI95].

Accélérateur en fonctionnement

Risques pour le personnel

La situation radiologique suite à une perte totale du faisceau a été étudiée en détail, tenant compte des conditions les plus défavorables pouvant se présenter: pour le puits PX24, une perte du faisceau dans le triplet des quadripôles; pour le PM25 une perte du faisceau près des accès des tunnels qui relient la zone de «by-pass» avec la caverne d'expérience; pour le PGC2 une perte de faisceau dans la caverne de jonction UJ26 entre la zone «by-pass» et le tunnel machine, en face de l'entrée du tunnel d'accès. Les calculs ont montré que le blindage prévu pour le PX24 et le PM25 est suffisant pour garantir que la dose ne dépassera pas les valeurs limites établies même pour une situation accidentelle [Roe97b, Roe98b]. Pour le PGC2, on augmentera le blindage au dessus de la ligne de faisceau et on ajoutera un bras à la chicane d'accès [Mor98]. Pendant le fonctionnement du LHC, la caverne de service est classée zone contrôlée.

Risques pour l'environnement

Les blindages prévus en bas du puits autour des quadripôles «faible bêta» garantissent que les doses dans l'environnement dues aux rayonnements diffusés seront négligeables pendant le fonctionnement normal du collisionneur et suite à une perte de faisceau. Les zones en surface autour des puits PX24 et PM25 sont des zones surveillées, tandis qu'après l'augmentation du blindage au

dessus de la ligne de faisceau et en ajoutant un bras à la chicane d'accès, la zone en surface autour du puits PCG2 est considérée comme zone non réglementée [Roe98b].

Les rejets de la radioactivité dans l'air et dans l'eau à partir du point 2 ont été calculés et sont présentés dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement».

Accélérateur à l'arrêt

Les zones où l'on peut s'attendre à des débits de dose élevés suite aux phénomènes d'activation sont les zones des quadripôles «faible bêta» et les parties internes du détecteur qui entourent le point d'interaction. Vu les intensités limitées des protons et des faisceaux d'ions, les débits de dose maximaux autour des éléments les plus touchés sont de l'ordre de 100 $\mu\text{Sv/h}$ [Mor98].

Octant 3

Ce point abrite les collimateurs secondaires (*momentum scrapers*) Ces collimateurs n'intercepteront qu'un millième des particules par rapport aux collimateurs principaux (*bêatron scrapers*) installés au point 7.

Accélérateur en fonctionnement

Risques pour le personnel

Les zones souterraines ne sont pas accessibles pendant le fonctionnement de la machine et, par conséquent, aucun risque radiologique n'est à considérer pour le personnel.

Risques pour l'environnement

Les rejets des rayonnements diffusés et la radioactivité dans l'air et l'eau à partir du point 3 ont été calculés et figurent dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement».

Accélérateur à l'arrêt

La zone des collimateurs est une des zones où la radioactivité induite est concentrée. Même si la plus grande partie des pertes de protons est localisée au point 7, tout travail dans les sections droites, de part et d'autre du point 3, sera strictement contrôlé. Une estimation des débits de dose dans cette zone est actuellement en cours.

Octant 4

L'octant 4 abrite le système d'accélération à haute fréquence. Cette section n'est pas une section de perte de faisceau mais peut poser des problèmes radiologiques à cause de la présence et du fonctionnement du système d'accélération.

Accélérateur en fonctionnement

Risques pour le personnel

Les zones souterraines n'étant pas accessibles pendant le fonctionnement de la machine, il n'y a pas de risque radiologique à considérer pour le personnel.

Risques pour l'environnement

Les rejets de la radioactivité dans l'air et l'eau à partir du point 4 ont été calculés et sont présentés dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement».

Accélérateur à l'arrêt

Risques pour le personnel

Après l'expérience avec le LEP, l'évolution des débits de dose dus à la radioactivité induite dans les cavités accélératrices seront suivis continuellement. Une attention particulière sera portée sur toute la zone d'accélération à haute fréquence qui peut fonctionner en mode test sans que le LHC soit en marche. Un système d'accès spécial sera installé pour isoler cette partie de l'accélérateur (zone contrôlée) du reste de l'anneau.

Octant 5

L'octant 5 du LHC abrite en particulier l'expérience de haute luminosité CMS [CMS94].

Accélérateur en fonctionnement

Risques pour le personnel

L'épaisseur du blindage autour de l'expérience CMS a été calculée (voir le paragraphe 1.6 de ce chapitre) pour que les débits de dose pendant le fonctionnement normal du LHC ne dépassent pas 10 $\mu\text{Sv/h}$ dans la caverne de service de l'expérience. Une épaisseur de 3 m de béton pour le blindage latéral a été retenue [Huh95]. La protection des physiciens travaillant dans la caverne de service en souterrain contre les rayonnements ionisants qui pénètrent par des voies d'accès et d'autres brèches nécessaires pour passer des câbles et des tuyaux, doit également être considérée. Il a été montré que les constructions proposées garantissent que les débits de dose restent en dessous de 10 $\mu\text{Sv/h}$ dans cette caverne accessible pendant le fonctionnement du LHC [Huh96c].

Risques pour l'environnement

L'environnement peut être influencé par les rayonnements diffusés passant par les puits d'accès. Les blindages nécessaires pour boucher les puits ont été calculés et ont des dimensions de 1,7 m et 0,5 m pour les puits PX56 et le PM54 respectivement [Huh95]. Pour une telle configuration, le débit de dose dans les bâtiments en surface est limité à 1 $\mu\text{Sv/h}$ de façon à ce que ces zones soient considérées comme zones surveillées. L'influence du fonctionnement du LHC sur l'environnement restera en dessous de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ à la clôture du site.

Les rejets de la radioactivité dans l'air et l'eau à partir du point 5 ont été calculés et sont présentés dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement».

Accélérateur à l'arrêt

Comme dans le cas de l'expérience ATLAS, les débits de dose dans la caverne expérimentale sont tels qu'elle sera déclarée zone contrôlée.

Octant 6

Cet octant abrite deux systèmes d'extraction de faisceaux. Les protons sont envoyés via les tunnels TD vers les deux blocs absorbeurs installés dans deux cavernes UD situées de part et d'autre

à 750 m du point 6. Ces cavernes n'ont pas de puits d'accès et ne sont accessibles que par le tunnel du LHC. Les zones souterraines du point 6 sont reliées à la surface par trois puits: le PM65, le PX64 et le PZ65.

Accélérateur en fonctionnement

Risques pour le personnel

Ni les cavernes des blocs absorbeurs UD, ni la caverne principale US65 ne sont accessibles pendant le fonctionnement de la machine et, par conséquent, aucun risque radiologique n'est à considérer pour le personnel. Il faut souligner qu'une perte totale accidentelle du faisceau dans un des composants du système de décharge engendrerait dans la caverne principale au point 6 une dose équivalente ambiante 1000 fois supérieure à la limite pour une zone contrôlée [Roe97a].

Risques pour l'environnement

Deux faisceaux intenses de muons de haute énergie sont produits par les protons arrêtés dans les blocs absorbeurs. Ces muons se propagent en ligne droite sur une distance de plusieurs kilomètres mais restent en sous-sol; ils ne représentent pas de risque radiologique pour l'environnement, comme il a été montré dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement». Les rejets calculés de la radioactivité dans l'air et l'eau à partir du point 6 y sont également présentés.

Accélérateur à l'arrêt

Risques pour le personnel

Les blocs absorbeurs sont contenus dans des blindages en fer qui garantissent que les débits de dose dus à la radioactivité induite dans les cavernes UD restent limités à quelques dizaines de $\mu\text{Sv/h}$ avec un maximum de $80 \mu\text{Sv/h}$ après un jour de refroidissement. Pour toute intervention dans les cavernes, des débits de dose, pouvant atteindre 3 mSv/h à l'intérieur du blindage, sont à considérer [Daw98b]. Des procédures spécifiques et des moyens de protection supplémentaires (protections biologiques ou systèmes de manipulation à distance) seront mis en place afin de garantir que les doses aux intervenants ne dépassent pas les valeurs limites.

Octant 7

Cette section abrite les collimateurs principaux. A peu près un quart des protons de chaque faisceau est perdu à cet endroit. A cause de l'énergie déposée dans les composants situés en aval des collimateurs, une partie des aimants dans cet octant n'est pas supraconductrice mais plutôt classique. Un seul puits, le PM76, relie le tunnel à la surface.

Accélérateur en fonctionnement

Risques pour le personnel

Les zones souterraines ne sont pas accessibles pendant le fonctionnement de la machine. Il n'y a donc pas de risque radiologique à considérer pour le personnel.

Risques pour l'environnement

Dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement», il est démontré que le blindage actuel du puits PM76 suffit pour qu'il n'y ait pas de diffusion des rayonnements ionisants [Höf97]. Par contre, sans blindage, la radioactivité induite dans la molasse serait notable.

Bien que les valeurs calculées ne posent pas de problème pour l'environnement, il est prévu d'installer des blindages autour des éléments de la machine les plus irradiés pour protéger le personnel intervenant. Ces mesures auront aussi un effet favorable en ce qui concerne l'activation de la molasse.

Accélérateur à l'arrêt

Sur les collimateurs installés dans les sections droites de part et d'autre du point d'interaction, $4 \cdot 10^{16}$ protons par faisceau et par an seront perdus. Un débit de dose de quelques mSv/h est attendu dans ces zones de collimateurs après quelques mois de fonctionnement et un jour de refroidissement. Tout travail dans ces zones doit être strictement contrôlé. Les calculs de simulation de pertes ont commencé et donnent une première idée sur la distribution de pertes dans la zone des collimateurs principaux. Ces calculs doivent être complétés par des estimations sur la distribution de la radioactivité induite [Azh98].

Octant 8

Accélérateur en fonctionnement

Risques pour le personnel

L'expérience LHC-B sera installée dans la caverne existante au point 8 [LHB95] et les physiciens préconisent d'avoir leur zone de service près de l'expérience. Cela a nécessité la construction d'un mur de blindage d'une épaisseur suffisante couvrant la quasi totalité de la surface de la caverne existante [Nak97]. Une épaisseur de 3 m a été retenue pour la partie inférieure du mur alors qu'une épaisseur de 2 m sera suffisante pour sa partie supérieure. [Roe97b].

Risques pour l'environnement

Les rejets de la radioactivité dans l'air et l'eau à partir du point 8 ont été calculés et sont présentés dans le rapport «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement».

Accélérateur à l'arrêt

Les zones où l'on peut s'attendre à des débits de dose élevés suite à l'activation sont les quadripôles «faible bêta» et les parties internes du détecteur. Les intensités de protons dans l'expérience LHC-B étant limitées, les débits de dose maximaux autour des éléments les plus touchés ne sont que de l'ordre de $100 \mu\text{Sv/h}$.

4 REFERENCES

- ALI95 ALICE, Technical proposal for A Large Ion Collider Experiment at the CERN LHC, CERN/LHCC/95-71, LHC/P3 (1995)
- ATL94 ATLAS, Technical proposal, CERN/LHCC/94-43, LHC/P2 (1994)
- Aws71 M. Awschalom, Calculation of the radionuclide production in the surroundings of the NAL neutrino laboratory, Fermilab Internal Report TM-292-A, (1971)
- Azh98 I. Azhgirey, I. Baishev, N. Catalan Lasheras and J. B. Jeanneret, Cascade simulations for the LHC betatron cleaning insertion, LHC Project Report 184 (1998)

- Bur93 L. Burnod and J. B. Jeanneret, Updating the systematic losses, LHC Note AC/DI/FA93-02, (1993)
- CERN96 Manuel de Radioprotection 1996, CERN, (1996)
- CIPR77 Recommendations of the ICRP, Publication 26, Annals of the ICRP 1, 4 (1977)
- CIPR91 ICRP Publication 60, Recommendations of the ICRP, Annals of the ICRP 21, 1 (1991)
- CMS94 CMS94 CMS, Technical proposal, CERN/LHCC 94-38, LHCC/P1, (1994)
- Daw98a I. Dawson and G. R. Stevenson, Radiation studies in the collimator regions of the ATLAS experimental area, CERN/TIS-RP/IR/98-01 (1998)
- Daw98b I. Dawson and G. R. Stevenson, Radiological impact of the LHC beam-dumps, CERN/TIS-RP/IR/98-27 (1998)
- Dir96 Directive 96/29/Euratom du Conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, Journal officiel des communautés européennes, No L. 159 du 29 juin 1996, page 1, (1996)
- Fer95a A. Ferrari, K. Potter and S. Rollet, Lateral shielding requirements for the ATLAS experimental region, CERN/AT-XA/02N/1995
- Fer95b A. Ferrari, K. Potter and S. Rollet, Shielding for the ATLAS experimental region, CERN/LHC Project Note/1995
- Fer96 A. Ferrari, K. Potter, S. Rollet and P. R. Sala, Radiation calculations for the ATLAS detector and experimental hall, CERN-EST/96-01 (LEA), (1996)
- Fer98 A. Ferrari and M. Pelliccioni, Fluence to dose equivalent conversion data and effective quality factors for high-energy neutrons, Radiation Protection Dosimetry 76, 215 (1998)
- Höf95a M. Höfert et G. R. Stevenson, Design limits for doses and dose rates from beam operation at the LHC, CERN/TIS-RP/IR/95-04 et LHC Note 309 (1995)
- Höf95b M. Höfert, K. Potter and G. R. Stevenson, Summary of design values, interaction rates etc. for use in estimating radiological quantities associated with LHC operation, CERN/TIS/IR/95-19 (1995)
- Höf97 M. Höfert, L. Moritz et G. R. Stevenson, Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement, CERN/TIS-RP/97-06 (1997)
- HSK97 Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen, HSK-R-41/d (Juli 1997)
- Huh95 M. Huhtinen and G. R. Stevenson, Shielding requirements in the CMS Experimental region, CERN/TIS/IR/95-15 (1995)
- Huh96a M. Huhtinen, L.E. Moritz, K.M. Potter, S. Rollet and G.R. Stevenson, Radiological implications of the release of air from the LHC experimental regions, CERN/TIS-RP/96-6 (1996)
- Huh96b M. Huhtinen, L.E. Moritz, G.R. Stevenson and J.M. Zazula, An assessment of the release of radioactive air produced in the LHC dump caverns, CERN/TIS-RP/IR/96-18 (1996)
- Huh96c M. Huhtinen and G. R. Stevenson, Radiological impact of access ways and other shield penetrations in the CMS experimental area, CERN/TIS-RP/IR/96-24 (1996)

- Huh98a M. Huhtinen and P. Aarnio, Production of long-lived radionuclides in CMS, CMS Note 1998/044 (1998)
- Huh98b M. Huhtinen, Method for estimating dose rates from induced radioactivity in complicated accelerator geometries, CERN/TIS-RP/IR/98-28 (1998)
- IAEA80 International Atomic Energy Agency, Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, IAEA Safety Guide No. 50-SG-S3 (1980)
- Lef95 P. Lefèvre and T. Pettersson (Editors), The Large Hadron Collider, Conceptual Design, CERN/AC/95-05 (LHC) (1995)
- LHB95 The LHC-B Collaboration, A dedicated LHC collider beauty experiment for precision measurements of CP-violation, CERN/LHCC95-5 (1995)
- Mok94 N. Mokhov and G. R. Stevenson, Radiation considerations in the design of the neutral dump close to LHC Interaction region, CERN/TIS-RP/IR/94-17 (1994)
- Mor98 A. Morsch and S. Roesler, Radiation studies for the ALICE environment using FLUKA and ALIFE, CERN EST/98-03 (LEA), CERN ALICE/PUB 98-19 (1998)
- Nak97 H. Nakashima, M. Huhtinen and G. R. Stevenson, Radiation calculations for some possible configurations of the shielding for the LHC-B detector, CERN/TIS-RP/IR/97-04 (1997)
- ORaP94 Ordonnance suisse sur la radioprotection du 22 juin 1994 (1994)
- Pot95 K. M. Potter, Muons and the electronics caverns of the LHC experiments, CERN AC/95-03, LHC Note 321 (1995)
- Roe97a S. Roesler et G.R. Stevenson, The radiation environment at IP 6 in beam loss situations, CERN/TIS-RP/TM/97-36 (1997)
- Roe97b S. Roesler and G.R. Stevenson, Radiation studies for the design of the main shielding wall of the LHC-B experiment, CERN/TIS-RP/IR/97-31 (1997)
- Roe98b S. Roesler and G.R. Stevenson, The radiation environment at the LHC insertion point 2 (ALICE) in beam loss situations, CERN/TIS-RP/IR/98-10 (1998)
- San93 A. V. Sannikov and E. N. Saviskaya, Ambient dose and ambient dose equivalent conversion factors for high-energy neutrons, CERN Divisional Report CERN/TIS-RP/IR/93-14/PP (1993)
- Ste86 G. R. Stevenson, Dose equivalent per star in hadron cascade calculations, CERN/TIS-RP/173 (1986)
- Ste97 G. R. Stevenson, The implication of the ICRP Publication 74 for the design of the LHC shielding, CERN/TIS-RP/IR/97-15 (1997)
- Ste98a G. R. Stevenson, Further studies of the shielding of the PM18 shaft at point 1 of the LHC, CERN/TIS-RP/IR/98-21 (1998)
- Ste98b G. R. Stevenson and H. Vincke, Production of radioactivity in molasse, CERN/TIS-RP/IR/ en preparation
- Sul65 A.H. Sullivan and T.R. Overton, Time variation of the dose rate from radioactivity induced in high-energy particle accelerators. Health Physics, 11, 1101 (1965)
- Tho88 R. H. Thomas and G. R. Stevenson, The radiological safety aspects of the operation of proton accelerators, IAEA Technical Report Series No. 283, Vienna, (1988)
- Voj98 P. Vojtyla, Calculation of effective dose to the public due to releases from accelerator installations : Results for the CERN Meyrin site, CERN/TIS-RP/98-xx (1998)

5 ANNEXES

Annexe A1

La relation entre les trois conditions de perte de faisceau découle de l'argument suivant : un écran, servant à atténuer la dose due à une perte totale de $5 \cdot 10^{14}$ protons à 7 TeV jusqu'à 50 mSv, doit fournir un facteur d'atténuation de 10^{-4} pSv par proton de 7 TeV. Le SPS peut produire des protons de 450 GeV d'une intensité de $2,5 \cdot 10^{14}$ protons par seconde. Pour respecter la contrainte sur le débit de dose de 100 mSv/h, il faut un facteur d'atténuation de $1,1 \cdot 10^{-5}$ pSv par proton de 450 GeV. Ce chiffre est identique à l'atténuation requise pour la perte de protons de 7 TeV, puisqu'un proton de 7 TeV nécessite un facteur d'atténuation de $(7/0,45)^{0,8} = 9,0$ fois celui d'un proton de 450 GeV. En d'autres termes, un écran conçu pour blinder contre la perte d'un faisceau complet en orbite à l'énergie maximale du LHC blindera également contre la perte complète d'un faisceau injecté provenant du SPS.

Environ 2 TeV de l'énergie d'un proton de 7 TeV subissant une interaction inélastique dans une expérience à haute luminosité seront absorbés localement dans la cavité expérimentale sur des collimateurs en aval du point d'interaction. En conséquence, pour arriver à un débit de dose de $10 \mu\text{Sv/h}$ pour 10^9 protons interagissant à 7 TeV/s, il faut un facteur d'atténuation de $(2,8 \cdot 10^{-4}) \cdot 2/7$ pSv soit environ 10^{-5} pSv par proton de 7 TeV. Ces conditions sont dix fois plus rigoureuses que dans le cas de la perte d'un faisceau circulant de 7 TeV. Le blindage nécessaire pour faire face aux pertes dues aux collisions dans une expérience à haute luminosité apportera automatiquement une atténuation suffisante dans le cas d'une perte totale d'un faisceau circulant à haute énergie ou d'un faisceau injecté.

Pour les expériences qui ne nécessiteront pas de taux d'interaction maximum, (ALICE et LHC-B), les besoins en blindage se fondent sur les conditions les plus sévères requises pour le blindage contre les doses résultant des taux d'interaction ou des pertes complètes.

Annexe A2

Le programme Monte-Carlo FLUKA suit l'histoire de chaque particule individuellement (calcul analogique) mais dispose aussi de plusieurs options puissantes pour accélérer le calcul et réduire la variance, permettant ainsi de résoudre, par exemple, des problèmes de pénétration profonde:

- biaisage par sélection de la particule principale pour les électrons et les photons ;
- roulette russe et multiplication artificielle («splitting») lorsqu'une particule franchit une surface entre deux régions ou lorsque des secondaires sont produits dans une interaction de haute énergie ;
- biaisage du processus de diffusion par modification du débit de perte d'énergie et absorption non analogique des neutrons de faible énergie dans des régions définies par l'utilisateur ;
- biaisage de la longueur de désintégration pour favoriser la production de secondaires et du libre parcours moyen d'interaction inélastique ;
- fourchette de pondération dépendante de la structure régionale sur trois plages d'énergie.

FLUKA utilise la géométrie combinatoire de MORSE à laquelle de nouveaux corps ont été ajoutés (cylindre circulaire ou elliptique infini parallèle à n'importe quel axe du référentiel, plan générique ou perpendiculaire à un des axes). La distance jusqu'à la surface la plus proche est calculée systématiquement afin d'améliorer le rendement du programme. Le franchissement des

surfaces est considéré en détail en ce qui concerne le traitement des chocs multiples et la présence éventuelle de champs magnétiques. La stratégie globale du calcul des trajectoires a été modifiée en profondeur par rapport à celle du code original. La vitesse d'exécution a été améliorée et les liaisons avec différents aspects du transport des particules chargées (chocs multiples, mouvement dans un champ magnétique) ont été soigneusement définies. Il existe aussi la possibilité de définir des géométries répétitives (par symétrie de rotation, translation ou réflexion) permettant ainsi de décrire aisément des structures complexes.

FLUKA permet de calculer:

- la densité d'énergie déposée ou la densité d'interactions inélastiques (étoiles), soit dans des régions de l'espace définies individuellement, soit par des mailles définies par l'utilisateur et indépendantes de la géométrie utilisée ;
- le flux par longueur de cordes ou par nombre de chocs en fonction de l'énergie dans des mailles choisies par l'utilisateur ;
- le flux ou le courant en fonction du type et de l'énergie des particules franchissant la surface entre deux régions contiguës.

Les prédictions de FLUKA ont fait l'objet de nombreuses vérifications expérimentales par rapport à des quantités radiologiques, en particulier avec le champ de référence de la Commission des Communautés européennes installé au CERN. L'utilisation de FLUKA pour prédire les quantités radiologiques en rapport avec le LHC a également été présentée dans de nombreuses conférences.

Annexe A3

La première et la seconde méthode pour déterminer l'équivalent de dose à partir des résultats de FLUKA nécessitent que l'énergie de la densité d'étoiles soit enregistrée dans un matériau d'une certaine densité. Elles ne peuvent pas être employées si le matériau, pour un volume donné, a une faible densité comme l'air ou s'il s'agit de vide. La troisième méthode demande que la longueur de corde soit enregistrée dans une région donnée ou au niveau de la surface entre deux régions contiguës.

Par la première méthode, tous les constituants de la cascade, hadroniques et électromagnétiques, doivent être suivis jusqu'aux plus basses énergies de la simulation, ce qui nécessite un processus extrêmement long. De plus, il reste une incertitude dépendant du problème étudié en ce qui concerne le facteur de qualité à employer pour transformer l'énergie déposée en équivalent de dose. Par exemple, dans les études du blindage latéral pour le LHC, où ni les muons, ni les neutrons de basse énergie ne dominent le champs de rayonnement ionisant, un facteur de qualité de 10 convient.

La deuxième méthode présente l'avantage que les simulations deviennent extrêmement rapides car tous les éléments électromagnétiques de la cascade sont écartés et la coupure énergétique au niveau de laquelle les hadrons ne sont plus suivis peut être réglée à 50 MeV. L'inconvénient est qu'elle s'applique uniquement à des situations où la propagation du champ de rayonnement dépend des particules de haute énergie présentes. Elle ne peut donc être employée que pour une estimation du blindage latéral du LHC mais pas pour le calcul de l'efficacité des labyrinthes. Le coefficient utilisé pour convertir la densité d'étoiles en équivalent de dose se réfère à la dose équivalente ambiante basée sur la relation FQ-TLE de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) dans sa publication 21 [CIPR70, Tho88].

Enfin, la troisième méthode est utilisable, en principe, dans toutes les situations et pour tous les types de particules. L'expérience a montré cependant qu'il était indiqué de l'utiliser seulement avec les protons, les pions, les neutrons et les muons. La dose due à la composante électromagnétique, qui représente environ 20% de la dose équivalente totale dans la plupart des situations, peut être estimée séparément, puis ajoutée à la dose équivalente déterminée à partir de la fluence de particules. Dans de nombreuses études préliminaires de blindage, on ignore la composante électromagnétique pour économiser du temps de calcul et on introduit dans l'évaluation un niveau raisonnable de conservatisme. Dans le cas où la situation géométrique finale est connue, la composante électromagnétique est examinée comme il convient.

Les facteurs de conversion utilisés actuellement pour la conception du blindage du LHC sont ceux qui établissent une relation entre la fluence et la dose équivalente ambiante proposée dans [Ste86]. Ces facteurs sont très voisins de ceux publiés par la CIPR mais ils ont ensuite été légèrement modifiés après la publication des calculs de Sannikov et Savitskaya [San93]. Ils sont basés sur la relation FQ-TLE tirée de la Publication 21 de la Commission internationale de protection radiologique [CIPR70].

Dans sa Publication 60, la CIPR recommandait, au lieu de l'équivalent de dose, une nouvelle grandeur physique, la dose efficace, en tant que quantité dosimétrique de base sur laquelle doit être fondée la conception en matière de radioprotection [CIPR91]. L'estimation de cette quantité implique la détermination de la dose à partir d'une irradiation donnée de différents organes du corps humain (ou son calcul dans un fantôme défini mathématiquement), la multiplication de ces doses individuelles par des facteurs qui dépendent de la nature et de l'énergie du rayonnement incident afin de donner la dose équivalente dans chaque organe, et ensuite le calcul d'une somme pondérée de ces doses où les pondérations correspondent à l'importance du risque de cancer dans les différents organes. Cette somme pondérée est appelée dose efficace. Dans cette Publication, la CIPR a modifié la relation FQ-TLE pour tenter de faire concorder l'estimation numérique de la dose équivalente ambiante et l'estimation de la dose efficace pour une irradiation donnée.

En outre, la CIPR a proposé dans sa Publication 74 de nouveaux facteurs de conversion pour la conversion des fluences des neutrons au-dessous de 200 MeV en doses équivalentes ambiantes. Ces nouveaux facteurs suggèrent que dans certains champs de rayonnement ionisant au voisinage des accélérateurs de haute énergie, la dose équivalente ambiante ne soit plus un moyen d'estimation suffisamment prudent de la dose efficace. Il a cependant été montré que les facteurs de conversion utilisés en cas des analyses du blindage du LHC sous-estimaient de moins de 15% les estimations de doses efficaces les plus élevées [Ste97]. Ferrari et Pelliccioni ont proposé des facteurs de conversion moins conservateurs pour des neutrons d'une énergie supérieure à 200 MeV diminuant cette sous-estimation [Fer98]. En effet, les facteurs de conversion à retenir pour les protons et les pions de haute énergie font actuellement l'objet d'une importante controverse scientifique. Les conséquences pour les dimensions des blindages du LHC sont très limitées, puisque les spécifications dans les nouveaux travaux de génie civil pour le LHC ont été établies dans une optique conservatrice.

the 1990s, the number of people in the UK who are aged 65 and over has increased from 10.5 million to 13.5 million, and the number of people aged 75 and over has increased from 4.5 million to 6.5 million (Office for National Statistics 2000). The number of people aged 65 and over is expected to increase to 16.5 million by 2020, and the number of people aged 75 and over to 8.5 million (Office for National Statistics 2000).

There is a growing awareness of the need to address the needs of older people, and the need to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes. This is reflected in the UK Government's White Paper on Health and Social Care (Department of Health 1999), which sets out a vision of a health and social care system that is able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes.

The White Paper also sets out a number of key principles that should guide the development of the health and social care system, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes. The White Paper also sets out a number of key objectives that should be achieved by the health and social care system, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes.

The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes. The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes.

The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes. The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes.

The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes. The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes.

The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes. The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes.

The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes. The White Paper also sets out a number of key actions that should be taken to achieve these objectives, including the need to ensure that services are able to meet the needs of older people, and to ensure that they are able to live independently and actively in their own homes.

V INVENTAIRE DES RISQUES NON RADIOLOGIQUES ET PRINCIPE DE LEUR PREVENTION

1 RISQUE ELECTRIQUE

1.1 Inventaire des zones à risques électriques et de leurs composants

Cet inventaire couvre les ouvrages du LHC ainsi que les ouvrages communs du LHC et du SPS utilisés pour l'alimentation du réseau LHC.

Pour faciliter la compréhension de cet inventaire, il y a lieu de se reporter au paragraphe 3.7.3 du chapitre III (L'alimentation et la distribution électriques).

1.1.1 Locaux de service électrique (selon la norme UTE C12-100)

Postes d'arrivée 400 kV

- Trois travées de transformation 400/18 kV pour le SPS, deux travées 400/66 kV et six travées 66 kV pour le LHC, extensibles à huit travées.
- Poste extérieur classique répondant aux prescriptions EDF en vigueur, et aux termes de la norme UTE C13-200 pour la partie applicable par extension aux installations de tension supérieure à 66 kV.

Postes d'arrivée 66 kV et de transformation 66/18 kV

- Six postes en bâtiments SE 1, 2, 4, 6, 8 et BE9 ;
- Postes extérieurs classiques répondant aux termes de la norme UTE C13-200.

Sous-stations électriques principales de répartition 18 kV (bâtiments SE)

- Tableaux métalliques compartimentés (24 kV, CEI) à disjoncteurs débrochables, protection IP3. Réalisation en conformité avec la norme CEI 298 ;
- Groupe électrogène 400 V avec tableau de répartition (protection IP2) pour les alimentations de sécurité ;
- Transformateur 18kV/400V dans l'huile, entièrement capoté si installé à l'extérieur, moulé dans de la résine synthétique si installé à l'intérieur dans une enceinte de protection et tableau de répartition 400 V correspondant (protection IP2) pour assurer l'alimentation BT de la zone ;
- Auxiliaires (chargeurs et batteries 48 V) ;
- Câblage correspondant à ces équipements.

Postes renfermant les filtres et compensateurs 18 kV (adjacents aux bâtiments SE)

- Postes extérieurs exécutés en barres nues en conformité avec la norme UTE C13-200 et les prescriptions concernant les condensateurs de puissance (CEI 70).

Sous-stations 3,3 kV (bâtiments SU, SH et SHM)

Assurent l'alimentation des moteurs 3,3 kV des compresseurs.

- Tableaux métalliques compartimentés (7,2 kV, CEI), protection IP3, équipés de contacteurs ;
- Transformateurs extérieurs 18 kV/3,3 kV dans l'huile, entièrement capotés ;

- Câblage correspondant à ces équipements.

Alvéoles électriques dans le tunnel du LHC

Seize alvéoles RE, ainsi que US15 - UJ33 - UJ56 - UJ76.

- Poste en coupure d'artère 18 kV (technique SF6), protection IP3 ;
- Transformateur sec 18kV/400 V moulé dans de la résine synthétique ininflammable ;
- Tableau de répartition 400 V (protection IP2) ;
- Auxiliaires de la sous-station (chargeurs et batteries 48 V) ;
- Racks de contrôle ;
- Ensemble du câblage correspondant.

1.1.2 Bâtiments de surface à usage semi-industriel ou expérimental

Bâtiments de surface renfermant les alimentations (distribution 400 V) des éléments de l'accélérateur LHC et leurs organes de contrôle (redresseurs, convertisseurs) : bâtiments SR et SM18

- Redresseurs jusqu'à 700 V et 13 kA, courant continu, sous enveloppe métallique ;
- Transformateurs 18 kV/BT entièrement capotés installés à l'extérieur ;
- Transformateurs associés à des redresseurs, constituant un ensemble monobloc immergé dans l'huile, installés à l'extérieur, destinés à l'alimentation des systèmes radio fréquence (tension continue de sortie 100 kV, bornes THT dans l'huile). Raccordement 100 kV aux systèmes RF par câbles blindés. Ensemble alimenté à 18 kV-50 Hz. Régulation au niveau 1 kV par thyristors, sous enveloppe métallique, installés à l'intérieur ;
- Tableaux de distribution 400 V, 50 Hz, protection IP2, des racks de contrôle alimentés en 400 V alternatif ;
- Installations de chauffage électrique et de ventilation et un pont roulant ;
- Distribution par câbles pour l'ensemble de ces équipements.

Bâtiments de pompage et tours de refroidissement SF

- Transformateur 18 kV/400 V, type extérieur dans l'huile, entièrement capoté, ou type intérieur moulé dans de la résine synthétique avec une enceinte de protection ;
- Tableaux BT, protection IP2 ;
- Distribution 400 V, 50 Hz.

Bâtiments de ventilation SU

- Transformateurs 18 kV/400 V, type extérieur dans l'huile, entièrement capotés, ou de type intérieur moulé dans de la résine synthétique avec une enceinte de protection ;
- Tableaux BT, protection IP2 ;
- Distribution et moteurs 400 V ;
- Pont roulant ;
- Câblage correspondant à ces équipements ;
- En SU2, SU4, SU6, SU8: sous-stations 3,3 kV.

Bâtiments pour la cryogénie SUH, SH et SHM

- Moteurs 3,3 kV des compresseurs d'hélium alimentés par une sous-station adjacente aux bâtiments SU ;

- Tableaux de distribution BT, protection IP2 ;
- Moteurs 400 V ;
- Câblage correspondant.

Bâtiments gaz SG

- Distribution 400 V antidéflagrante dans la partie du local à risque d'explosion.

Bâtiments d'accès, SD et PZ 33 et leurs locaux annexes; bâtiments de montage des expériences SX.

- Matériel de levage 400 V (ponts roulants, ascenseurs) ;
- Matériel de ventilation 400 V ;
- Distribution 400 V pour petits ateliers et locaux de contrôle ;
- Transformateurs 18 kV/400 V moulés, avec enceinte de protection ;
- Redresseur BT 30 kA, 150 V et son transformateur dans l'huile à l'extérieur (en SX2 pour l'expérience en UX25) ;
- Groupe électrogène 400 V et chargeurs de batterie pour organes de sécurité (uniquement en PZ 33).

1.1.3 Ouvrages souterrains à usage semi-industriel et expérimental

Salles de pompage en UW

- Protection IP2; un pont roulant ;
- Tableaux de distribution BT ;
- Distribution et des moteurs 400 V.

Zone de service US

- Transformateurs secs 18 kV/400 V, moulés dans de la résine synthétique ininflammable, avec une enceinte de protection (un transformateur pour les services généraux de la zone souterraine, les autres pour les besoins des expériences et du collisionneur) ;
- Racks d'alimentation pour les pompes ioniques, tension continue <8kV, courant continu <1A ;
- Convertisseurs à découpage de faible puissance ; divers racks de contrôle ;
- Auxiliaires de contrôle des sous-stations ;
- Câblage correspondant ;
- Distribution 400 V.

Tunnels de klystrons (UA 43, UA 47) et tunnels des cavités accélératrices (RA 43, RA 47)

- Générateurs très haute fréquence (klystrons) 100 kV, 350 MHz, 1 MW par unité pour l'alimentation des cavités accélératrices du faisceau. Les klystrons et cavités sont raccordés ensemble par des guides d'onde et constituent des blocs entièrement blindés. Les klystrons sont raccordés aux redresseurs en surface par des câbles blindés 90 kV continu. Les boîtes de connexion sont également blindées ;
- Distribution 400 V.

Tunnels des convertisseurs (UA et RR)

- Transformateurs secs 18 kV/400 V, moulés dans de la résine synthétique ininflammable, avec

- une enceinte de protection ;
- Distribution 400 V ;
- Convertisseurs de puissance à découpage jusqu'à 200 V et 13 kA, divers racks de contrôle ;
- Convertisseurs de puissance, 60 kV pour aimants inflecteurs ;
- Transport de courant continu BT en câbles et barres protégés.

Tunnel de décharge de faisceaux (TD)

- Distribution 400 V ;
- Pont roulant.

Octants du tunnel principal

- Aimants supraconducteurs alimentés en courant continu (<13 kA et <200 V continu contre terre maximum), via des boîtes de raccordement protégées. L'accès au tunnel est restreint dès lors que les barres omnibus sont mises sous tension ;
- Electrodes d'extraction, <8 kV et <10 mA courant continu ;
- Distribution 400 V ;
- Monorail de transport alimenté en 400 V par contacts glissants ;
- Câble 18 kV ;
- Distribution BT en câbles ou barres protégées ;
- Convertisseurs à découpage de faible puissance, 8 V et 60 A ;
- Alimentation pour chauffage des bobines supraconductrices, 400 V, 100 A pendant 100 ms.

Ouvrages pour les expériences (UXA 15, UX 25, UXC55 et UX 85)

- Aimants des détecteurs de particules. Tension continue allant jusqu'à 150 V, courant continu de 5 kA à 30 kA ;
- Alimentations en courant continu des détecteurs montées en tiroirs, installés eux-mêmes dans des racks standards. Ces racks sont installés dans des baraques mobiles ou dans des baraques étagées dans le puits UX 25 ;
- Distribution vers les détecteurs par câbles coaxiaux ;
- Ponts roulants ;
- Distribution 400 V.

Ouvrages pour les services des expériences (USA15 et USC 55)

- Transformateurs secs 18 kV/400 V, moulés dans de la résine synthétique ininflammable, avec une enceinte de protection ;
- Convertisseurs de puissance à découpage, <21 kA et <20 V ;
- Ponts roulants ;
- Distribution et des moteurs 400 V.

1.1.4 Ouvrages de liaisons

Réseaux de distribution du LHC

- Réseaux 66 et 18 kV par câbles (exclusivement pour le LHC). Schéma IT selon la norme UTE C13-200 avec déclenchement au premier défaut ;
- Réseau 3,3 kV par câbles. Schéma TT pour le SPS. Schéma IT pour le LHC ;
- Réseau 400 V par câbles. Schéma TNB avec liaisons équipotentielle de terre, selon la norme

NFC 15-100 ;

- Réseaux courant continu, avec point milieu à la terre (installations de classe BT, MT, HT selon UTE C12-100).

Liaisons en tranchée entre le poste 400 kV et les sous-stations électriques du LHC

- Câbles 66 kV armés vers les bâtiments BE9, SE1, 2, 4, 6 et 8. Câbles unipolaires avec étanchéité renforcée selon les normes EDF ;
- Câbles 18 kV armés vers SE1 ;
- Câbles unipolaires avec étanchéité renforcée selon les normes EDF.

1.2 Principes de la prévention des risques électriques

Pour traiter de la prévention, les risques électriques sont classés en deux catégories :

- Ceux inhérents à toutes les installations de distribution électrique. Les principes généraux de prévention consistent à appliquer les normes françaises en la matière, complétées par des normes internes plus spécifiques ayant trait, d'une part au caractère spécifique du CERN et d'autre part aux particularités propres à un accélérateur de particules.
- Ceux particuliers à des installations de distribution électrique dans d'importants ouvrages souterrains. Les principes de prévention portent, d'une part sur la permanence des sources d'alimentation et d'autre part sur la prévention des incendies dus à l'électricité.

1.2.1 Prévention des risques inhérents à toute installation électrique

Conception des installations

Le matériel électrique est spécifié pour être construit en accord avec les normes CEI, et en particulier la publication CEI 364 (Installation électrique des bâtiments). Les installations de type industriel sont spécifiées pour répondre aux règles des normes NF C15-100, UTE C12-100 et UTE C13-200, partout où ces normes sont applicables. Les installations expérimentales sont réalisées, dans la mesure du possible, en fonction des principes exposés dans ces normes.

Le CERN a ses propres documents de sécurité et de normalisation pour l'usage sur le domaine de l'organisation. Le document de base concernant les installations électriques est le code de sécurité C1 relatif à l'électricité et ses annexes (instructions et notes de sécurité portant sur des sujets particuliers). Ces documents ont pour objet de fixer la réglementation à suivre pour la construction, l'installation et l'utilisation du matériel électrique en vue d'assurer la protection des personnes et des biens.

Etudes de sécurité

Les plans des installations sont soumis au TIS qui les étudie sous l'angle de l'application des règles de sécurité. Les observations sont transmises à l'organe émetteur des plans. Ce dernier apporte les modifications qui en découlent. Les installations terminées sont inspectées par le TIS avant leur mise en service. L'inspecteur fait ses observations concernant la sécurité au responsable CERN de l'installation qui apporte les modifications et dans les cas graves peut surseoir à la mise en service.

Arrêts d'urgence

Un réseau d'arrêts d'urgence équipe chaque ouvrage du LHC. L'action sur un arrêt d'urgence permet de couper toutes les tensions supérieures à 50 V dans l'ouvrage considéré, à l'exception des réseaux de sécurité qui transitent dans des gaines protégées. Ce type d'installation est régi par l'instruction de sécurité CERN N° 5.

Consignes d'exploitation

Des consignes d'exploitation seront éditées par l'Organisation pour l'exploitation de ses réseaux THT, HT, MT, BT, et par extension pour les équipements de recherche et expérimentaux. Ces consignes s'inspirent des prescriptions de la norme UTE C12-100 (textes officiels relatifs à la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en oeuvre des courants électriques) après leur adaptation nécessaire à l'exploitation d'un accélérateur et des ses expériences. Ces consignes sont régies par le code de sécurité C1 du CERN.

Qualification du personnel

Le personnel d'exploitation des services électriques du CERN possède la qualification professionnelle nécessaire à l'accomplissement des tâches dont il est chargé. Les critères de qualification sont régis par le code de sécurité C1 du CERN. La compétence du personnel est renforcée par des cycles de formation concernant les risques de l'électricité, les règles d'exploitation et les premiers secours.

1.2.2 Prévention des risques particuliers dans d'importants ouvrages souterrains ayant leur origine dans le réseau électrique.

Prévention contre la défaillance des sources d'alimentation électrique

Pour assurer la permanence de l'alimentation sur les réseaux de sécurité, le CERN a prévu trois possibilités d'alimentation de ces réseaux :

- au niveau de l'alimentation générale de la boucle des services généraux du LHC, l'alimentation par EDF (France) est secourue automatiquement par le réseau EOS (Suisse). Cette commutation est automatique ainsi que les délestages nécessaires;
- au niveau de chaque zone du LHC, l'alimentation normale du réseau sécurité est secourue par un groupe électrogène, dont le démarrage est automatique;
- le réseau sécurité peut être aussi alimenté par le réseau local 20 kV d'EDF avec commutation manuelle.

L'éclairage des ouvrages souterrains est conforme à la norme C12-100, additif 2. Il est assuré par de multiples circuits par ouvrage:

- un éclairage normal, repris par le groupe électrogène;
- deux circuits d'éclairage anti-panique sur onduleurs autonomes;
- deux circuits d'éclairage d'ambiance dans les zones à forte densité de population, pris sur le groupe électrogène, via des transformateurs d'isolement.

Prévention contre les risques d'incendie dus à l'électricité

Les critères de choix des matériaux isolants pour les câbles et les équipements électriques (résistance au feu et aux radiations) sont fixés par l'instruction de sécurité CERN N° 23. La qualité

systématiquement requise pour l'ensemble de ces équipements est l'absence d'halogène et de soufre. En ce qui concerne les câbles, les qualités systématiquement requises et vérifiées par des essais sont les suivantes:

- non propagation de la flamme pour câbles posés en nappe verticale, vérifiée par l'essai selon CEI 332-3 et pour les câbles fins selon CEI 332-1;
- faible opacité des fumées vérifiée par l'essai selon CEI 1034 en vraie grandeur;
- non toxicité des gaz de combustion vérifiée par l'essai selon AST 1000.001 de Airbus Industrie;
- non corrosivité des gaz de combustion vérifiée par l'essai selon CEI 754-2;
- résistance aux radiations par l'essai d'allongement à la rupture selon la norme CEI 544.

Les câbles de sécurité devant continuer à fonctionner pendant un incendie (éclairages anti-panique, dispositifs d'extinction) sont essayés en conformité avec la norme CEI 331 (tenue 3 h à 750 °C) et la norme UTE 32-070 catégorie CR1 qui comporte des chocs mécaniques sur le câble pendant l'exposition au feu. Les boîtiers de jonction de ces câbles passent des essais équivalents pour assurer la continuité des circuits. Les organes d'alimentation et de contrôle des circuits de sécurité (tableaux BT sécurité, batteries 48 V et onduleurs, organes de contrôle et de télécommunication) sont installés dans des locaux de sécurité constitués par une enceinte coupe-feu 2 h.

2 INCENDIE

2.1 Inventaire des risques d'origine électrique

Tunnel de la machine

Les composants de la machine présentent peu d'éléments combustibles, si ce n'est l'isolant des composants électroniques installés sous les cryostats. Les charges thermiques les plus importantes se trouvent dans la masse de câbles de puissance HT, BT et de contrôle. Ces câbles sont, en général, posés sur des chemins de câbles apparents (bâtiments de surface, tunnel, halls d'expérience ou de service), logés dans des galeries de liaison entre les bâtiments de surface ou logés dans des faux plafonds ou faux planchers pour les locaux fermés (informatique, salles de comptage). Une mention particulière doit être faite pour les alvéoles électriques RE et les sous-stations en fond des puits d'accès contenant de l'appareillage HT et BT, des transformateurs et de l'électronique.

Galeries techniques et systèmes accélérateurs (RF)

On les trouve au point 4. Ils ne présentent pratiquement pas d'éléments combustibles, hormis les câbles électriques. Par contre, les galeries klystrons renferment les générateurs de puissance UHF comportant des systèmes «Très Haute Tension» (THT, klystrons et guides d'ondes avec leurs protections). Certains de ces équipements sont contenus dans des cuves à huile regroupées dans des «bunkers» étanches. Le volume total d'huile par bunker est de l'ordre de 1 m³. Ces bunkers sont construits sur des fosses de récupération de type réglementaire.

Zones expérimentales

Dans les quatre zones expérimentales souterraines, sont logés les grands détecteurs pouvant comporter des isolants, des matières plastiques et des mélanges gazeux, combustibles ou non. La

combustion d'isolants engendre du CO, du CO₂ et d'autres produits. Les gaz utilisés dans les détecteurs et provenant de la surface peuvent être typiquement des mélanges de gaz neutres (Ar, Ne, CF₄) et des gaz inflammables tels que le diméthyléther et les hydrocarbures, réalisant des mélanges inflammables ou non. On trouve dans ces mêmes zones l'essentiel de l'électronique de l'expérience regroupé dans des salles réservées à ces équipements.

Puits

En règle générale, seuls les puits PM sont utilisés pour faire passer, en dehors de la zone de sécurité, les câbles électriques du LHC et des expériences. Seul le puits PX24 sert aussi au passage des câbles.

Bâtiments de surface industriels

Les bâtiments de déchargement (SD et SX) couronnant les puits renferment les équipements électriques classiques liés à la manutention. Dans le hall SX2, sont installés une sous-station basse tension et un convertisseur de puissance. Les transformateurs à huile correspondants se trouvent à l'extérieur du bâtiment. Les bâtiments SR dits «redresseurs» contiennent tous les autres convertisseurs de puissance devant alimenter le LHC, les transformateurs se trouvant à l'extérieur du bâtiment. Les bâtiments SE sont ceux des sous-stations électriques abritant les équipements HT et BT alimentant les points d'accès et les deux demi-octants correspondants. Les transformateurs alimentant ces bâtiments sont soit du type conventionnel à huile minérale, installés à l'extérieur sur des fosses de récupération et séparés des bâtiments par des murs pare-feu, soit installés à l'intérieur, du type moulé dans la résine synthétique non propagatrice de flammes. Les câbles de distribution et de contrôle sont du même type que ceux utilisés dans les ouvrages souterrains. Dans les bâtiments SU, se trouvent les équipements de traitement de l'air pour les ouvrages souterrains ainsi que les ventilations des différents ouvrages, la production d'eau glacée pour la réfrigération de certains équipements et, dans les SH, les compresseurs d'hélium aux points pairs pour les besoins cryogéniques des aimants supraconducteurs. Ces bâtiments renferment également une sous-station HT/BT avec des transformateurs extérieurs aux points pairs, intérieurs aux points impairs.

Bâtiments de stockage des gaz en surface

Ces bâtiments, exclusivement réservés à cet usage, contiennent également les appareillages doseurs donnant la composition précise du mélange de gaz utilisé par un détecteur et circulant en circuit fermé. Ces appareillages sont conformes aux règles en vigueur dans les pays-hôtes (antidéflagrants).

2.2 Inventaire des risques d'origine non électrique

Les risques d'incendie d'origine non électrique proviennent des opérations éventuelles de soudage, de meulage, de découpage au chalumeau, des matières combustibles aisément inflammables présentes temporairement (emballages, papiers), des produits d'entretien et de nettoyage (solvants, chiffons gras) et du contenu combustible des locaux de travail.

2.3 Prévention d'incendie

Mesures passives

Compartimentage

En milieu souterrain, le principe du compartimentage résistant au feu est respecté dans toute la mesure du possible, tenant compte des exigences techniques pour l'exploitation de l'accélérateur et les expériences. Constituent des compartiments résistants au feu :

- chaque octant de 3,3 km ;
- chaque caverne d'expérience ;
- chaque ensemble US-UA-UJ ;
- chaque local «hors-feu» en US, contenant les équipements électriques de sécurité ;
- chaque «bunker», dans les galeries klystrons UA, contenant des équipements électriques refroidis à l'huile minérale ;
- chaque ensemble cage d'escalier-ascenseur (PM, PZ et PX24); chacun de ces ensembles est pressurisé ;
- chaque alvéole électrique RE.

Matériaux et éléments de construction

Tous les matériaux entrant dans la construction de l'ouvrage, ainsi que les éléments porteurs (les murs et les poutres) sont totalement incombustibles. Les colonnes constituant les compartiments sont en béton. Certains planchers (en US par exemple) ainsi que les planchers de galeries de circulation dans les halls d'expérience UX sont métalliques du type «grilles Laufer». Les ossatures métalliques des zones souterraines US sont remplies de béton, conférant aux éléments porteurs une résistance au feu minimum de 2 h.

Les câbles utilisés dans le LHC et dans les halls d'expériences, prescrits par l'Instruction de Sécurité IS 23, sont très difficilement combustibles, non propagateurs de flamme, retardant l'incendie et dégageant un strict minimum de fumées non opaques et sans produits toxiques (conformément aux standards internationaux). Tous les câbles de sécurité ont été regroupés en une goulotte séparée en matériau très difficilement combustible.

Stockage des gaz

Le stockage des gaz ininflammables se fait sous forme de gaz comprimés en cylindres ou liquéfiés en dewars se trouvant à l'extérieur. Le stockage des gaz combustibles comprimés ou liquéfiés se fait en cylindres stockés dans des aires de stockage couvertes et grillagées, ventilées à l'air libre. Les bâtiments adjacents à ces aires (SG, SGX) contiennent les appareillages doseurs donnant la composition précise du mélange de gaz utilisée dans un détecteur et circulant en circuit fermé.

Mesures actives

Installations fixes de détection d'incendie

Chaque compartiment défini ci-dessus, à l'exception des cages d'escaliers-ascenseurs, est protégé par une installation fixe de détection d'incendie du type linéaire à aspiration de fumée avec signalisation de «défaut» en cas de bouchage des trous d'aspiration par des impuretés. En outre, chaque niveau des cavernes d'expérience est protégé par une détection incendie VESDA (Very Early Smoke Detection Apparatus) extrêmement précoce car très sensible.

A signaler toutefois que, dans chaque octant, la détection de fumée ne se fait que sur 50 m en

amont et aval de chaque puits d'accès PM et sur 50 m en amont et aval de chaque alvéole électrique, étant entendu que les fumées provenant de la combustion lente éventuelle d'isolant de bobine d'aimant non supraconducteur (seul risque potentiel) seront détectées par la détection incendie installée un peu plus loin en aval.

L'expérience ATLAS a prévu d'installer à l'intérieur de «tube» détecteur de particules, une détection incendie linéaire à aspiration de fumée avec détecteur de fumée ultrasensible du type VESDA. Les essais de ces installations sont exécutés conformément à la règle R7 de l'A.P.S.A.D. (Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurance et Dommages).

Installations fixes d'extinction automatique ou à actionnement manuel

Suite à la mise en application du Protocole de Montréal relatif à l'interdiction de production des HALONS, le CERN a pris la décision de ne plus procéder à de nouvelles installations de systèmes d'extinction automatique utilisant les HALONS comme agent extincteur gazeux. Des recherches sont actuellement en cours en vue de trouver un agent extincteur ou une combinaison d'agents extincteurs gazeux ou non, tenant compte de leur efficacité et de leur coût, mais surtout des possibilités techniques de réalisation des installations.

2.4 Moyens d'intervention contre le feu

L'ensemble des locaux est protégé par des moyens fixes et portables traditionnels :

- extincteurs portatifs à HALON 1211 (ou son remplaçant) de 6 kg ;
- extincteurs portatifs à eau pulvérisée de 6 et 9 l avec additif mouillant ;
- dévidoirs à alimentation axiale avec tuyau de 20 m ou 30 m.

Le tunnel proprement dit est équipé de 325 extincteurs portatifs de 6 kg de HALON 1211, ou son remplaçant, disposés à raison d'un tous les 80 m environ. Les US et UX sont équipés en plus de trois extincteurs.

2.5 Organisation de l'intervention contre le feu

Le CERN dispose d'un service du feu professionnel. Les interventions de lutte contre le feu et autres sont prévues en quatre échelons :

1er échelon : personnel sur place

Tout le personnel appelé à travailler en milieu souterrain doit suivre une séance d'information sur les risques encourus. Il doit être initié à la manipulation d'un extincteur sur feu réel pour être à même d'assurer une toute première intervention en présence directe d'un début d'incendie. Il disposera sur place d'un masque à oxygène chimique qui lui permettra d'évacuer en milieu enfumé s'il ne parvient pas à éteindre le feu naissant. Ces masques seront disposés aux points d'accès en milieu souterrain (sas d'ascenseurs par exemple).

2ème échelon : sapeurs-pompiers auxiliaires

- Nombre prévu: trois au voisinage de chaque point d'expérience ;

- Formation: sapeur-pompier volontaire suivant le programme officiel en vigueur auprès des centres de secours français ;
- Brevets à obtenir :
 - * Brevet national de secourisme ;
 - * Brevet de spécialiste réanimation ;
 - * Brevet de jeune sapeur ;
- Séances de recyclage: 2 h minimum par mois ;
- Equipement: casque pompier ou équivalent, veste de feu, ou bottes de sécurité, gants ;
- Missions :
 - * intervenir en échelon s'ils sont témoins directs d'un début d'incendie ;
 - * intervenir en renfort du 1er échelon dès qu'ils sont avertis de l'endroit exact du début de sinistre ;
 - * donner en permanence des informations sur la situation à la centrale du service du feu (SCR) ;
 - * donner éventuellement le signal d'évacuation ;
 - * vérifier qu'il n'y a plus d'occupants dans une zone sinistrée, en principe évacuée ;
 - * se mettre à la disposition des sapeurs-pompiers venus de l'extérieur (CERN, Pays de Gex, Genève).

3ème échelon : sapeurs-pompiers professionnels du CERN

Les sapeurs-pompiers professionnels du CERN ont leur casernement sur le site de Meyrin. Ils sont équipés du matériel et de l'équipement traditionnel de tout sapeur-pompier, avec en plus des masques de protection respiratoire d'une autonomie de 4 h pour les interventions de longue durée et spécialement dans les longues galeries et les tunnels. Leurs délais d'intervention aux points les plus éloignés sont de l'ordre de 15 à 30 mns en conditions normales.

Moyens sur place: outre les moyens cités ci-dessus, sont à disposition :

- une plate-forme tractable présente en fond de puits PM, portant du matériel de secourisme et de lutte contre le feu à disposition des pompiers ;
- une réserve de matériel portable de secourisme et de lutte contre le feu, en chaque point d'accès (bâtiment SY).

4ème échelon : renforts extérieurs

En cas de nécessité, une convention entre le CERN et les pays-hôtes prévoit la possibilité d'appeler en renfort les Centres de Secours volontaires du Pays de Gex et le Service d'Incendie et de Secours (S.I.S.) professionnel de Genève.

2.6 Désenfumage

La plupart des bâtiments de surface contenant des matières combustibles est pourvue d'un dispositif de désenfumage. Pour les cavernes d'expérience, des études sont en cours pour utiliser l'installation de ventilation aux fins de désenfumage en cas d'incendie.

2.7 Evacuation

Le principe de la possibilité pour toute personne d'évacuer par une seconde voie indépendante de la première est respecté pour tous les ouvrages LHC.

2.8 Formation du personnel intervenant en milieu souterrain

Toute personne appelée à se rendre en milieu souterrain suit une formation de sécurité comprenant:

- une initiation de base à la prévention incendie;
- des notions élémentaires de secourisme;
- des exercices pratiques d'utilisation des extincteurs sur feux réels;
- une audition du signal émis par les sirènes d'évacuation;
- une formation pratique d'utilisation des appareils auto-sauveteurs mis en place dans des lieux à risque.

2.9 Procédures à respecter

Permis de feu

Pour tout travail de soudure, de meulage, de découpage au chalumeau etc., l'établissement d'un «permis de feu» est obligatoire.

Mise hors service temporaire d'une alarme de niveau 3

Pour des raisons de renouvellement ou de maintenance d'installation d'alarme de niveau 3 (par exemple: détection d'incendie), une procédure (Instruction de Sécurité IS 37) a été mise au point afin d'assurer la permanence de la fonction de détection pendant la mise hors service temporaire d'une installation (voir aussi chapitre V, section 9)

Utilisation et stockage de bouteilles de gaz inflammables et produits chimiques

Les procédures en la matière sont définies dans le code de sécurité G «Gaz inflammables» et le code de sécurité chimique (Code B).

Baraques des physiciens.

La construction et la protection incendie des «baraques» pour physiciens installées à l'intérieur d'une caverne d'expérience (en milieu souterrain ou en surface) fait l'objet d'une «Note de Sécurité» (NS 3).

Protection individuelle

Une procédure de port obligatoire d'un masque autosauveteur est mise en place et expliquée au cours de formation élémentaire sur la sécurité.

Evacuation

Une procédure d'évacuation en cas d'incendie est mise en place et des exercices pratiques d'évacuation sont organisés annuellement.

3 EQUIPEMENTS SOUS PRESSION ET GAZ INFLAMMABLES

3.1 Inventaire des risques dans les expériences (gaz inflammables)

Les règles de sécurité applicables aux systèmes de gaz inflammables utilisés dans les expériences au CERN sont définies dans le code de sécurité G «Gaz inflammables» et dans son annexe «Manuel de sécurité gaz inflammables», dans l'instruction de sécurité IS 38 «Utilisation de gaz inflammables lors d'expériences souterraines au CERN», et dans le code de sécurité D2 «Equipements sous pression».

Gaz et mélanges gazeux dans les détecteurs

Les gaz et mélanges gazeux susceptibles d'être utilisés pour les futures expériences de physique au LHC, sont résumés dans le tableau V.1 et classés en deux catégories: inflammables et inertes. Nature, composition des mélanges, pression d'utilisation et volumes mis en oeuvre y sont mentionnés. L'équivalent hydrogène pour les quantités de gaz inflammables dans les mélanges gazeux utilisées dans chaque zone expérimentale est également reporté dans ce tableau, permettant une première approche de l'analyse des risques. Les valeurs resteront inférieures à 40 kg, seuil au delà duquel le risque est classifié en niveau 3, niveau formellement interdit dans les zones expérimentales souterraines du CERN.

Prévention et dispositifs de sécurité

Toutes les installations d'alimentation en gaz inertes et inflammables pour les détecteurs de particules sont contrôlées avant leur mise en service selon les normes de sécurité en vigueur. Les principaux contrôles sont :

- contrôle des manodétenteurs ;
- contrôle de l'intégrité des cordons de soudure sur les lignes en acier inoxydable ;
- vérification des positions et tarage des soupapes de sécurité ;
- existence des événements ;
- vérification du fonctionnement des électrovannes ou vannes pneumatiques d'isolation des réseaux ;
- mise sous pression statique du réseau (10 bar pour les gaz inertes) pendant 24 h minimum pour les contrôles d'étanchéité des lignes d'alimentation et des panneaux de distribution.

En plus des mesures de prévention qui seront prises pendant l'installation et la mise en service des réseaux, les systèmes de distribution des gaz inflammables depuis les bâtiments de stockage en surface jusqu'aux zones expérimentales souterraines en exploitation seront surveillés par des dispositifs de sécurité dits «intelligents». Des capteurs, soigneusement placés dans les zones sensibles au voisinage des sources de gaz dans les bâtiments de stockage (SG, SGX) et au voisinage des détecteurs de particules, assureront une veille permanente, déclenchant les alarmes de niveau 3 et les actions appropriées en cas de fuite inopinée de gaz inflammables (voir chapitre V, section 9).

Toute détection d'une fuite de gaz engendrera les actions suivantes :

- la ventilation du local ou de la zone concernée est accélérée ;
- l'alimentation électrique locale est coupée; seules les alimentations électriques du système de ventilation et du dispositif d'éclairage restent en service ;
- les alarmes sont envoyées au centre du service de secours (SCR), à la salle de contrôle technique (TCR) et à la salle de contrôle (XCR) propre à l'expérience concernée ;

- les alimentations en gaz inflammables sont interrompues rapidement par l'actionnement automatique des vannes d'isolation du réseau, au niveau des sources gaz, en amont de la salle des préparations des mélanges, dans les bâtiments SG et SGX en surface ;
- une alarme locale sonore et/ou visuelle est déclenchée.

Des boutons d'arrêt d'urgence sont installés autour du bâtiment de stockage des gaz, permettant ainsi de couper les alimentations en gaz inflammables en amont de la salle de préparation des mélanges gazeux et de couper l'alimentation électrique locale, à l'exception du système de ventilation.

3.2 Système et équipements cryogéniques

Le système cryogénique principal du LHC comprend essentiellement les cryoaimants (dipôles, quadripôles etc.), les lignes de distribution et de récupération d'hélium liquide et gazeux (QRL et QRP) et les cavités supraconductrices d'accélération. Tous les équipements et systèmes cryogéniques sont conçus, fabriqués et testés en suivant strictement les règles et normes stipulées dans le code de sécurité D2 (équipements sous pression) et l'instruction de sécurité IS 47 (utilisation des fluides cryogéniques).

De plus, du point de vue de la sécurité, la conception du système cryogénique a les caractéristiques suivantes :

- Tous les éléments du système cryogénique sont des éléments à double paroi (cryoaimants, lignes cryogéniques de distribution et d'interconnexion, boîtes froides etc.) ;
- Tous les matériaux utilisés pour la construction des éléments cryogéniques sont certifiés et adaptés à leur utilisation à basse température et à la pression ;
- La présence d'un collecteur (ligne D dans la figure V.1) incorporé dans la ligne cryogénique de distribution séparée (QRL) d'un volume de 60 m³ par secteur, travaillant normalement à basse pression (1,3 bar) et à une température de 20 K. En cas de transition résistive («quench») d'un aimant, l'hélium froid s'échappe par des vannes de quench vers ce collecteur (pression de travail 20 bar) qui peut absorber des décharges importantes d'hélium, hélium qui sera ensuite récupéré par les réfrigérateurs. Ce collecteur est aussi utilisé comme tampon pour récupérer l'hélium évaporé dans le cas d'une détérioration éventuelle du vide d'isolement des aimants ou de la QRL ;
- L'absence d'azote liquide ou gazeux dans tous les circuits souterrains du système cryogénique du LHC ;
- L'absence de tout élément mécanique pour assurer la circulation de l'hélium liquide dans les boucles de refroidissement, donnant un comportement statique au fluide en cas de rupture d'un collecteur ;
- La présence de dispositifs de sécurité (vannes) comme montré dans la figure V.1 pour éviter une surpression dans les différentes enceintes ou lignes cryogéniques. Toutes ces vannes de sécurité déchargent l'hélium dans les lignes de récupération.

Tableau V.1 - Gaz et mélanges gazeux

GAZ ET MELANGES	ALICE (POINT 2)	ATLAS (POINT 1)	CMS (POINT 5)	LHC-b (POINT 8)
INFLAMMABLES	Ar/CH ₄ /C ₂ H ₄ /C ₄ H ₆ (76,9/20/2,5/1,4)% 36 modules x 0,2 m ³ pression 12 bar	CO ₂ /n-C ₅ H ₁₂ (55/45)% 16 m ³	Ar/n-C ₄ H ₁₀ Or n-C ₄ H ₁₀ /Freon	CF ₄ /CH ₄ (80/20)% 8 m ³ Ar/DME (50/50)% 0,04 m ³ C ₂ F ₅ H/Ar/I-C ₄ H ₁₀ (85/105)% 2 m ³
ININFLAMMABLES	N ₂ Ar ou Ne/CO ₂ /CH ₄ (--/--/--) % 0,5 mbar; 84 m ³	CO ₂ 13 m ³ Xe/CF ₄ /CO ₂ (70/20)% 2,3 m ³ Ar/CH ₄ /N ₂ (91/5/4)% 800 m ³ , 2 bar Ar/CO ₂ /CF ₄ (30/50/20)% 3 m ³ C ₂ H ₂ F ₄ /i-C ₄ H ₁₀ (97/3)% 18,3 m ³	Ar/CO ₂ (80/20)% 250 m ³ Ar/CO ₂ /CF ₄ (30/50/20)% 200 m ³ CF ₄ /CO ₂ (80/20)% 11 m ³	CF ₄ 50 m ³ C ₄ F ₁₀ 4 m ³ CO ₂ /Ar/CF ₄ (60/30/10)% < 1 m ³
EQUIVALENT H ₂ (kg)*	-	-	-	< 5

* 40 kg est la valeur seuil pour classifier le risque en classe III.

Il faut également mentionner la présence permanente d'opérateurs qualifiés pendant l'exploitation du système cryogénique. Néanmoins, pour identifier tous les risques dus à une défaillance possible des éléments du système cryogénique pendant l'exploitation du LHC, une analyse des risques a été accomplie [Réf. 1]. Pour cette analyse, les modes de défaillance suivants ont été pris en considération (voir aussi figure V.2) :

1. Perte du vide d'isolation (entrée d'air)
2. Perte du vide d'isolation (fuite d'hélium)
3. Entrée d'hélium dans l'enceinte d'hélium subatmosphérique
4. Rejet d'hélium dans le tunnel
5. Perte du vide dans les tubes de faisceaux (entrée d'air)
6. Perte du vide dans les tubes de faisceaux (entrée d'hélium)
7. Entrée d'hélium dans l'enceinte d'hélium superfluide
8. Décharge d'énergie dans l'enceinte à hélium de la masse froide d'un cryoaimant («quench»)
9. Décharge d'énergie dans l'enceinte à hélium de la masse froide d'un cryoaimant (arc électrique avec «quench»)

Les conséquences d'une défaillance (fuite ou rejet d'hélium) sont classées en quatre catégories selon leur gravité :

Niveau 1 : pas de rejet d'hélium dans les ouvrages souterrains, récupération d'hélium par le collecteur et renvoi aux réfrigérateurs.

Conséquence : arrêt du collisionneur.

Niveau 2 : Pas de rejet d'hélium dans les ouvrages souterrains, récupération d'hélium par le collecteur et renvoi aux réservoirs de stockage en surface. En cas de manque de volume de stockage, rejet à l'atmosphère.

Conséquences : arrêt du collisionneur, éventuellement rejet d'hélium dans l'atmosphère.

Niveau 3 a : Rejet d'hélium dans les ouvrages souterrains mais accès interdit pour le personnel.

Conséquences : arrêt du collisionneur, rejet d'hélium dans l'atmosphère par le système de ventilation.

Niveau 3 b : Rejet d'hélium dans les ouvrages souterrains avec accès pour le personnel.

Conséquences : arrêt du collisionneur, rejet d'hélium dans l'atmosphère, risque d'asphyxie, de brûlure ou de gelure pour le personnel.

En ce qui concerne la protection de l'environnement, il faut mentionner que seul le tritium peut être produit dans l'hélium par interaction des hadrons avec une énergie > 50 MeV. En fait, les quantités de tritium produites dans le système cryogénique lors du fonctionnement du LHC sont extrêmement petites et sans importance pour la protection de l'environnement (production annuelle de tritium en fonctionnement normal : 107 MBq ; production de tritium due à une perte totale du faisceau : 7,4 MBq) [Réf. 2].

L'analyse des risques a montré que les défaillances suivantes peuvent avoir des conséquences de niveau 3 b (rejet d'hélium dans les ouvrages souterrains en présence de personnes) :

- a) Rupture d'une ligne d'hélium liquide incorporée dans la ligne de distribution cryogénique séparée (QRL) avec rejet massif d'hélium liquide dans l'enceinte à vide du QRL, augmentation de la pression dans celle-ci, ouverture des vannes de sécurité et rejet d'hélium dans le tunnel ; Débit maximum d'hélium : 2 kg/s.

Quantité maximum d'hélium rejetée : 3300 kg.

- b) Rupture d'un élément dans la connexion entre la ligne de distribution QRL et la chaîne des aimants cryogéniques («jumper connection») avec rejet d'hélium dans le tunnel ;
Débit maximum d'hélium : 20 kg/s.
Quantité maximum d'hélium rejetée : 4250 kg.
- c) Rupture d'un élément dans une boîte froide (QRLA) avec rejet d'hélium dans le puits et/ou dans une caverne souterraine ;
Débit maximum d'hélium : < 2 kg/s.
Quantité maximum d'hélium rejetée : 180 kg.

Les défaillances a) et c) ont une probabilité très faible de se produire dans le cycle de vie de l'équipement mais ne peuvent pas être complètement exclues. La probabilité pour la défaillance b) est quasiment nulle. Néanmoins, des études supplémentaires sont prévues pour estimer plus précisément d'une part les débits d'hélium rejetés dans le temps suite à une de ces défaillances et d'autre part les concentrations maximum d'hélium à attendre dans les ouvrages souterrains, en tenant compte de l'apport de l'air frais par les systèmes de ventilation, ainsi que les mesures de détection et de prévention supplémentaires à prévoir (installation d'un système de détection «Manque d'oxygène»).

Références

- [Réf. 1] M. Chorowski ; Ph. Lebrun et G. Riddone : «Preliminary risk analysis of the LHC cryogenic system» LHC Project Note 177, Janvier 1999.
- [Réf. 2] M. Höfert et al. : «Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement», CERN/TIS-RP/97-06

Cavités supraconductrices

Un risque de surpression dans les cavités peut provenir de l'ébullition rapide de l'hélium liquide. Celle-ci peut être provoquée par une rupture soit du vide d'isolation du cryostat, soit du vide machine. Dans les deux cas, la pression dans l'enceinte à hélium augmente rapidement. La sécurité est assurée par des disques de rupture réglés à 2 bar environ. Néanmoins, un tel incident peut provoquer un décharge rapide d'hélium gazeux froid (environ 60 m³ par cavité) dans le tunnel de l'accélérateur.

Calorimètres à argon liquide de l'expérience ATLAS

Une des grandes expériences, ATLAS au point 1, utilisera des calorimètres remplis d'environ 80 m³ d'argon liquide au total. Ils doivent mesurer l'énergie des gerbes de particules produites, ce qui repose sur l'analyse de l'ionisation liée au passage de particules chargées dans l'argon liquide lui-même. Le bon fonctionnement de ces détecteurs dépend de l'absence totale de contamination de l'argon et le contrôle précis de la température, juste au dessous de 89,3 K, est indispensable pour éviter l'apparition de bulles de gaz et de turbulences. L'élimination de toute trace d'oxygène requiert des enceintes parfaitement étanches avec des doubles parois séparées par un vide d'isolation pour stabiliser la température du liquide.

Tableau V.2 - Paramètres concernant l'argon

Masse volumique du liquide	1381 kg/m ³
Masse volumique du gaz (température ambiante)	1784 kg/m ³
Masse volumique du gaz à 89 K	5895 kg/m ³
Température de travail	89,3 K
Température minimale	87,3 K
Pression opérationnelle	1,25 bar absolue
Pression de réglage des vannes de sécurité	1,7 bar

Tableau V.3 - Volume d'argon dans les calorimètres

Volume d'argon dans le «baril»	45 m ³
Volume d'argon dans chaque «bouchon» (x2)	19 m ³
Volume de gaz froid dans le «baril»	10000 m ³
Volume de gaz froid dans un «bouchon»	4200 m ³
Volume de gaz a température ambiante dans le «baril»	35000 m ³
Volume de gaz a température ambiante dans un «bouchon»	15000 m ³

Les trois calorimètres sont des enceintes sous pression construites suivant le code de construction CODAP équipées de vannes de sécurité suivant les règles définies dans le code de sécurité CERN D2. Les passages électriques doivent également être doublés avec un passage froid pour traverser la paroi intérieure et un passage à température ambiante pour la paroi extérieure. Ces passages électriques sont des points délicats et leurs vides d'isolation sont séparés du vide d'isolation général des enceintes, ce qui permet de détecter la moindre fuite et d'éviter une perte totale d'isolation. Ces précautions et le contrôle continu des vides d'isolation limitent la probabilité d'une grande fuite d'argon liquide.

La présence dans les calorimètres d'une quantité importante d'argon liquide était connue bien avant l'étude de la caverne et les mesures nécessaires ont été prises pour éliminer les risques d'accidents pour le personnel. Une analyse préliminaire de sécurité du type HAZOP a été effectuée par une entreprise spécialisée et les résultats correspondants ont été pris en considération lors de la conception des cavernes et zones souterraines avoisinantes. Pour citer un exemple, des fosses avec des parois équipées d'une isolation thermique sont creusées dans le sol de la caverne à l'aplomb de chacun des calorimètres et jouent le rôle de collecteurs. L'argon liquide qui s'échapperait en cas d'une éventuelle fuite serait alors amené par des canalisations de fond vers une grande fosse de récupération, elle aussi isolée sur le plan thermique. L'isolation thermique des fosses permet de ralentir l'évaporation de l'argon liquide et la grande fosse de récupération, qui peut retenir la totalité de l'argon en phase liquide, est équipée d'une puissante extraction de gaz de 21000 m³/h. Des études et des essais ont montré l'efficacité d'un tel système, même lorsque l'argon devient gazeux. En effet, en l'absence de turbulences, la grande densité de l'argon fait que le gaz se comporte pratiquement comme un liquide. Les buses du système de pulsion de la ventilation de la caverne sont donc installées en hauteur pour éviter d'introduire une turbulence au niveau du sol de la caverne. Les sorties d'urgence et toutes les sorties normales du personnel sont à 10 m du sol, de façon à prendre l'habitude de monter pour quitter la caverne. En cas de mauvais fonctionnement d'un calorimètre, d'une détérioration d'un des vides d'isolation, d'une chute de température autour des passages électriques ou de l'indication de manque d'oxygène, une alarme d'évacuation sonore est déclenchée (alarme de niveau 3, voir section 9 de ce chapitre). Toutes les personnes présentes sous terre doivent alors quitter la caverne et peuvent le faire sans avoir besoin de descendre au niveau du sol.

Tableau V.4 - Paramètres de la caverne

Volume total (24x30x30)	43000 m ³
Volume au-dessous des sorties	13000 m ³
Pulsion/extraction normale	45000 m ³ /h
Ventilation d'urgence	90000 m ³ /h
Volume de la fosse de récupération	100 m ³
Extraction de la fosse de récupération (espace confiné)	21000 m ³ /h

Certaines opérations spéciales peuvent augmenter le risque de fuites importantes. Il s'agit par exemple du remplissage initial des calorimètres ou des phases de montage pendant lesquelles les calorimètres ou leurs circuits d'alimentation, qui sont normalement très bien protégés, sont exposés au risque de chocs lors de la manutention d'objets lourds. Dans de telles circonstances, l'accès à la caverne sera extrêmement limité et seul le personnel indispensable, équipé de moniteurs de manque d'oxygène et de masques à oxygène d'urgence, sera admis. Il est également prévu d'interdire la présence de personnes au niveau du sol de la caverne, suivant le degré de risque lié à ces opérations particulières.

Le refroidissement de l'argon liquide est assuré par un réfrigérateur et un système de circulation d'azote liquide de type industriel représentant un volume total d'environ 15 m³ d'azote liquide. Cette installation est située à côté des réservoirs de stockage de l'argon liquide dans la grande fosse de récupération équipée d'une extraction de gaz de 21000 m³/h. L'accès à cette fosse, lorsque les installations cryogéniques seront chargées d'azote ou d'argon, sera contrôlé suivant les règles applicables aux espaces confinés (Code de sécurité A4 du CERN).

Aimants expérimentaux

Les installations cryogéniques pour les aimants expérimentaux se décomposent dans les parties suivantes :

- les compresseurs à hélium qui se trouvent à la surface des sites ;
- le stockage de gaz hélium à moyenne (20 bar) et haute (200 bar) pression à l'extérieur des bâtiments de surface ;
- les dewars d'azote liquide qui seront installés en surface à l'extérieur des bâtiments ;
- les boîtes froides des réfrigérateurs, permettant la production d'hélium liquide et qui se trouvent, pour CMS et ATLAS, dans les cavernes de services (US) ;
- les dewars auxiliaires d'hélium liquide, les séparateurs de phase et les boîtes à vannes de distribution d'hélium dans la caverne des expériences ;
- les lignes de transfert reliant les différents composants.

Les quantités totales d'hélium liquide présent dans les cavernes expérimentales sont de 12000 l (8900 Nm³) pour ATLAS, de 5000 l pour CMS (3700 Nm³) et de 900 l (670 Nm³) pour LHC-B.

En comparant les caractéristiques techniques de tous les aimants expérimentaux du LHC avec les phénomènes physiques et les problèmes de sécurité liés à l'utilisation de l'hélium liquide comme réfrigérant, on peut résumer la situation, en ce qui concerne les installations au niveau des cavernes souterraines ou l'hélium se trouve à des basses températures et/ou sous forme de liquide, de la façon suivante :

- Les aimants du LHC utilisent un système de refroidissement indirect par une tuyauterie interne en contact thermique avec la masse froide (bobines) des aimants. Ceci minimise la quantité

d'hélium soumise à une rapide évaporation en cas d'une transition accidentelle du supraconducteur («quench») ou d'une rupture du vide d'isolation de l'enceinte à vide des aimants. Des soupapes de sécurité prévues relâcheront l'hélium dans le volume de la caverne expérimentale, environ 50000 m³ pour ATLAS, 30000 m³ pour CMS et 25000m³ pour LHC-B sans compter les puits d'accès. Le volume total d'hélium liquide relâché sera évacué par les gaines de ventilation prévues à cet effet. Il est pour CMS de 300 l (220 Nm³ de gaz) et pour ATLAS de 700 l (520 Nm³) Pour LHC-B, encore en phase d'étude préliminaire, on prévoit des quantités semblables à celles de l'expérience DELPHI du LEP actuellement en fonctionnement dans la même caverne. Vu les volumes respectifs de gaz et de la caverne, cela ne représente pas un danger important d'asphyxie. Le liquide dans les lignes de transfert serait repoussé par la surpression dans les canaux des aimants vers les dewars auxiliaires et/ou les séparateurs de phase. Des soupapes de sécurité à ressort et/ou avec clapet magnétique vont limiter la remontée de pression dans les canaux.

- Les autres sources possibles de décharge d'hélium sont les boîtes froides des réfrigérateurs, les dewars et/ou séparateurs de phase d'hélium. Tous ces éléments seront protégés par des dispositifs de sécurité adéquats limitant les remontées de pression en cas d'accident. Etant donné le volume des cavernes expérimentales, la capacité d'évacuation de la ventilation et la caractéristique de l'hélium à se diffuser rapidement vers le haut, même dans le cas d'une évaporation totale de tout l'hélium, ne pose pas de problème de sécurité (asphyxie). La probabilité de cet accident est parmi les plus faibles.
- Tous les circuits cryogéniques et en particulier ceux connectés aux aimants seront réalisés de façon à éviter le risque d'injection de gaz chauds dans le bain d'hélium liquide et l'injection de liquide dans des volumes chauds. Des vannes d'isolation au niveau des boîtes froides des réfrigérateurs et des dewars permettront de découpler les circuits. Les retours d'hélium depuis les circuits de refroidissement des aimants seront connectés à la phase gaz des séparateurs correspondants.
- Le transfert d'azote liquide depuis la surface sera limité aux phases de refroidissement. L'azote évaporé sera évacué par des conduites vers l'extérieur à travers les puits.
- Pour éviter les risques de brûlure et/ou de réfrigération des personnes en cas de décharge d'hélium vers l'atmosphère par les vannes de sécurité, des limitations de passage pour les personnes sont prévues à proximité des vannes en question en période d'exploitation des aimants. L'itinéraire de l'évacuation sera fait vers des endroits où le passage n'est pas prévu.

3.3 Recharge des batteries

Batteries fixes

Les batteries 48 V assurant l'alimentation des principaux systèmes de sécurité directement ou par l'intermédiaire d'onduleurs 48 V/220 V (voir chapitre III, paragraphe 3.7.3) sont installées dans les ouvrages souterrains (US) des points pairs, dans US 15, UJ 33, 56 et 76 ainsi que dans les alvéoles électriques RE. En surface, elles sont installées dans les bâtiments SE.

Ces batteries sont du type Nickel-Cadmium. Deux types ayant une capacité respective de 160 et de 425 Ah sont utilisés.

Trois modes de recharge sont prévus :

- Une recharge de maintien avec une tension suffisante pour maintenir une capacité constante de 80 à 85% de la capacité nominale ;
- Une recharge de relance avec une tension juste en dessous de la valeur TG pour laquelle la

production de gaz augmente très vite par unité de courant. Ce type de recharge est automatique après une décharge ;

- Une recharge de compensation avec une tension juste au-dessus de la valeur TG pour remettre en état les batteries qui ont tendance à perdre leur capacité. Ce type de chargement se fera environ une fois par an sous la supervision de personnel qualifié.

Les conditions de ventilation nécessaires pendant ces recharges ont été évaluées d'après les normes DIN 57510/VDE 0510, la norme française NF.C.15-100 et la recommandation R.215 de l'INRS. Les débits de ventilation nécessaires dans les volumes où sont installées les batteries sous charge sont compris, suivant le mode de recharge, entre 3 et 62 m³/h pour les batteries d'une capacité de 160 Ah et entre 8,6 et 172 m³/h pour celles d'une capacité de 425 Ah.

Ces débits de ventilation sont largement assurés par les débits des systèmes de ventilations prévus dans les US, les UJ et les SE (voir chapitre III, paragraphe 3.7.6). Dans les US, les batteries sont installées dans les locaux de sécurité où il est prévu un débit d'air frais de 500 m³/h. Dans les alvéoles électriques il est prévu un débit d'air frais de 180 m³/h. L'application de la norme la plus sévère demande un débit d'air frais de 62 m³/h. Les chargeurs de batteries sont tous équipés d'un système de contrôle électronique de tension et de courant.

Batteries des véhicules électriques

Dans les ouvrages souterrains du LHC, 80 véhicules électriques pour le transport du personnel et 6 à 12 tracteurs lourds sont utilisés. Ces véhicules sont équipés de batteries au plomb respectivement de 24 V-210 Ah et de 40 V-325 Ah. Chaque véhicule possède son propre chargeur.

Les batteries des véhicules «personnel» seront rechargées en position garage dans les UL à raison de 10 véhicules au maximum par UL et les batteries des tracteurs lourds dans les US à raison de trois tracteurs au maximum par US. Les zones de charge sont bien délimitées et les prises électriques identifiées. Aucune lampe d'éclairage n'est installée directement au-dessus de ces zones et une consigne y interdit de fumer.

Les débits de ventilation nécessaires dans un UL et un US pendant la recharge simultanée de dix ou de trois véhicules ont été évaluées comme dans le cas des batteries fixes. La quantité d'air frais à apporter est de 136 m³/h dans les conditions les plus contraignantes. Ce chiffre est faible par rapport aux débits d'air dans ces volumes (plusieurs milliers de m³/h). Comme dans le cas des batteries fixes et par mesure de compensation, un système de verrouillage est installé pour arrêter la charge des batteries en cas d'arrêt de la ventilation. Pendant la recharge des batteries des véhicules et pour éviter tout risque de court-circuit, les bornes sont protégées par une plaque isolante.

4 CHOCS ET CHUTES

4.1 Inventaire des moyens de levage et de transport vertical

Les caractéristiques des ponts roulants et des ascenseurs mis en place pour le LHC sont récapitulées dans les tableaux synthétiques V.5 à V.15.

Tableau V.5 - Ponts roulants lourds de surface (existants)

N° CERN	Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse de levage				Direction		Translation	
				s/s crochet	de levage	type	N°	GV	Capacité GV	VN	Vitesse variable	GV	PV	GV	PV
	Unité	t	m	m	m	Simple/ Double		m/mn	t	m/mn	de ... à ... m/mn	m/mn	m/mn	m/mn	m/mn
PR 745	SD1	20	15,00	9,00	91,40	D	20	30	0(2)	10	0,2-3	vit. variable de 0,1 à 13		vit. variable de 0,2 à 27	
PR707	SD2	10	15,00	8,80	54,20	D	10	30	0(2)	10	0,6-3	0,3 à 10		0,3 à 20	
PR712	SD4	10	15,00	8,87	147,50	D	10	30	0(2)	10	0,2-3	0,1 à 10		0,1 à 18	
PR717	SD6	10	15,00	8,80	105,00	D	10	30	0 2)	10	0,2-3	0,4 à 11		0,7 à 28	
PR722	SD8	10	15,00	8,70	108,50	D	10	30	0(2)	10	0,2-3	0,3 à 10		0,5 à 22	
PR709	SX2	65	28,90	8,10	59,30	D	63	12,5	5	6,5	0,4-3	11	1	25	2,5
PR714	SX4	80	14,10	9,87	153,45	D	63	20	5	5	0,5-5	10	1	20	6
PR719	SX6	80	14,10	10,00	110,40	D	63	20	5	5	0,5-4,5	10	1	20	2
PR725	SX8	80	14,10	9,85	113,50	D	63	20	5	5	0,5-5	10	1	20	2
PR708	SUH2	20	13,50	5,80	6,90	D	16	6	-	0,6	-	10	1	20	2
PR713	SUH4	20	13,50	5,80	6,90	D	16	6	-	0,6	-	10	1	20	2
PR718	SUH6	20	13,50	5,80	6,90	D	16	6	-	0,6	-	10	1	20	2
PR724	SUH8	20	13,50	5,80	6,90	D	16	6	-	0,6	-	10	1	20	2
PR706	SXL2	63	18,40	7,70	7,70	D	63	66,3	63	-	0,1-2	variable 0,5 à 10		variable 2 à 23	
PR701	SDI8	16	14,50	5,10	84,30	Palonnier		33	(3) à vide	10	0,35-3	-	-	rotation 4,6 0,4	

Tableau V.6 - Ponts roulants lourds de surface (nouveaux)

N° CERN	Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse variable (levage) <i>de 0 à ... m/mn</i>	Direction variable <i>m/mn</i>	Translation variable <i>m/mn</i>
				s/s crochet	de levage	type	N°			
	<i>unité</i>	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Simple/ Double</i>				
PR758	SX5	80	20,6	18,3	115,3	D	40	6	16	20
PR759	SX5	80	20,6	18,3	115,3	D	40	6	16	20
PR763	SMH18	20	13,5	5,7	5,7	D	12	6	16	20
PR764	SD18	10	16,94	9,3	100,3		6	10	16	20
PR761	SH5	10	24,3	6,3	6	D	6	6	8	10
PR769	SHM4	20	13,5	5,7	5,7	D	12	6	16	20
PR771	SDX15	16	16	9	92	D	10	12	16	20
PR772	SH15	10	23,6	6	6	D		6	8	10
PR223	SDI2	40	19,76	7	54	D	12	10	16	20
PR776	SX15	280	20	9,3	101,8	D	80	3.4	16	8
PR777	SX15	20	18,6	6,2	97	D	12	12	10	20
PR759	SDX5	80	14,2	10	106,9	D	40	6	16	20

Tableau V.7 - Palans auxiliaires - ponts lourds de surface (existants)

Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse de levage				Direction		Translation	
			s/s crochet	de levage	type	N°	GV	Capacité GV	PV	Vitesse variable	GV	PV	GV	PV
<i>unité</i>	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>M</i>	<i>m</i>	<i>Simple/ Double</i>		<i>m/mn</i>	<i>t</i>	<i>m/mn</i>	<i>de ... à ... m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>
SX2 PA1064	3,2	22,00	8,00	8,00	S	-	19,5	3,2	2	-	12	3	-	-
SX PA1076	5	11,10	10,00	10,00	S	-	10	5	1	-	11	3	-	-
SX6 PA1092	5	11,10	10,00	10,00	S	-	10	5	1	-	11	3	-	-
SX8 PA1078	2,5	11,10	10,00	10,00	S	-	11	2,5	1,2	-	10	2,5	-	-

Tableau V.8 - Palans auxiliaires - ponts lourds en souterrain (existants)

Situation	Capacité levage	Portée (*)	Hauteur		Crochet type	Vitesse de levage			Direction vitesse		Translation vitesse		Nota
			s/s crochet	de levage		GV	PV	vitesse variable	nominale	variation	nominale	variation	
	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Simple/ Double</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>de ... à ... m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	.
UX25 PA1032 PA1039	3,2 11	13,5 -	16,20 20,10	17,50 20,10	S S	23 5	- 0,5	2-3 -	12 11	3 2,5	- -	- -	(1)
UX45 PA1050 PA1051	5 5	12,7	13,50	13,50	S	12	1	-	12	3	-	-	(1) (2)
UX65 PA1073 PA1074	5 4	12,7	13,50	13,50	S S	10 12	1 1,2	- -	11 (fixée au chariot)	2,8	-	-	(3)
UX85 PA1058-1061 PA1059-1060	2,5 3,2	12,7	13,50	13,50	S	12 4,5	0,5 1,2	-	10 V.	2,5 chariot	-	-	(1) (2)

(*) *Portée: dans ce cas, la portée représente la course du crochet*

(1) *La vitesse de translation = celle du pont*

(2) *Palan équipant chacun des ponts 40 t et 2 x 40 t*

(3) *Palan fixé sur le chariot des ponts 2x40 t*

Tableau V.9 - Ponts roulants lourds en souterrain (existants)

Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse de levage				Direction vitesse		Translation vitesse		Nota
			s/s crochet	de levage	type	N°	GV	capacitéGV	PV	vitesse variable	nominale	variation	nominale	variation	
<i>unité</i>	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Simple/Double</i>		<i>m/mn</i>	<i>t</i>	<i>m/mn</i>	<i>de ... à ... m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>de ... à ... m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>de ... à ... m/mn</i>	
UX25 PR704	40	17,00	16,20	17,50	D	32	10	40	-	0,4 - 2,5	5,8	0,3 - 1,4	12	0,4 - 3,4	(2)
UX45 PR710 PR711	2 x 40	15,00	13,50	13,50	D	32	10	40	-	0,5 - 3	5	0,5 - 5	11	1,2 - 11	(1) (2) (3)
UX65 PR715 PR716	2 x 40	15,00	13,50	13,50	D	32	10	40	-	0,5 - 3	5	0,5 - 5	11	1,2 - 11	(1) (2) (3)
UX85 PR720 PR721	2 x 40	15,00	13,50	13,50	D	32	10	40	-	0,5 - 3	5	0,5 - 5	11	1,2 - 11	(1) (2) (3)

(1) Ces ponts peuvent être accouplés pour lever des charges de 80 t. Ils sont munis chacun d'un palan auxiliaire

(2) Ponts équipés en plus de la commande à boutons poussoirs d'une commande UHF

(3) Poutre de manutention de 8 t pour les ponts 2x40 t de UX 6 et 8

Tableau V.10 - Ponts roulants lourds en souterrain (nouveaux)

Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse variable (levage)	Direction vitesse	Translation vitesse	Nota
			s/s crochet	de levage	type	N°				
<i>unité</i>	<i>t</i>	<i>m</i>		<i>m</i>	<i>Simple/Double</i>		<i>0 à ... m/mn</i>	<i>nominale</i>	<i>nominale</i>	
UX25/PR774	40	17	18,5	18	D	6	10	10	20	
USA15	10	0	12	12	S	?	-	0	10	palan
UJ22	20	0	4,2	3,7	S	?	-	0	10	palan
UD68/PR775	30	7,1	5,5	5,3	D	20	5	8	10	
UX15/PR778	65	28,7	24,6	26,6	D	25	7,3	10	10	
UX15/PR779	65	28,7	24,6	26,6	D	25	7,3	10	10	
UD62/PR781	30	7,1	5,5	5,4	D	20	5	8	10	
USC5/PR780	10	10	7,64	7,5	D	6	6	16	20	
UXC5/PR760	20	20	18,3	18,3	D	6	9	20	16	

Tableau V.11 - Ponts roulants légers de surface (existants)

N° CERN	Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse de levage			Direction		Translation	
				s/s crochet	de levage	type	N°	GV	PV	Vitesse variable	GV	PV	GV	PV
	<i>unité</i>	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Simple/ Double</i>		<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>de.. à..m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>
PA1135	SD3	2	17,00	4,46	75,00	S	-	20	5	-	10	2,5	-	-
?	SR2	5	15,40	4,50	6,65	S	2,5	4	0,5	-	10	3	30	
PR703	SR1	5	15,40	4,50	6,65	S	5	4	0,4	-	10	2,5	32	16-3
?	SR3	5	15,40	4,50	6,65	S	2,5	4	0,5	-	10	3	30	0,3
PR732	SR4	5	15,40	4,50	6,65	S	2,5	4	0,5	-	10	3	30	0,3
PR735	SR5	5	15,40	4,50	6,65	S	2,5	4	0,5	-	10	3	30	0,3
PR723	SR8	5	15,40	4,50	6,65	S	5	4	0,4	-	10	2,5	32	16-3
PR737	SR6	5	15,40	4,50	6,65	S	2,5	4	0,5	-	10	3	30	0,3
PR741	SR7	5	15,40	4,50	6,65	S	2,5	4	0,5	-	10	3	30	0,3
PR727	SA2	5	15,40	4,50	6,65	S	2,5	4	0,5	-	10	3	30	0,3
PR738	SA6	5	15,40	4,50	6,65	S	2,5	4	0,5	-	10	3	30	0,3
PR728	SF2	3,2	10,35	4,45	7,50	S	2,5	5	0,63	-	10	3	30	0,3
PR733	SF4	3,2	10,35	4,45	7,50	S	2,5	5	0,63	-	10	3	30	0,3
PR739	SF6	3,2	10,35	4,45	7,50	S	2,5	5	0,63	-	10	3	30	0,3
PR743	SF8	3,2	10,35	4,45	7,50	S	2,5	5	0,63	-	10	3	30	0,3

Tableau V.12 - Ponts roulants légers de surface (nouveaux)

N° CERN	Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse variable (levage)	Direction	Translation	Nota
				s/s crochet	de levage	type	N°				
	<i>unité</i>	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Simple/ double</i>		<i>0 à m/mn.</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	
PR770	SDH4	5	8,144	10,3	10,3	D	?	6	16	20	
PR766	SUX1	8	13,8	9,06	9,06	D	6	6	16	20	
PR762	SF1	3,2	10,35	8,5	8	S	?	5	16	20	
PR765	SUX5	8	14,6	9,2	9,2	D	6	6	16	20	
PR767	SF5	3,2	10,35	7,65	7,6	S	?	5	16	20	
PR773	SDH8	5	8,48	10,3	10,3	D	?	6	16	20	
PR222	SMI2	8	11,35	8	8	D	6	6	16	20	

Tableau V.13 - Ponts roulants légers en souterrains (existants)

N° CERN	Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse de levage			Direction		Translation		Nota
				s/s crochet	de levage	type	N°	GV	PV	Vitesse variable	GV	PV	GV vitesse	PV variable	
	<i>unité</i>	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Simple /double</i>		<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>de..à.. m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>de.. m/mn</i>	<i>à.. m/mn</i>	
PR729	UW25	3,2	6,30	5,05	5,95	S	1	5	1,25	-	7,5	2	30	0,3	(1)
PR734	UW45	3,2	6,30	5,05	5,95	S	1	5	1,25	-	7,5	2	30	0,3	(1)
PR740	UW65	3,2	6,30	5,05	5,95	S	1	5	1,25	-	7,5	2	30	0,3	(1)
PR744	UW85	3,2	6,30	5,05	5,95	S	1	5	1,25	-	7,5	2	30	0,3	(1)

(1) Tous ces ponts sont du type « monopoutre électrique suspendue ». La vitesse de translation est à variation continue.

Tableau V.14 - Ponts roulants légers en souterrain (nouveaux)

N° CERN	Situation	Capacité levage	Portée	Hauteur		Crochet		Vitesse de levage			Direction		Translation		Nota
				s/s crochet	de levage	type	N°	GV	PV	Vitesse variable	GV	PV	GV vitesse	PV variable	
	<i>unité</i>	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Simple /double</i>		<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>de..à.. m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>m/mn</i>	<i>de.. m/mn</i>	<i>à.. m/mn</i>	
	UJ68	8	0	3,7	3,7	S	?	6			0				palan
	UJ62	8	0	3,7	3,7	S	?	6			0				palan

Tableau V.15 - Ascenseurs surface-souterrain (existants et nouveaux)

Point	Puits	Profondeur cabine	Largeur cabine	Porte			Course	Charge maxi.	Nombre maxi. de personnes transportées	Vitesse
				Hauteur	Largeur	Accès				
unités		m m	m m	m m	m m	-	m	kg	-	m/s
1	PM15	2700	1850	2700	1850	2 (1)	82,48	3000	33	1,6
	PX15*	2700	1800	2700	1800	1	?	3000	33	1,6
2	PM25	2700	1850	2700	1850	2 (1)	45,35	3000	33	1,6
	PX24 (L1)	1400	1100	2500	800	3 (1)	51,34	630	8	1,0
	PX24 (L2)	1400	1100	2000	800	5 (1)	24	1000	13	1,0
3	PZ33	2100	1100	2200	900	2 (1)	99,25	1000	13	1,6
4	PM45	2700	1850	2700	1850	2 (1)	138,31	3000	33	1,6
	PZ45	2100	1100	2500	900	2 (1)	143,64	1000	13	2,5
5	PM54*	2700	1800	2700	1800	1	?	3000	33	1,6
	PM56	1950	1050	2500	900	2 (2)	90,015	1000	13	2,5
6	PM65	2700	1850	2700	1850	2 (1)	94,485	3000	33	1,6
	PZ65	2100	1100	2500	900	2 (1)	100,57	1000	13	2,5
7	PM76	1950	1050	2500	900	2 (2)	96,432	1000	13	2,5
8	PM85	2700	1850	2700	1850	2 (1)	99,596	3000	33	1,6
	PZ85	2100	1100	2500	900	2 (1)	104,24	1000	13	2,5

(1)Accès = du même côté

(2)Accès opposés

* Nouveaux ascenseurs

4.2 Principe de la prévention

Le code de sécurité D1 du CERN (équipements de levage) définit les règles et les normes à suivre pour l'étude, la construction, l'installation, les essais, l'utilisation, la maintenance et les contrôles et inspections de tout équipement de levage et de manutention utilisé sur le domaine du CERN.

Ce code est basé sur :

- les directives européennes (CE) ;
- les normes et codes de construction (CEN, ISO, CEI, FEM, NF) ;
- la réglementation spécifique du CERN (codes et instructions de sécurité).

En particulier, les ponts roulants sont dimensionnés selon les règles FEM et les ascenseurs suivent les normes européennes EN 81-1 et EN 81-2 de la CEN. Les contrôles réglementaires de tous les équipements de levage et de manutention sont effectués par un organisme agréé. La maintenance de ces équipements est assurée par une firme spécialisée, sous la supervision du CERN. Tout personnel appelé à utiliser, sur le domaine du CERN, même occasionnellement, les appareils de levage doit y être habilité. Toute manutention dans ou au-dessus d'un puits implique automatiquement l'interdiction de la zone de projection en voisinage du puits. Les abords supérieurs des puits, comme leurs projections au sol, sont physiquement interdits (grillages). Lors de manutentions, les zones de projection ne sont accessibles qu'au personnel du transport qualifié et bien informé.

4.3 Dispositions particulières

Ponts roulants

L'encombrement des bâtiments de surface et des cavernes de service souterraines ainsi que la taille des cavernes expérimentales, d'une part, et leur coefficient de remplissage, d'autre part, font que les solutions classiques de commande par boîte à boutons poussoirs pendante ou de cabines fixées sur les poutres des ponts sont inapplicables. Il a donc été décidé d'utiliser la radio-commande pour tous les mouvements. L'expérience a montré la nécessité d'une initialisation de la commande par signal optique direct émis par le pontier. Les transferts de commande entre les bâtiments de surface et les zones souterraines suivent les règles classiques basées sur un arrêt automatique des charges en sommet de voûte et sur une reprise en charge par le pontier depuis le bas. Les ponts roulants des zones souterraines UD 62 et UD 68, desservant les cavernes souterraines recevant les blocs d'arrêts de faisceau («beam dumps»), sont commandés depuis les zones protégées en raison de la radioactivité induite. Les éléments à déplacer seront accrochés avec des dispositifs de préhension automatique déjà utilisés dans les autres zones radioactives du CERN.

Ascenseurs

Les ascenseurs surface-souterrain sont considérés comme des appareils d'immeuble à grande hauteur avec un frein de secours supplémentaire agissant en cas de survitesse en montée afin de parer l'éventualité d'une rupture d'un élément de la machinerie, la cabine étant chargée au minimum. Ces ascenseurs sont installés dans des gaines préfabriquées en béton. Ces gaines, incluant également un escalier de secours, doivent être :

- stables au feu 90 mns (SF 90) ;

- coupe-feu 60 mns (CF 60) ;
- pare-flammes 90 mns (PF 90).

Deux zones de sécurité (sas) qui se trouvent en sommet et fond de puits permettent l'arrivée de l'ascenseur en cas d'évacuation massive. Les gaines sont fixées aux parois des puits par des attaches permettant leur dilatation verticale, tout en assurant une tenue à l'accélération horizontale spécifiée de 0,15 g (séisme). Il faut noter que l'alimentation électrique de secours des ascenseurs est assurée des groupes électrogènes.

5 GAZ NOCIFS

Entrent dans cette catégorie les gaz inflammables, «poisonneux», asphyxiants ou radioactifs. Contrairement à un accélérateur à électrons ou positons, un accélérateur à protons produit des gaz poisonneux (NO, NO_x, O₃ etc.) en quantité insignifiante, fait essentiellement dû au faible rayonnement synchrotronique émis.

Les problèmes liés à l'utilisation des gaz inflammables dans les expériences et des gaz asphyxiants pour la cryogénie, sont traités dans la section 3 de ce chapitre. L'activation d'air dans le tunnel et les cavernes d'expérience pendant l'exploitation de l'accélérateur est expliquée dans le chapitre IV de ce rapport.

6 BRUIT

6.1 Inventaire des risques

Les équipements et les installations LHC pouvant être source de bruit sont essentiellement :

- les sous-stations électriques avec leurs transformateurs ;
- les groupes électrogènes ;
- les stations de pompage d'eau ;
- les bâtiments comprenant les compresseurs et pompes pour la cryogénie ;
- les équipements pour les systèmes de ventilation et de climatisation ;
- les échangeurs atmosphériques.

6.2 Réglementations applicables

Le CERN a édité un code de sécurité (A8) relatif à la protection contre le bruit. Ce code est basé sur :

- la Directive européenne 86/188/CEE ;
- le Décret français 88-405 relatif à la protection des travailleurs contre le bruit ;
- l'Arrêté français du 23 janvier 1997 relatif à la limitation des bruits émis dans l'environnement par des installations classées pour la protection de l'environnement ;
- la norme NF-S-31.010, relative à la caractérisation de mesure des bruits dans l'environnement.

Le code de sécurité A8 fixe les limites d'exposition aux bruits suivants :

- * limite de la propriété 40 dB (A) 22 h à 6 h

(zone 2, habitation rurale ou urbaine avec faible circulation)	45 dB (A) 6 h à 22 h (dimanche et jours fériés) 50 dB (A) 7h à 22h
* exposition continue à l'intérieur des bâtiments	85dB (A)

6.3 Principes de la prévention

Le LHC réutilise toutes les installations du LEP dont le niveau sonore est conforme à la législation. Ceci a été vérifié par un organisme français agréé lors d'une campagne de mesures à la fin de l'année 1995 (dossier n°9553122/GD/PR-CETE de l'APAVE LYONNAISE). Pour tous les équipements nouveaux, le CERN exige que la réglementation et les normes concernant l'émission du bruit de ces équipements soient respectées (conformité CE).

De plus, le CERN a pu vérifier, de par son expérience au cours des dernières années, que certaines installations pouvaient émettre des nuisances sonores importantes et, tenant compte de cette constatation, a pris toutes les dispositions utiles et nécessaires dans la conception de nouveaux bâtiments et infrastructures afin de réduire le bruit au niveau le plus bas possible, compte tenu de la technicité des installations.

7 INONDATIONS

7.1 Inventaire des risques

Eaux de surface

Les puits d'accès mettent en communication les ouvrages souterrains et la surface. Les eaux pluviales peuvent pénétrer par ces puits en souterrain et s'accumuler dans les points bas de la machine. Le point le plus bas du tunnel du LHC est situé à 1 km du point 8 en direction du point 7. Les débits d'eaux d'infiltration à travers les ouvrages non injectés seront faibles et facilement évacués par les drains et les pompes des puisards.

Eau brute

Les circuits de distribution et de rejet de l'eau brute, ainsi que les volumes mis en jeu sont décrits au chapitre III, paragraphe 3.7.2. Les canalisations aller et retour d'eau brute sont noyées dans le radier du tunnel, à l'exception de leur passage dans les ouvrages souterrains US, RE, UJ, UW et UX. Le seul risque majeur d'inondation peut provenir d'une rupture importante d'une canalisation due par exemple à un «coup de bélier». D'autres ruptures pourraient avoir lieu à la suite de chocs sur des piquages situés hors du béton. Les ruptures importantes conduiraient à la vidange de la demi-boucle concernée.

Deux cas de rupture majeure ont été calculés: la rupture de la demi-boucle d'alimentation entre le PM 25 et le PM 15 et la rupture de la demi-boucle d'alimentation au point bas. Au cas où aucune vanne d'isolement ne serait fermée, la première conduirait à l'écoulement d'environ 450 m³ et la seconde à l'écoulement d'environ 650 m³ (volume total des demi-boucles prises en considération).

Eau déminéralisée

Les circuits d'eau déminéralisée et les volumes mis en jeu sont décrits au chapitre III, paragraphe 3.7.2. Les risques d'inondation associés à ces circuits sont de la même nature que ceux associés à l'eau brute. Il faut noter que les circuits d'eau déminéralisée sont subdivisés par octant. L'écoulement accidentel d'un octant représente un volume de l'ordre de 280 m³.

Eau primaire

Les quatre circuits d'eau primaire représentent des petits volumes stockés en comparaison avec ceux d'eau brute (de l'ordre de 40 m³ par circuit).

Réseaux auxiliaires

Tous ces circuits ont des volumes internes compris entre 4 et 40 m³.

7.2 Principes de la prévention

Eaux de surface

Les revêtements intérieurs des puits sont prolongés en surface par des margelles continues dépassant de 20 cm les dallages des halls. Aucune galerie technique, à l'exception du PM54, ne débouche directement sur un puits. Un drain collecte les eaux du sol dans le tunnel principal, les ouvrages UJ, UX et UW. Il est largement dimensionné pour l'évacuation des eaux d'infiltration éventuelles. Sa section est de 0,238 m² et sa pente maximum d'environ 1,5%.

Eaux brute et déminéralisée

Dans le cas d'une fuite importante (plusieurs dizaines de m³/h, dans le cas de la rupture accidentelle d'une des demi-boucles d'alimentation), une alarme située à la station de pompage principale indiquera que le débit dépasse la valeur de consigne affichée en fonction de la marche prévue des installations. Cette alarme, renvoyée à la centrale des pompiers (SCR) et en salle des contrôles techniques (TCR), provoquera la recherche de la cause de l'augmentation anormale de débit (fuite accidentelle ou mise en service d'une prise d'eau incendie). L'observation du fonctionnement des pompes de relevage des différents points permettra la localisation d'une fuite importante éventuelle. Après l'arrêt des pompes d'alimentation, le circuit en cause pourra être isolé par la fermeture à distance d'une des vannes motorisées segmentant les différents circuits. La rupture d'une colonne montante en PM, en aval des pompes de surpression, se traduirait par une chute du débit nécessaire aux utilisateurs en surface et, comme dans le cas précédent, la localisation de la fuite se fait par l'observation des fonctionnements des pompes de relevage. Une fuite sur les circuits de rejet est détectée par le fonctionnement des pompes de relevage.

Dispositions générales de prévention

Les volumes normaux de rétention en chaque point comprennent une fosse des eaux claires (EC) et leurs conduits d'amenée. Les pompes de relevage (deux par point) assurent un débit de relevage de 40 m³/h sauf au point bas et au point 8 où il est de 60 m³/h. Aux points pairs, les pompes sont installées en un point de la caverne UX. Des volumes de rétention supplémentaires

sont constitués par la surface de chaque zone d'expérience (UX) et les faux planchers des UW. Un niveau d'eau de 30 cm dans les UX correspond à un volume de rétention de 400 m³ environ. De plus, dans les UX des points 4, 6 et 8 il existe un caniveau d'eau claire sur toute la longueur de l'UX qui correspond à un volume de 35 m³. Le volume de rétention constitué par les faux planchers des UW est compris entre 350 et 450 m³. Ce volume est relié au puisard des UX par un drain. Au point bas de la machine, un envahissement des eaux de l'ordre de 500 m³ se traduirait par une hauteur d'eau de 30 cm maximum dans le tunnel. Pour préserver les conditions de sécurité des ascenseurs en cas d'inondation, les fosses des ascenseurs des PM et des PZ ont été surélevées de 30 cm aux points pairs ou drainées vers les UX. Aux points impairs, le débit du drain débitant dans la fosse des pompes de relevage est limité à une valeur de 40m³/h. Le surplus est envoyé au point pair suivant. En régime normal, une seule pompe de relevage est en marche en chacun des points. La mise en marche de la seconde pompe déclenche une alarme de niveau 2 (voir section 8 de ce chapitre). Le déclenchement d'un flotteur situé en partie haute de la fosse se traduit par une alarme de niveau 3 (alarme inondation). En fonction du débit arrivant dans la fosse des eaux claires mesuré par des flotteurs placés à différentes hauteurs, les deux pompes de relevage situées à chaque point fonctionnent de la façon suivante :

- d'une façon générale, si le débit est inférieur à 10 m³/h, une pompe fonctionne à petite vitesse ; s'il est compris entre 10 et 20 m³/h deux pompes fonctionnent à petite vitesse (alarme de niveau 2); lorsqu'il passe à une valeur comprise entre 20 et 40 m³/h, les deux pompes fonctionnent à grande vitesse; au-delà de 40 m³/h, l'alarme de niveau 3 est déclenchée ;
- pour le point 8, une pompe fonctionne à petite vitesse jusqu'à 15 m³/h ; ensuite, deux pompes fonctionnent à petite vitesse pour des débits compris entre 15 et 30 m³/h et à grande vitesse pour des débits compris entre 30 et 60 m³/h; au-delà l'alarme de niveau 3 est déclenchée ;
- au point bas de la machine, jusqu'à un débit de 20 m³/h une pompe fonctionne à petite vitesse ; entre 20 et 40 m³/h, deux pompes fonctionnent ; entre 40 et 60 m³/h trois pompes fonctionnent ; au-delà, l'alarme de niveau 3 est déclenchée.

Cas particuliers

Expériences Atlas et CMS (points 1 et 5)

Deux fosses de rétention sont également prévues pour chaque zone expérimentale. Elles peuvent recevoir les effluents des cavernes UX et des locaux USA 15 et USC55. Le système de pompage est identique à celui installé aux points pairs.

Tunnel d'injection TI2

Du fait de son tracé, le tunnel TI 2 dispose d'un point bas. Une fosse équipée de pompes de relevage permettra le stockage et le transfert des eaux jusqu'au drain du point 2.

Le risque d'inondation avec les dispositions arrêtées ne représente pas un danger pour le personnel et il est faible en ce qui concerne le matériel.

8 CHAMPS MAGNETIQUES DANS LES EXPERIENCES.

Les quatre expériences prévues dans le LHC utiliseront chacune au moins un électro-aimant de grande dimension pour mesurer l'impulsion des particules produites dans les collisions entre faisceaux de 7 TeV. Ces aimants engendreront des champs magnétiques de fuite qui s'étendent au delà de leurs propres dimensions et qui varieront suivant la configuration et la force de ces aimants. Une étude de sécurité afférente à ces champs magnétiques élevés a été menée, et des mesures

spécifiques sont prévues pour limiter les risques d'accident. La force mécanique exercée sur les pièces métalliques, en particulier sur des objets libres comme les outils à main, constitue la principale préoccupation. L'accès à l'intérieur des champs de fuite sera limité au personnel spécialisé qui a reçu la formation correspondante. L'Instruction de Sécurité CERN IS36 «Règles de sécurité pour l'utilisation des champs magnétiques statiques au CERN» sera strictement appliquée. Cette Instruction résume les dangers techniques rencontrés et précise les règles et limites d'exposition à respecter pour réduire les risques dus aux champs magnétiques statiques. Toute l'attention sera également portée sur la sensibilité des équipements de sécurité aux champs magnétiques. Il est bon de noter qu'en aucun cas il n'y aura de champ magnétique résiduel mesurable en surface.

L'expérience CMS

L'expérience CMS utilise un grand solénoïde^[1] qui crée un champ central de 4 Tesla. L'aimant est fermé et le retour de champ magnétique se fait dans la culasse de fer, mais un champ de fuite important résulte de l'emploi de bobines supraconductives. Ce champ de fuite a été calculé jusqu'à une distance de 50 m, et il est essentiellement limité à la cavité UX55, qui n'est pas accessible pendant que les faisceaux circulent dans le LHC. Cependant, le temps nécessaire pour monter le champ magnétique est très long et l'aimant restera sous tension lors d'arrêts techniques de courte durée. Seul un nombre limité de spécialistes pourra accéder à la cavité expérimentale pendant de tels arrêts. Le champ de fuite pourra atteindre 0,1 Tesla près de l'aimant et les conditions de travail seront strictement contrôlées dans ces régions. L'intérieur de l'aimant est rempli de détecteurs de particules et il est impossible d'y pénétrer lorsque l'ensemble expérimental est dans sa configuration opérationnelle. Le champ de fuite ne dépassera pas 10 mTesla dans la cavité de service USC55, toujours accessible.

L'expérience ATLAS

L'expérience ATLAS utilise un ensemble de quatre aimants supraconducteurs^[2], mais seul l'un d'entre eux, le Toroïde central, a un volume magnétique accessible lorsque le détecteur est dans sa configuration d'opération. Ce Toroïde central mesure 25 m de long pour un diamètre extérieur de 20 m, et il produit un champ de fuite qui s'étend bien au delà de ses dimensions radiales. Cependant, le champ principal n'est que de 1 Tesla au centre de l'aimant, et le champ de fuite est de l'ordre de 5 mTesla sur les coursives qui longent les parois de la cavité expérimentale UX15. Seules de courtes interventions seront autorisées dans les régions où le champ magnétique dépasse 0,2 Tesla. La présence du champ magnétique sera signalée à l'entrée de la cavité UX15. Autour de l'expérience, les conditions d'accès seront restreintes en conséquence. Les mouvements d'objets magnétiques dans la zone seront contrôlés et suivis par un système de gestion approprié. Le champ ne sera que de quelques mTesla dans la cavité de service USA15.

L'expérience ALICE

L'expérience ALICE utilise deux grands aimants^[3]. Ceux-ci ne sont pas supraconducteurs et le temps de mise sous tension est rapide, ce qui permet de couper le champ magnétique avant d'autoriser l'accès à la cavité expérimentale UX25. Le grand solénoïde de 16 m de diamètre fonctionne depuis 1989 dans l'expérience L3 au LEP et ALICE l'utilisera avec un champ réduit. L'aimant supplémentaire est un dipôle conventionnel de grande ouverture qui fournira un champ de 1,5 Tesla dans son centre. Le champ de fuite de ces aimants est calculé et pris en compte en ce qui concerne les forces magnétiques et autres effets sur les équipements environnants. Il n'y aura pas de champ résiduel mesurable dans la salle de comptage qui sera accessible en permanence dans le puits

PX25. Des conditions d'accès particulières seront mises en place pour certains tests qui demanderont la présence de personnel dans la caverne expérimentale UX25 avec les aimants sous tension.

L'expérience LHC-B

L'expérience LHC-B utilise également un dipôle^[4] de grande ouverture qui permet de mesurer l'impulsion des particules produites dans le spectromètre. Cet aimant aura un champ central de 1,1 Tesla fourni par une bobine supraconductrice et il sera donc nécessaire de le laisser sous tension pendant les arrêts techniques courts. Il sera alors possible d'entrer dans la caverne expérimentale UX85, mais il n'y aura pas d'accès dans la région centrale de l'aimant occupée par des détecteurs. L'importante culasse de retour du champ magnétique qui pèse plus de 1000 tonnes réduit considérablement le champ de fuite. Des barrières, associées à une signalisation claire du danger, délimiteront les espaces qui peuvent être soumis à un champ magnétique important. Des conditions d'accès particulières seront mises en place pour permettre certains tests qui nécessiteront la présence de personnels dans ces espaces. La salle de comptage installée dans UX85, accessible en permanence, sera libre de tout champ résiduel mesurable.

Références

- [1] CMS magnet project technical design report, CERN/LHCC 97-10, CMS TDR 1, 2 May 1997.
- [2] ATLAS magnet system technical design report, CERN/LHCC 97-18, ATLAS TDR 6, 30 April 1997.
- [3] ALICE technical proposal CERN/LHCC 95-71, LHCC/P3, 15 December 1995 et ALICE, the forward spectrometer, CERN/LHCC 96-32, LHCC/P3-Addendum 1, 15 October 1996.
- [4] LHCb technical proposal, CERN/LHCC 98-4, LHCC/P4, 20 February 1998.

9 SYSTEMES D'ALARMES DE SECURITE

9.1 Classification des alarmes

Les alarmes du LHC sont classées en trois niveaux suivant leur importance à l'égard de la sécurité.

Alarme de niveau 3 (de sécurité)

Alarme correspondant à une situation accidentelle ou anormale mettant ou pouvant mettre des vies humaines en danger.

Action: Départ immédiat des services de secours. Ces interventions de secours peuvent être suivies d'interventions de services techniques.

Alarme de niveau 2

Alarme correspondant à une situation anormale ou à un défaut technique d'un équipement ou d'un système. Si un système de sécurité est à l'origine de cette alarme, la situation pourrait dégénérer en situation de niveau 3 ou empêcher la transmission correcte d'une alarme de niveau 3.

Action: Intervention rapide de services techniques.

Alarme de niveau 1

Alarme correspondant à un défaut technique d'un équipement ou d'un système, ne nécessitant pas d'intervention immédiate.

Action: Intervention, éventuellement différée, des services techniques.

Informations

Information ne correspondant pas à une alarme, ni à un défaut, mais à un état d'un équipement ou d'un système.

Action: Prise en compte par les services concernés pour l'opération normale d'un équipement ou d'un système.

Liste des alarmes classées en niveau 3 (de sécurité)

- détection d'incendie;
- détection de gaz inflammable;
- détection de manque d'oxygène;
- détection d'inondation;
- immobilisation anormale d'un ascenseur;
- déclenchement d'arrêt d'urgence général;
- déclenchement d'un signal d'évacuation;
- décrochement de téléphone rouge (d'urgence).

9.2 Diffusion des alarmes

Deux systèmes distincts de transmission des alarmes vers la centrale des services de secours (SCR) et vers le centre de surveillance technique (TCR) ont été définis. Les deux systèmes sont indépendants l'un de l'autre. Ils sont redondants de manière non homogène. Grâce à ces systèmes, les services de secours disposent en permanence d'informations détaillées relatives à toutes les alarmes de niveau 3, telles que leur type et leur localisation.

Système réservé à la transmission des alarmes de niveau 3 vers les services de secours

Ce premier système est uniquement destiné à la transmission des alarmes de niveau 3 pour déclencher avec certitude l'intervention des services de secours. Il est conçu et testé pour assurer la plus haute fiabilité et il utilise des technologies numériques et des produits industriels qualifiés pour application de la sécurité.

Le LHC est divisé en zones de sécurité où chaque point forme une zone. Toutes les alarmes de niveau 3 sont affichées par zone sur un dispositif local de signalisation en surface. Ce dispositif, placé dans la zone de sécurité concernée, est facilement accessible par les services de secours et indique pour chaque alarme son type et sa localisation. Pour l'ensemble des sites du CERN, une quarantaine de zones de sécurité autant de dispositifs locaux de signalisation ont été définis.

Au niveau de ce dispositif, plusieurs signaux «somme» alarme de niveau 3 (synthèse de plusieurs alarmes) sont élaborés et envoyés vers la centrale des services de secours (SCR). Là, ces signaux «somme» sont affichés sur un dispositif central de signalisation. Ce dispositif informe les services de secours sur la zone de sécurité concernée et le type d'alarme (feu, gaz, inondation etc.).

Un dispositif central de signalisation identique et redondant est installé dans le centre de surveillance technique (TCR). La centrale des services de secours (SCR) peut transmettre par radio des informations liées à l'évolution des alarmes de niveau 3 à l'équipe faisant route vers la zone émettrice de l'alarme.

Système mixte de transmission des alarmes de niveau 3 vers les services de secours

Ce second système est conçu pour la transmission de la totalité des données de l'infrastructure technique du CERN, y compris toutes les alarmes de niveau 3 (voir chapitre III, paragraphe 3.4.8). Il est également d'une grande fiabilité et utilise des technologies informatiques validées et des produits industriels de grande qualité. Grâce à ce système, les services de secours disposent en permanence d'informations détaillées relatives à toutes les alarmes de niveau 3, telles que le type d'alarme et la localisation. Ces informations sont affichées sous forme de messages d'alarme et de synoptiques animés sur des écrans. Elles sont également disponibles au centre de surveillance technique (TCR), ainsi que dans les autres centres d'opération, tels que ceux des accélérateurs ou des expériences. Toutes les alarmes, avec leurs instants d'apparition et de disparition, sont enregistrées dans une base de données des alarmes. Elles sont accessibles pour des analyses ultérieures à tous les services qui peuvent en avoir besoin, y compris aux services de secours.

9.3 Installation, test et entretien des systèmes d'alarmes de sécurité

L'instruction de sécurité IS 37 du CERN définit les modalités d'installation, de mise en service, de réception, d'essai et d'entretien des systèmes d'alarmes de niveau 3. Elle définit également la procédure pour la mise hors service temporaire (ou définitive) et pour la remise en service d'un système d'alarme de niveau 3.

Références

- [1] Norme européenne EN 50 136: Systèmes d'alarme - Systèmes et équipements de transmission d'alarmes; 1996
- [2] Norme européenne EN 54: Systèmes de détection et d'alarme incendie; 1996
- [3] Norme internationale CEI 60 839-1: Systèmes d'alarme - Prescriptions générales; 1988/1994
- [4] Norme internationale CEI 60 839: Systèmes d'alarme - Prescriptions pour les systèmes de transmission d'alarme; 1991
- [5] Norme internationale ISO 7240: Systèmes de détection d'incendie et d'alarme; Partie 1: Généralités et définitions; 1988
- [6] Four Party Regulatory Consensus Report on the Safety Case for Computer-Based Systems in Nuclear Power Plants; AECB - Canada, DSIN/IPSN - France, NII - UK, USNRC - USA; 1998.

10 SEISMES

La région genevoise est bordée par un grand accident du socle connu sous le nom de «Faille du Vuache», à laquelle sont associées plusieurs failles annexes. Les études récentes menées sur

l'historique des séismes ayant affecté la région montrent que les épicentres probables se répartissent soit sur cette faille orientée Nord, soit sur un accident orienté Nord 50° qui longe le pied du Salève.

En 700 ans, une centaine de séismes ont été ressentis à Genève et ses environs. La magnitude n'a pu être mesurée que sur dix séismes. On trouve deux fois la magnitude 4,3, une fois la magnitude 4,2 et sept valeurs comprises entre 3 et 3,8. D'après les valeurs françaises (Règles parasismiques de 1969 et annexes), la zone de Genève se trouve située en zone 1B, sismicité faible. Le 15 juillet 1996, un tremblement de terre de magnitude 5,2 s'est produit sur le tracé de la Faille du Vuache. Son épicentre se trouvait à quelques kilomètres au nord d'Annecy. Lors de cet événement exceptionnel pour la région, aucune dégradation des faisceaux circulant dans le LEP à ce moment n'a été constatée. Aucune anomalie n'a été notée dans l'exploitation des autres accélérateurs du CERN. Aucun élément des différentes machines n'a été déplacé ou endommagé.

Ces observations montrent la très grande stabilité de tous les ouvrages. L'activité sismique de la région ne peut avoir aucune incidence sur l'exploitation du LHC et, a fortiori, sur les conditions de sûreté de la machine. Il a tout de même été décidé que toutes les structures hautes, particulièrement pour les expériences LHC, soient conçues de façon à supporter une accélération de 0,15 g sans dommage.

11 INSTALLATIONS CLASSEES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (ICPE)

Certaines installations du LHC tombent dans la catégorie des ICPE aux termes de la réglementation française en la matière. Ces installations sont :

- les stockages de gaz comprimés ;
- les installations de réfrigération et de compression ;
- les ateliers ou zones de charge d'accumulateurs.

Les stockages de gaz comprimés renfermant des gaz inflammables pour les expériences se font dans ou autour des bâtiments SG et SGX. Ces bâtiments, leurs installations, ainsi que les dispositions de sécurité sont décrits au chapitre III, paragraphe 3.7.4 et au paragraphe 3.1 de ce chapitre.

Des réservoirs cylindriques (250 m³, 20 bar) sont prévus pour le stockage d'hélium gazeux pour la cryogénie. L'azote et l'argon seront stockés sous forme liquide dans des dewars en surface. On trouve une description détaillée de ces stockages au chapitre III, paragraphe 3.7.5 et les principes de prévention au paragraphe 3.2 de ce chapitre.

Les installations de réfrigération et de compression sont répertoriées et décrites au chapitre III, paragraphe 3.4.2. Elles sont en conformité avec les réglementations en vigueur, en particulier avec tout ce qui concerne l'émission des bruits aériens (voir chapitre V, section 6).

Les modalités de recharge des batteries sont exposées au paragraphe 3.3 de la section 3 de ce chapitre. Pour la recharge de batteries s'effectuant dans les zones souterraines, une mesure de compensation sera mise en place. Elle consistera en un système de verrouillage arrêtant la charge des batteries en cas d'arrêt de la ventilation.

the 1990s, the number of people in the UK who are employed in the public sector has increased from 10.5 million to 12.5 million, and the number of people in the public sector who are employed in health care has increased from 2.5 million to 3.5 million (Department of Health 2000).

There are a number of reasons for this increase in the number of people employed in the public sector. One of the main reasons is the increasing demand for health care services. The population of the UK is ageing, and there is a growing number of people with chronic conditions who require long-term care. This has led to an increase in the number of people employed in health care, particularly in the public sector.

Another reason for the increase in the number of people employed in the public sector is the increasing demand for social care services. The population of the UK is ageing, and there is a growing number of people who require social care services. This has led to an increase in the number of people employed in social care, particularly in the public sector.

A third reason for the increase in the number of people employed in the public sector is the increasing demand for education services. The population of the UK is growing, and there is a growing number of people who require education services. This has led to an increase in the number of people employed in education, particularly in the public sector.

There are a number of challenges associated with the increasing demand for public sector services. One of the main challenges is the increasing cost of public sector services. The cost of health care services is increasing, and the cost of social care services is increasing. This has led to an increase in the number of people employed in the public sector, particularly in health care and social care.

Another challenge associated with the increasing demand for public sector services is the increasing demand for staff. The number of people employed in the public sector is increasing, and the number of people who are employed in health care and social care is increasing. This has led to an increase in the number of people employed in the public sector, particularly in health care and social care.

There are a number of ways in which the demand for public sector services can be met. One way is to increase the number of people employed in the public sector. This can be done by recruiting more people to the public sector, and by providing training and development opportunities for existing staff.

Another way in which the demand for public sector services can be met is to improve the efficiency of public sector services. This can be done by reducing the cost of public sector services, and by improving the quality of public sector services. This can be done by recruiting more people to the public sector, and by providing training and development opportunities for existing staff.

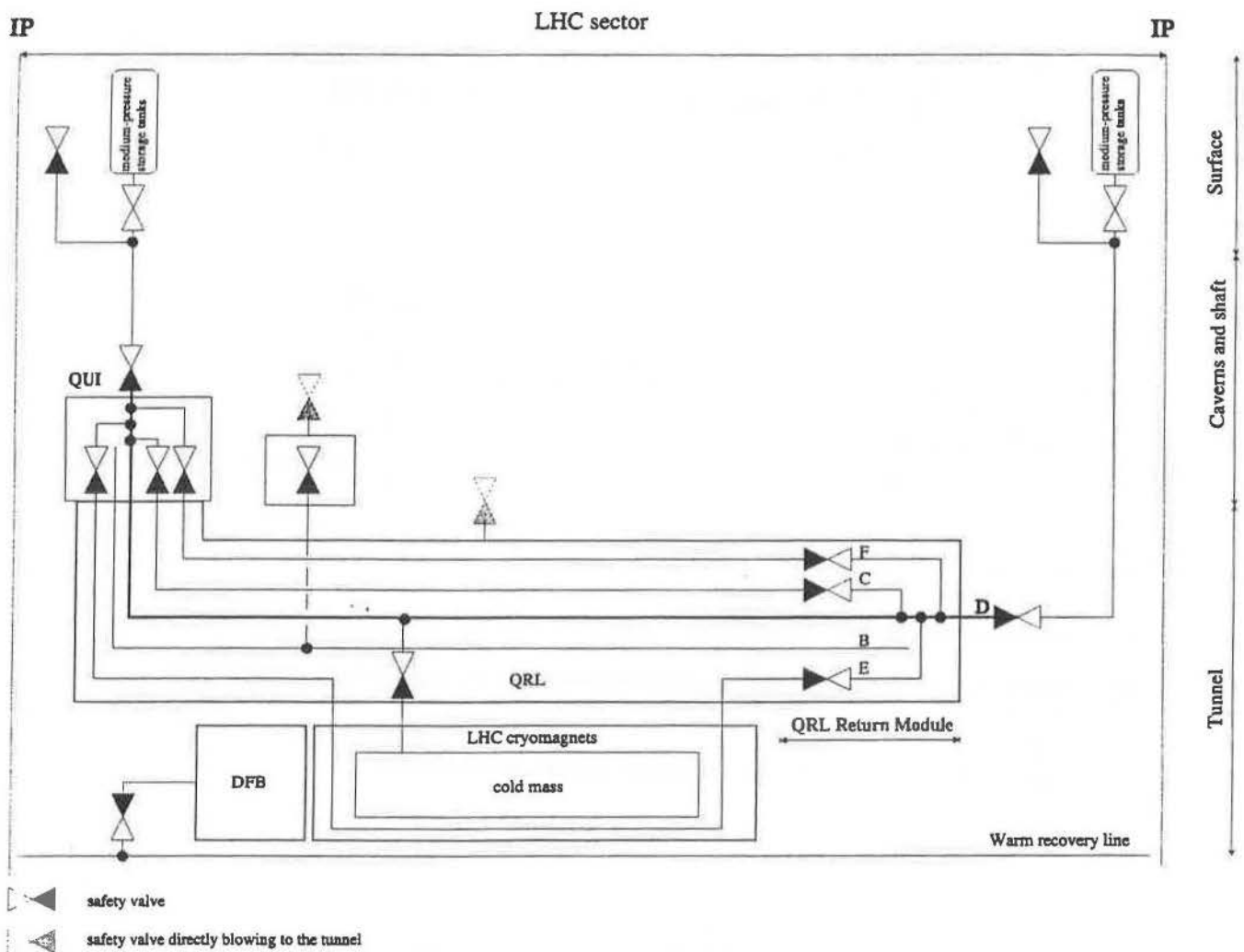
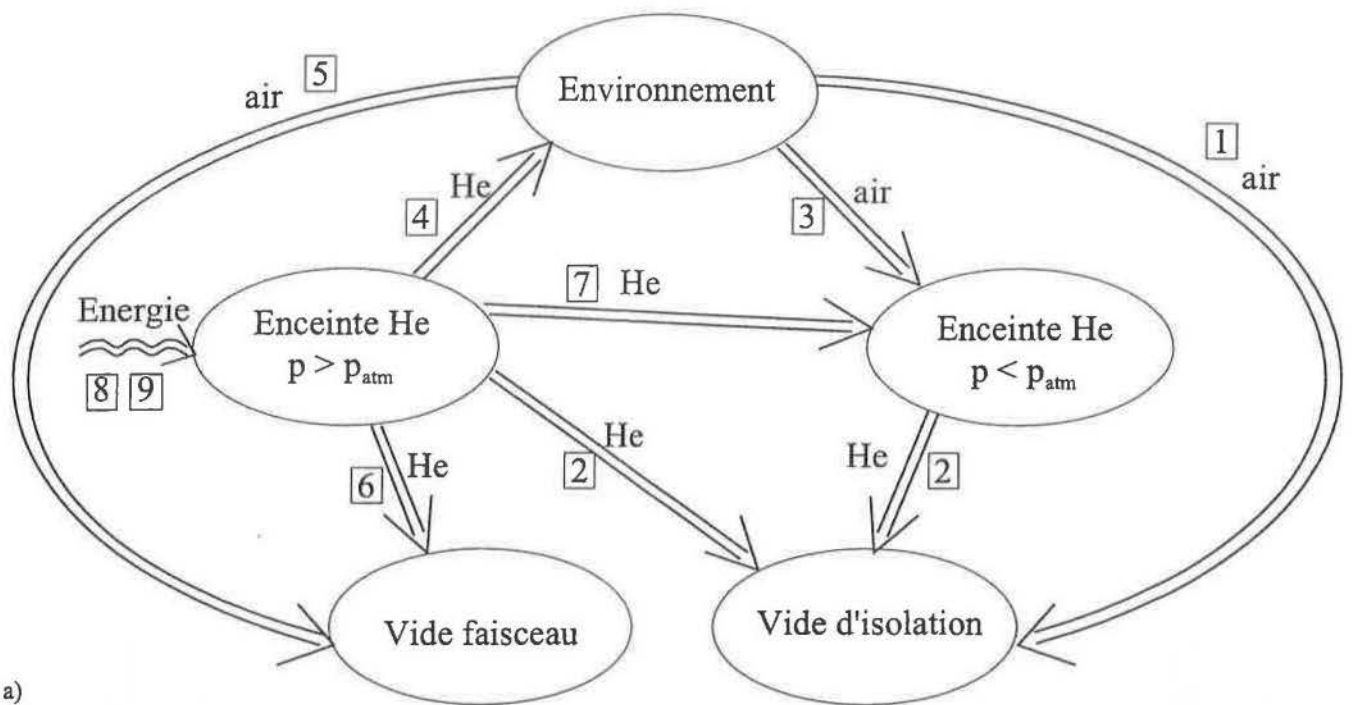
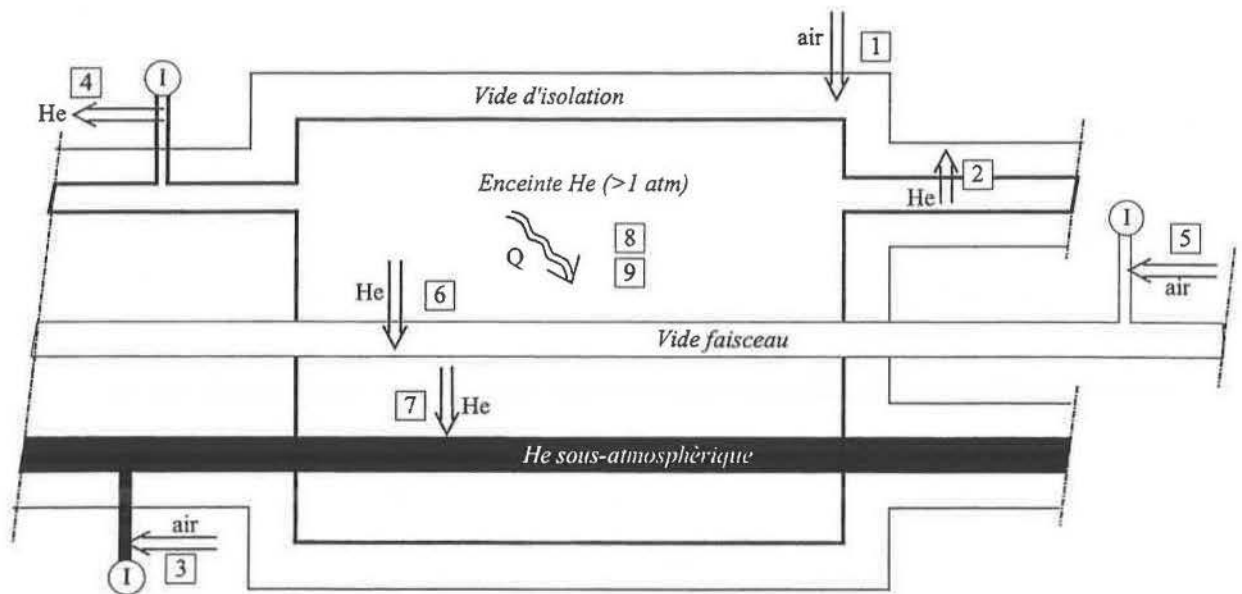


Figure V.1 – Schéma simplifié du circuit cryogénique avec position des vannes de sécurité



a)



b)

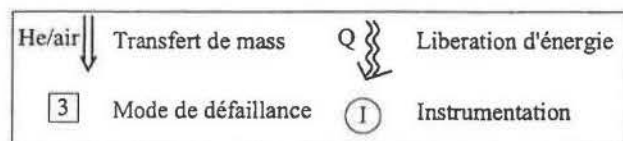


Figure V.2 – Schéma de principe montrant les défaillances du système cryogénique

VI PREVENTION ET CONTROLE RADIOLOGIQUE

1 ORGANISATION DE LA PREVENTION RADIOLOGIQUE

1.1 Objectifs de la radioprotection

La radioprotection au CERN est exercée par le Groupe Radioprotection (RP) et ses agents qualifiés. Ils prennent les mesures appropriées pour que, aussi bien pendant le fonctionnement normal que lors d'incidents et accidents, le temps d'exposition des personnes et le nombre de ces personnes impliquées soient aussi réduits que possible suivant le principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Ils veillent à ce que l'exposition des personnes reste dans les limites des doses évoquées dans le Manuel de Radioprotection (MRP) du CERN [CERN96].

Le principe ALARA est appliqué dans la phase de conception et pendant l'exploitation du collisionneur LHC. La radioprotection a également été basée sur l'expérience auprès des autres accélérateurs du CERN. Dans cette optique, il a été décidé qu'aucun accès ne sera autorisé en souterrain pendant le fonctionnement du LHC à l'exception des cavernes de service autour des expériences ATLAS, CMS et LHC-B (US) et de la partie supérieure du PX24 où sont logées les salles de comptage de l'expérience ALICE. Pour une machine profondément enterrée pour laquelle la plupart des zones accessibles est située loin de la machine, les niveaux de rayonnements ionisants dans ces zones sont déjà de minimis, donc négligeables. Il n'a été nécessaire d'exercer l'approche ALARA que dans peu de cas.

Le respect du principe ALARA suppose que certaines règles d'exploitation soient observées :

- la classification et la surveillance des locaux ;
- la surveillance du personnel ;
- l'information du personnel.

1.2 Les normes radiologiques

Les normes de radioprotection actuellement appliquées au CERN (tableau VI.1) se basent sur la Recommandation 60 de la Commission Internationale de Protection Radiologique [CIPR91]. La Suisse a introduit cette Recommandation dans son ordonnance sur la radioprotection de 1994 qui a été retenue par l'Union Européenne comme base de la récente Directive EURATOM sur la radioprotection et qui devrait être transposée dans des lois nationales de l'Union européenne en l'an 2000 [Dir96, ORaP94].

La dose de référence de 15 mSv/an, appliquée depuis déjà plus de 16 ans au CERN pour les personnes exposées aux rayonnements ionisants dans l'exercice de leur profession, est plus stricte que la nouvelle limitation de la dose efficace individuelle dans la Recommandation 60, qui est de 20 mSv/an. D'ailleurs, cette dernière valeur est plutôt considérée comme une moyenne sur une période de 5 ans sans toutefois que les 50 mSv soient dépassés annuellement.

Pour le public, l'ordonnance suisse fixe les limites des immissions des substances radioactives dans l'air de sorte qu'elles ne dépassent pas, en dehors du domaine de l'entreprise, une dose efficace de 0,3 mSv/an. L'immission de substances radioactives dans les eaux accessibles au public ne doit pas excéder, en moyenne par semaine, un cinquantième de la limite d'exemption pour un radionucléide donné. Le rayonnement direct ne doit pas dépasser un équivalent de dose ambiante de

1 mSv/an dans les locaux d'habitation, de séjour et de travail et doit rester en dessous de 5 mSv/an dans tout autre endroit en dehors de l'enceinte de l'entreprise.

Dans son MRP, le CERN est plus strict et exige que l'exposition du public à l'extérieur de la clôture du domaine de l'Organisation par toutes les sources reste en dessous d'une dose efficace de 0,3 mSv/an.

Toutes les limites de dose du tableau VI.1 ne tiennent pas compte de l'exposition due à des sources naturelles, qui est de l'ordre de 1 mSv/an dans le bassin lémanique.

Tableau VI.1 - Normes de radioprotection en vigueur au CERN et limites de doses dans la Recommandation 60 de la CIPR [CERN96, CIPR91]*

Limites annuelles	CERN	CIPR60
Personnes travaillant au CERN (sous contrôle individuel)	15 mSv	20 mSv
Rayonnements diffusés aux clôtures du CERN	1,5 mSv	
Dose aux personnes à l'extérieur du CERN	0,3 mSv	1 mSv
Exposition par les rejets radioactifs aériens ou liquides seule	0,2 mSv	

**Les limites sont exprimées en doses efficaces, à l'exception de la limite annuelle pour les rayonnements diffusés de 1,5 mSv à la clôture du domaine de l'Organisation, qui est donnée en équivalent de dose ambiant.*

1.3 Classification et surveillance des locaux

La surveillance des locaux comporte différentes mesures :

- la classification des locaux selon l'importance du risque;
- l'évaluation de ce risque par une dosimétrie appropriée;
- la vérification et la maintenance des systèmes de sécurité;
- l'inventaire et la gestion des matériaux radioactives.

Afin de faciliter l'application des règles de sécurité et d'assurer ainsi un respect des normes de radioprotection, les installations du LHC sont classées en zones de travail. Cette classification est résumée dans le tableau VI.2 qui indique les débits de dose équivalents ambiants ainsi que les limites de doses efficaces. Les zones autres que les zones surveillées ne peuvent donc être accessibles qu'à des personnes reconnues comme exposées dans l'exercice de leur profession.

Tableau VI.2 - Classification des zones de travail en fonction de leur débit de dose

Débit de dose équivalent ambiant en $\mu\text{Sv/h}$	Zones à l'intérieur de la clôture				
	• moyen	2,5	25		
• maximal	7,5	100	2000	100000	
Désignation de la zone	Surveillée	Contrôlée simple	Séjour limité	Haute radioactivité	Accès interdit
Limite de dose efficace annuelle en mSv	1	15	15	15	-

Remarques: Un local donné peut avoir une classification temporaire. Il est clair que si l'on supprime temporairement ou définitivement toute cause susceptible de produire une irradiation ou une contamination, une zone qui était interdite peut devenir réglementée ou surveillée suivant le cas.

En dehors de la zone «public» qui n'est pas réglementée, la classification suivante a été retenue :

- la zone surveillée, dont l'accès ne fait l'objet d'aucun contrôle de radioprotection, mais où le CERN garantit, par des moyens appropriés (moniteurs fixes et dosimètres passifs), que la dose efficace aux personnes n'est pas susceptible de dépasser 1 mSv/an ;
- les zones contrôlées, dont l'accès est soumis à des règles pour des raisons de protection contre les rayonnements ionisants. Le port d'un dosimètre personnel est nécessaire pour tout travail dans ces zones. Une zone contrôlée peut éventuellement être subdivisée en quatre parties par analogie avec certaines prescriptions de l'arrêté de juillet 1977 et en application de l'article 18 du décret 75-0536, du 28 avril 1975. Les zones contrôlées sont signalées par des panneaux, dont l'usage pratique est expliqué dans la Procédure de Radioprotection 1 [CERN96, PRP1] ;
- la zone contrôlée simple où un contrôle de l'activité des sources de rayonnements ionisants est imposé, de sorte que les personnes ne reçoivent pas une dose efficace supérieure à 15 mSv/an lors d'un travail régulier. Il faut noter qu'au CERN, l'accès à la plupart de ces zones n'est pas possible en permanence. L'accès à l'intérieur de l'anneau du LHC n'est possible que pendant les périodes d'arrêt ;
- les zones dont l'accès est soumis à des restrictions selon lesquelles la dose efficace est susceptible de dépasser 15 mSv/an pour une personne qui y travaille régulièrement :
 1. la zone de séjour limité où les débits de doses sont tels que les personnes pourraient recevoir une dose efficace supérieure à 15 mSv/an au cours d'un travail régulier. Les blindages et les barrières sont disposés de telle sorte que les débits de dose équivalents ambiants ne dépassent pas 2 mSv/h. Pour tout travail dans une zone de séjour limité, le port d'un deuxième dosimètre à lecture directe (dosimètre opérationnel) est obligatoire ;
 2. la zone à haute radioactivité dans laquelle pourrait exister un débit de dose équivalent ambiant supérieur à 2 mSv/h et où un contrôle strict de l'accès est imposé ;
 3. la zone interdite dans laquelle un débit de dose équivalent ambiant supérieur à 100 mSv/h pourrait exister et où, sauf circonstances exceptionnelles, l'accès est interdit (exemple : le tunnel de la machine LHC pendant le fonctionnement de l'accélérateur).

1.4 Classification des zones avec radioactivité induite

Dans la conception des composants d'un accélérateur, des précautions sont prises afin que les doses individuelles pour les personnes qui travaillent sur les éléments radioactifs restent ALARA. Le MRP du CERN contient la définition générale des zones contrôlées mais pour la conception et la construction des composants d'un accélérateur qui sont activés pendant le fonctionnement, trois valeurs de référence pour le débit de dose ambiant se sont avérées très utiles :

- i. **100 $\mu\text{Sv/h}$** : dans les zones où les débits de dose sont en dessous de cette valeur, des personnes peuvent travailler sur des pièces radioactives sans qu'il soit nécessaire d'imposer des restrictions particulières. Au delà de cette limite, chaque intervention doit être planifiée, en particulier en ce qui concerne le temps de travail envisagé.
- ii. **2 mSv/h** : au delà de ce débit de dose, les temps d'occupation dans la zone doivent être limités d'une façon stricte et tout travail doit être supervisé par le Groupe RP. Le personnel temporaire des firmes contractantes n'est pas admis à travailler dans ces zones. Dans les cas où les débits de dose dépassent 2 mSv/h , des moyens de manipulation à distance des pièces radioactives sont à considérer.
- iii. **20 mSv/h** : au delà de cette limite, personne ne peut travailler sans que les limites de dose ne soient pas approchées. Les moyens de manipulation des pièces radioactives à distance sont impératifs.

Tenant compte de ces définitions des zones de radioprotection, les zones des installations du LHC et des installations connexes sont classées comme indiqué dans le tableau VI.3.

Tableau VI.3 - Classification radiologique des zones du LHC

Emplacement	En fonctionnement	A l'arrêt
Tunnels de transfert TI 2 et TI 8	Interdite	Séjour limité
Tunnel LHC	Interdite	Contrôlée simple
Caves de l'arrêt de faisceau et zones de collimateurs en 3 et 7	Interdite	Séjour limité
Caves expérimentales ATLAS, CMS, ALICE et LHC-B	Interdite	Contrôlée simple
Cavernes de service ATLAS, CMS, ALICE et LHC-B	Contrôlée simple	Surveillée
Autres zones (zones de service en souterrain et puits d'accès)	Interdite	Surveillée

Le schéma de zonage radiologique pour le LHC à l'arrêt est présenté dans la figure VI.1.

2 PRINCIPES DE CONTROLE DES RISQUES RADIOLOGIQUES

La prévention des risques radiologiques liés au fonctionnement normal du LHC s'appuie sur quatre moyens principaux: la classification des zones pendant le fonctionnement de l'accélérateur et à l'arrêt, le système de contrôle d'accès et de verrouillage de sécurité, le système de surveillance par des détecteurs de rayonnements ionisants installés tout autour de l'anneau et des expériences et sur les différents sites, et les procédures imposées pour les interventions. Les risques entraînés par un

potentiel fonctionnement anormal de la machine et les actions à entreprendre dans le cas d'un incident avec perte totale des faisceaux sont traités séparément dans le chapitre VIII.

La classification radiologique des zones du LHC, en fonctionnement et à l'arrêt, est donnée aux paragraphes 1.3 et 1.4. Toutes zones souterraines, hormis les cavernes de service des expériences, sont inaccessibles pendant le fonctionnement du LHC; la plupart d'entre elles sont classées zones contrôlées pendant l'arrêt. Toute personne ayant accès aux ouvrages souterrains sera soumise au contrôle dosimétrique individuel avec films. L'accès à des zones d'accélérateurs et des expériences qui présentent un risque de radioactivité induite sera accordé seulement aux personnes en possession d'un deuxième dosimètre (un dosimètre opérationnel) lié au système du contrôle d'accès. Le système de dosimétrie opérationnelle qui sera adopté est actuellement à l'étude.

En ce qui concerne le point 4 qui abrite le système d'accélération à haute fréquence, il faut noter que celui-ci peut fonctionner en mode test pendant les périodes d'arrêt du LHC. Ceci implique que le système d'accès est spécifiquement conçu pour pouvoir isoler cette partie de l'accélérateur. Un système de moniteurs de rayonnements ionisants surveillera les débits de dose dans les zones accessibles de la machine pendant ces tests, avec action de coupure des klystrons dans le cas d'un dépassement des limites de dose préfixées.

Le système de contrôle d'accès et de verrouillage de sécurité est décrit en détail au paragraphe 3.6 du chapitre III, où sont donnés les caractéristiques des éléments importants de la sûreté (EIS). Entre autres fonctions, ce système est projeté pour garantir que l'accélérateur ne peut être mis en marche que lorsque toutes les personnes ont quitté le tunnel, et pour en interdire l'accès pendant le fonctionnement. Le contrôle d'accès aux zones souterraines avec verrouillage des faisceaux est couplé avec le système de dosimétrie individuelle. Les différentes sections du tunnel LHC sont séparées par des portes grillagées, pour permettre l'accès à des secteurs limités de l'accélérateur selon les conditions requises (mode «accès contrôlé» ou «accès contrôlé restreint»).

Le troisième moyen de prévention des risques radiologiques est le contrôle permanent des rayonnements autour de la machine et des zones expérimentales, garanti par le système de détecteurs fixes (voir section 3 de ce chapitre). Les résultats de mesure par ces détecteurs peuvent être consultés via les différents réseaux de communication. En cas de dépassement d'un seuil d'alarme (valeur limite de débit de dose préfixée), un signal d'alarme sera envoyé à la salle de contrôle PCR pour que les opérateurs corrigent au plus vite l'orbite des faisceaux.

Dans les zones d'expériences accessibles pendant l'opération du LHC, les personnes présentes seront averties par des panneaux lumineux clignotants et par le déclenchement d'un signal sonore en cas de dépassement d'un seuil d'alarme.

De plus, le programme prévu pour le contrôle de l'environnement (voir section 5 de ce chapitre) basé sur un réseau de détecteurs actifs mesurant le rayonnement diffusé en surface et aux limites du domaine du CERN et les rejets de radioactivité dans l'air et dans l'eau, ainsi qu'un contrôle de la radioactivité dans des échantillons recueillis périodiquement dans la région, complète la surveillance radiologique du LHC.

Enfin, tout travail dans les zones de la machine où des débits de dose importants sont attendus sera strictement contrôlé par le groupe RP. Une partie du système de détecteurs fixes est composée de moniteurs installés dans les secteurs de l'accélérateur et des zones d'expériences les plus sujettes aux pertes de faisceau, qui fournissent une mesure à distance de la radioactivité induite avant intervention. Les débits de dose sont visualisés à l'entrée de ces zones. Le cas échéant, des

procédures de travail spécifiques seront mises en place afin de réduire au minimum l'exposition du personnel intervenant. Si nécessaire, des moyens supplémentaires de protection tels que des protections biologiques locales ou des systèmes de manipulation à distance seront employés. Des blindages mobiles constitués de plaques en plomb montés sur roulettes pourront être utilisés autour des composants les plus radioactifs de l'accélérateur ou, selon le cas, des matelas en plomb tels qu'ils sont actuellement utilisés pour des travaux d'entretien sur des composants fortement irradiés.

Les principes de prévention appliqués pour la gestion des matériaux et déchets radioactifs sont traités à la section 6 de ce chapitre.

2.1 Surveillance du personnel

Membres du personnel CERN et du personnel associé

Les membres du personnel CERN et du personnel associé remplissent un formulaire d'enregistrement pour obtenir un dosimètre personnel. Ils doivent prouver leur aptitude à travailler en présence de rayonnements ionisants en présentant un certificat médical. Dans ce cas, ils obtiendront leur dosimètre personnel. Si la personne n'est pas en possession d'un tel document, un rendez-vous sera pris par le service de dosimétrie individuelle pour un examen au service médical du CERN. Le dosimètre personnel ne sera délivré que si la personne consent à subir cet examen. Les personnes ayant reçu un film-badge doivent assister à une séance d'information de sécurité, selon le calendrier indiqué sur le document remis lors de l'enregistrement au CERN. Si une personne sous contrôle dosimétrique individuel ne se présente pas à la visite médicale obligatoire, elle sera rayée de la liste de distribution des films; son dosimètre personnel ne sera délivré qu'une seule fois et elle sera assimilée à la catégorie des visiteurs à court terme.

Visiteurs à court terme (VCT)

Pour répondre aux besoins des membres du personnel associé qui ne viennent au CERN qu'une fois par an et qui doivent avoir accès aux zones contrôlées pour participer à une expérience, la catégorie des visiteurs à court terme (VCT) a été créée. Un VCT n'a accès qu'aux zones expérimentales où les débits de doses restent au-dessous de $10 \mu\text{Sv/h}$. Ces niveaux sont contrôlés de façon permanente à l'aide des systèmes de moniteurs actifs. Les VCT sont dispensés d'attestation ou d'examen médical car leur exposition pour la durée de leur séjour restera inférieure à 1 mSv . Le service de dosimétrie individuelle du groupe RP ne leur attribue chaque année qu'un seul dosimètre personnel valable un mois. Si la personne revient au CERN pour plus d'un mois dans l'année, elle doit fournir la preuve de son aptitude médicale pour un travail dans des zones contrôlées.

Personnel des entreprises

Le CERN demande que les entreprises qui travaillent sous contrat de prestation de service aient un expert en matière de radioprotection chargé de donner une information initiale en radioprotection aux personnes travaillant dans des zones contrôlées ou dans des zones radioactives classées A et B. Ces experts sont formés soit par la CNA/SUVA (Suisse) qui donne des cours à ce sujet, soit par un autre organisme agréé. Les entreprises possédant un contrat d'installation, de prestation de service ou de personnel temporaire peuvent demander des dosimètres personnels (film-badges) pour leurs employés par l'intermédiaire de leur représentant ou d'un chef d'équipe à condition que l'entreprise ait une autorisation de l'Office fédéral de la santé publique lui permettant de faire travailler ses employés dans des zones contrôlées.

Le personnel d'entreprises travaillant dans les zones contrôlées du CERN doit avoir reçu une formation initiale en radioprotection certifiée par une attestation dûment remplie et signée par l'expert en la matière au sein de l'entreprise. Ensuite, une fiche d'enregistrement doit être correctement remplie. Il est obligatoire de noter toute affectation antérieure et à l'extérieur du CERN à des travaux en présence de rayonnements ionisants. Tout le personnel d'entreprise doit prouver par un document qu'il est médicalement apte au travail en présence de rayonnements ionisants*.

Les services d'enregistrement et médical doivent apposer leur cachet sur la fiche d'enregistrement avant que la demande d'un film puisse être considérée. L'enregistrement sera basé sur les indications répertoriées dans le formulaire et le premier film-badge sera ensuite distribué à condition que l'attestation de formation en matière de radio-protection dûment remplie et signée soit également présentée. Si nécessaire, les personnes peuvent se présenter directement au service de dosimétrie individuelle pour obtenir un film, à condition d'être en possession de la fiche d'enregistrement et de l'attestation dûment remplies.

Ces règles s'appliquent également aux personnes enregistrées au bureau de travail temporaire du CERN.

2.2 Information du personnel

Un accélérateur est caractérisé par la variété et la mouvance du personnel expérimentateur. Ceci demande une application stricte des règles d'exploitation et de sécurité et une information convenable des intéressés. Toute personne est informée des risques qu'elle encourt. Par conséquent, le personnel de l'accélérateur et de service, celui des entreprises et les utilisateurs sont tenus d'assister à des exposés et reçoivent une formation de sécurité pour obtenir l'autorisation d'accès aux installations. Cette formation de base permet de familiariser le personnel avec les procédures d'accès et d'évacuation. Elle apprend les gestes de premiers secours et l'utilisation d'extincteurs portatifs.

Le CERN attache une attention particulière à l'instruction des visiteurs scientifiques et du personnel d'entreprises en matière de radioprotection. Le document complémentaire 3 (Procédure d'enregistrement à la section dosimètre individuelle du groupe RP) donne des obligations en matière d'instruction avant qu'une personne ne soit considérée comme appartenant à la catégorie «exposée dans l'exercice de sa profession» [PRP3]. Le groupe RP attache également une grande importance à la formation du personnel sur les lieux du travail et établit les consignes relatives aux risques radiologiques.

3 DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

Les caractéristiques des détecteurs principalement utilisés pour mesurer les rayonnements et la radioactivité dans l'air et l'eau autour du LHC sont résumées dans le tableau VI.4.

* Pour le personnel des entreprises de droit suisse, l'aptitude est confirmée par un certificat de la CNA ; pour les sociétés de droit français, un médecin du travail doit émettre un certificat équivalent. Pour les sociétés établies dans d'autres pays, les certificats d'aptitude en vigueur dans ces pays sont demandés.

Tableau VI.4 - Détecteurs utilisés autour du LHC

DETECTEUR	CHAMBRE D'IONISATION			COMPTEUR REM	CHAMBRE DIFFERENTIELLE	SCINTILLATEUR
Gaz de remplissage	Argon	Hydrogène	Air	BF ₃	Air	
Type de rayonnement	γ + particules chargées	Neutrons, γ, particules chargées	Rayons X, γ, neutrons	Neutrons	Activité β de l'air	Activité γ dans l'eau
Volume (litres)	5	5	3	5,6 (φ 21,5 cm, h=26 cm)	10	3 x 3 (pouces)
Pression	2·10 ⁶ Pa (20 bar)	2·10 ⁶ Pa (20 bar)	Atmosphérique		Atmosphérique	
Forme	Cylindrique	Cylindrique	Cylindrique	Cylindrique	Cylindrique	Cylindrique
Matériau	Acier inoxydable	Acier inoxydable	Polyéthylène	Polyéthylène	Acier inoxydable	
Epaisseur paroi	3 mm	3 mm	2 mm			
Sensibilité γ à 1 MeV	1,4·10 ⁻⁶ A·Gy ⁻¹ ·h	1,5·10 ⁻⁷ A·Sv ⁻¹ ·h	2,6·10 ⁻⁸ A·Gy ⁻¹ ·h			0,85 min ⁻¹ ·Bq ⁻¹ ·l ⁻¹
Sensibilité n à 1 MeV		5,0·10 ⁻⁸ A·Sv ⁻¹ ·h		1 nSv cp ⁻¹		
Sensibilité β à 1 MeV					1,5 pA·MBq ⁻¹ ·m ⁻³	
Quantificateur de charges	1 pC·cp ⁻¹	1 pC·cp ⁻¹	1 pC·cp ⁻¹	Diviseur 1:100		
Calibration γ (typique)	0,2 nGy·cp ⁻¹	2 nSv·cp ⁻¹	10 nGy·cp ⁻¹			
Calibration n (typique)		6 nSv·cp ⁻¹		100 nSv·cp ⁻¹		
Calibration β (typique)					1,5 s ⁻¹ ·MBq ⁻¹ ·m ⁻³	

3.1 Rayonnements diffusés

Instrumentation fixe

Les rayonnements diffusés créés par l'exploitation du LHC (particules chargées, neutrons, rayonnements gamma) sont mesurés par les chambres à ionisation remplies d'argon ou d'hydrogène à haute pression et des compteurs rem. Le courant créé dans les chambres à ionisation par le rayonnement est intégré et digitalisé par un quantificateur de charge donnant un facteur de conversion de 1 pSv/impulsion. Les chambres remplies d'argon sont étalonnées avec une source de ^{137}Cs et celles remplies d'hydrogène avec une source de ^{137}Cs (particules chargées, rayonnements gamma) et de $^{241}\text{Am-Be}$ (neutrons) pour définir l'équivalent de la dose ambiante $\text{H}^*(10)$.

A certains endroits, la contribution des particules chargées et des rayonnements gamma est très faible et il ne reste qu'à mesurer l'équivalent de dose dû aux neutrons. Des compteurs rem (détecteurs BF_3 dans modérateurs de polyéthylène selon Anderson et Braun) sont utilisés dans ces cas. Ils sont étalonnés dans la grandeur physique $\text{H}^*(10)$ à l'aide d'une source de $^{241}\text{Am-Be}$. L'utilisation des détecteurs remplis de ^3He d'une sensibilité accrue aux neutrons est actuellement en étude.

L'appellation (nomenclature des détecteurs installés autour du LHC) est résumée dans le tableau VI.5.

Tableau VI.5 - Appellation des moniteurs fixes

PAXL	(radiation - alarm - experiment - LHC) : détecteurs rattachés à l'expérience.
PATL	(radiation - alarm - tunnel - LHC) : détecteurs dans les tunnels.
PMIL	(radiation - monitor - induced - LHC) : détecteurs pour la radioactivité induite.
PMB	(radiation - monitor - building) : détecteurs dans les bâtiments de surface.
PMS	(radiation - monitor - site) : détecteurs d'environnement.
PAML	(radiation - access - material - LHC) : détecteurs contrôlant le passage de matériel aux sorties des sites.
PCML	(radiation - control - material - LHC) : détecteurs pour le contrôle du matériel sortant de la machine appelés également «picomurs».

Détecteurs passifs

De nombreux détecteurs passifs (paire de TLD $^6\text{Li-}^7\text{Li}$ dans un modérateur cylindrique d'un diamètre de 15 cm) sont distribués dans et autour des zones surveillées du LHC. Ils sont évalués une fois par an et servent à démontrer que la dose intégrée par une personne, en prenant en considération un temps de présence de 2000 h/an, ne dépasse pas la valeur de 1 mSv/an.

A certains endroits, des dosimètres de Alaline ou de verre radio-photoluminescent (RPL) sont étalés sur les composantes de l'accélérateur. Les résultats de l'évaluation de ces détecteurs servent à déterminer les doses reçues par les composantes afin de décider de leur dégradation sous effet d'irradiation.

Instrumentation portable

Les instruments de radioprotection portables utilisés au CERN sont de la famille «Automess AD». Pour la mesure des rayonnements diffusés, le radiamètre 6150 AD6, équipé d'un tube GM compensé, est utilisé le plus souvent. Cet instrument peut, selon le cas, être complété d'un tube GM (6150 AD-15) pour des mesures dans des champs de rayonnements d'un débit de dose élevé, ou être équipé d'une extension téléométrique contenant un tube GM à fenêtre mince (6160 AD-t). Cet instrument est utile pour identifier les points d'activation dus à une perte de faisceau à partir d'une certaine distance.

Les compteurs rem portables (Studsvik REM-C-2202) d'une sensibilité comparable à celle des rem compteurs installés, sont utilisés pour mesurer les neutrons.

Tous les instruments portatifs sont étalonnés en $H^*(10)$ à l'aide des sources de ^{137}Cs et de $^{241}\text{Am-Be}$. Pour les radiamètres, des vérifications de leur réponse sont faites en utilisant des sources de ^{60}Co et de ^{241}Am .

3.2 Radioactivité induite

Instrumentation fixe

Dans la majeure partie des zones contrôlées à séjour limité se trouvent les moniteurs de radioactivité induite (chambre d'ionisation d'un volume de 3 l remplie d'air à pression ambiante avec quantificateur de charge). Ils servent à évaluer le débit de dose ambiant $H^*(10)$ dans une zone après l'arrêt des faisceaux afin de déterminer à distance ou de l'extérieur de la zone si elle peut être déclarée accessible pour le personnel.

Instrumentation portable

Pour le contrôle de la radioactivité induite, on utilise également l'instrument de mesure AD (voir paragraphe 3.1 de cette section) muni d'un tube GM à fenêtre mince (AD 17). Ce détecteur permet de déceler les composantes actives émettant des rayonnements gamma et des particules alpha et bêta. Un moniteur de contamination à compteur proportionnel de grande surface (AD-k) est également disponible pour détecter une éventuelle contamination. Une sonde (AD-b) dotée d'un scintillateur plastique de grand volume permet de déterminer des débits de dose ambiants $H^*(10)$ allant jusqu'au niveau du bruit de fond naturel. Finalement, une sonde équipée d'un scintillateur BGO (AD-BGO) sert à détecter les pièces activées avec une grande sensibilité.

Moniteurs de passage

Toutes les sorties de l'accélérateur sont équipées d'un moniteur de contrôle des matériaux radioactifs (PCM). La mesure de débit de dose à 10 cm d'une pièce activée permet de déterminer les démarches à prendre. Le moniteur est équipé d'un scintillateur en plastique qui peut être décroché pour atteindre l'intégralité de la pièce à contrôler. Le résultat de la mesure (débit de dose) est affiché sur un barographe. Un signal acoustique en fonction du débit de dose est également fourni. Le moniteur est d'une grande facilité d'utilisation et permet au personnel intervenant sur l'accélérateur de contrôler lui-même le matériel sortant. Ce contrôle ne peut pas déterminer définitivement si le

matériel est non radioactif avant qu'un contrôle plus détaillé soit effectué par un agent du groupe RP.

3.3 Radioactivité dans l'eau

A chaque point de rejet, l'eau de drainage est mesurée. Le moniteur d'eau consiste en un réservoir cylindrique de 200 l traversé par l'eau de rejet avec un débit de 20 l/mn. A l'intérieur du réservoir, est immergée une sonde gamma (NaI(Tl)) ; hauteur : 25 mm ; diamètre : 38 mm. L'électronique associée comporte deux canaux : un canal est réglé sur la fenêtre d'énergie étroite de 400 à 600 keV, sélectionnée pour capter le pic d'annihilation à 511 keV représentatif pour des émetteurs de positon (^{22}Na , ^{24}Na , ^{11}C) et le pic à 477 keV de ^7Be . La présence de ces nucléides dans l'eau rejetée est la plus probable. Le second canal est réglé sur la fenêtre d'énergie large (200 keV - 2000 keV) pour être sensible également à d'autres radionucléides. La sensibilité type est d'un coup par seconde engendré par 2 kBq/litre de ^7Be et par 0,2 kBq/l pour les émetteurs de positon.

Un deuxième contrôle de l'eau est effectué par un échantillonneur d'eau automatique. Il prélève 2 ml d'eau à une périodicité permettant d'obtenir un échantillon représentatif d'un volume allant jusqu'à 30 l sur une période d'un mois. Les échantillons d'eau sont ensuite analysés dans le laboratoire d'environnement (LE, voir section 5 de ce chapitre).

3.4 Radioactivité dans l'air

A chaque point de rejet d'air, une partie de l'air évacué par le système de ventilation est pompée à travers un filtre d'aérosols et une chambre d'ionisation différentielle avec des débits de l'ordre de 15 m³/h pour le filtre et 30 l/h pour la chambre différentielle.

Les filtres d'aérosols (fibres de verre, diamètre 20 cm) retiennent toutes les particules d'aérosols d'un diamètre supérieur à 0,3 µm. Ils sont changés deux fois par mois pour une analyse de l'activité totale bêta et de l'activité gamma dans le LE.

L'air, exempt d'aérosols, traverse la chambre d'ionisation différentielle à circulation utilisée pour la mesure directe de la radioactivité gazeuse constituée en majeure partie des radionucléides à courte demi-vie (^{14}O , ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C , et ^{41}Ar). La chambre est associée à une chambre de référence du même type fonctionnant sous une tension opposée. Cela permet une compensation en cas de présence des champs de rayonnement gamma à l'endroit de mesure. Le courant d'ionisation est converti en impulsions au moyen d'un quantificateur de charge. Une source témoin de faible activité produisant un rayonnement de fond constant est utilisée pour contrôler le bon fonctionnement de l'appareil.

3.5 Traitement et acquisition des données

Les moniteurs des rayonnements ionisants, ainsi que les instruments de mesure de l'activité dans l'air et l'eau seront connectés à un système de traitement et d'acquisition de données (ARCON) qui assurera la transmission de l'information relative aux débits de dose et aux concentrations de l'activité vers une base de données centrale ainsi que la transmission des alarmes vers un serveur d'alarmes. Le système ARCON permettra aussi d'introduire ou de modifier les

paramètres des moniteurs (facteurs de calibration ou de qualité, niveaux d'alarmes, etc.) [PRP10]. L'ARCON est également connecté aux réseaux de contrôle du LHC (voir chapitre III, paragraphe 3.4.7), permettant d'accéder aux informations radiologiques .

3.6 Emplacement des moniteurs autour de l'accélérateur et des zones expérimentales

L'emplacement exact de chaque détecteur qui sera installé dans les zones souterraines n'a pas encore été décidé, mais le nombre et le type de détecteurs nécessaires pour la surveillance radiologique dans les différents octants de la machine et autour des zones d'expérience sont décrits ci-dessous. Pour chaque zone, le type de détecteur a été choisi selon les rayonnements attendus (rayonnement gamma ou champ mixte gamma/neutrons). D'une façon générale, on peut distinguer deux classes de détecteurs. Les détecteurs installés dans le tunnel machine (PATL) et dans les zones accessibles (PAXL) pour la mesure des rayonnements associés au fonctionnement de l'accélérateur. Les détecteurs PATL et PAXL sont des chambres d'ionisation remplies d'air, d'argon ou d'hydrogène à haute pression ou des compteurs rem. La deuxième classe est représentée par les détecteurs pour la radioactivité induite (les PMIL, chambres d'ionisation remplies d'air à pression atmosphérique), installés dans les parties du tunnel LHC et dans les cavernes d'expériences où l'on peut s'attendre à des débits de dose importants suite à l'activation de l'équipement. Ces détecteurs permettront de vérifier les débits de dose ambiants avant que tout travail de maintenance ne commence et d'appliquer, le cas échéant, des procédures spécifiques pour garantir que les doses reçues par le personnel pendant les interventions restent au-dessous des valeurs limites.

Octant 1

Dans l'octant 1 du LHC (expérience ATLAS), la surveillance des rayonnements diffusés est assurée par :

- des chambres d'ionisation remplies d'argon installées dans chaque tunnel d'accès, au niveau de la chambre de jonction entre le tunnel machine et la zone de service (UJ14 et UJ16) ;
- quatre détecteurs (compteurs rem ou chambres à hydrogène dans la caverne de services USA) ;
- un détecteur (compteur rem ou chambre à hydrogène) dans le puits PX15.

Vingt quatre détecteurs d'activité induite sont installés dans l'octant 1, huit dans chacune des zones des quadripôles «faible bêta» situées de part et d'autre de l'expérience, et huit dans la caverne d'expérience. Un détecteur pour le contrôle du matériel (PCML) est à disposition dans la caverne USA, à la sortie du passage UPX14 et UPX16. Un autre détecteur du même type est installé en bas du puits PX15.

Octant 2

La surveillance des rayonnements diffusés au point 2 (expérience ALICE) est accomplie par :

- deux chambres d'ionisation argon placées aux entrées des zones de jonction UL24 et UL26 ;
- trois chambres à hydrogène installées aux différents niveaux du puits PX24 qui abrite les salles de comptage de l'expérience.

En ce qui concerne la surveillance de la radioactivité induite, huit détecteurs type PMIL sont installés dans le tunnel dans chacune des zones des quadripôles «faible bêta» situées de part et

d'autre de l'expérience, et huit dans la caverne d'expérience. Deux détecteurs pour le contrôle du matériel (PCML) sont installés à la sortie des puits dans les bâtiments SX et SD en surface.

Octant 3

L'octant 3 abrite les collimateurs secondaires («momentum scrapers»). Cet octant n'est pas une zone radiologique importante, puisque le nombre des particules interceptées par ces collimateurs est très faible par rapport aux collimateurs principaux du point 7. Une chambre d'ionisation est installée dans le tunnel d'accès en UJ33 pour les rayonnements diffusés et huit détecteurs de radioactivité induite sont installés dans la zone des collimateurs dans le tunnel machine. Un détecteur pour le contrôle du matériel (PCML) est à disposition en surface à la sortie du puits PZ33.

Octant 4

Cet octant qui accueille le système d'accélération par haute fréquence (RF) n'est pas une zone de perte de faisceau. Cependant, des problèmes radiologiques sont posés par les rayonnements émis pendant le fonctionnement de cavités RF supraconductrices. La surveillance des rayonnements diffusés est assurée par :

- deux compteurs rem installés aux entrées des tunnels d'accès, au niveau des chambres de jonction entre le tunnel machine et les zones de service (UJ44 et UJ46) ;
- quatre chambres d'ionisation air dans chacune de deux galeries qui abritent les klystrons (UA43 et UA47) ;
- un compteur rem placé dans la caverne de service US ;
- trois chambres d'ionisation hydrogène installées dans la caverne UX.

Huit détecteurs de radioactivité induite (PMIL) sont installés autour des cavités RF dans le tunnel machine, quatre en RA43 et quatre en RA47. De plus, deux chambres d'ionisation air (PATL) sont installées en RA43 et RA47 pour la surveillance des rayonnements émis par les cavités pendant les tests qui pourront se faire durant les périodes d'arrêt du LHC. Ces quatre détecteurs peuvent être insérés dans la chaîne de contrôle d'accès des zones des klystrons. Deux détecteurs sont installés pour le contrôle de la radioactivité des matériaux (PCML) à la sortie des puits dans les bâtiments de surface SD et SZ.

Octant 5

La surveillance des rayonnements diffusés dans l'octant 5 (expérience CMS) est assurée par :

- une chambre d'ionisation hydrogène placée dans chacune des quatre chambres de jonction UJ53, RZ54, UJ56 et UJ57 reliant le tunnel LHC aux zones de service ;
- trois compteurs rem installés dans la caverne de service USC ;
- un compteur rem en bas du puits PM54.

La surveillance de la radioactivité induite est assurée par seize chambres d'ionisation air (PMIL), huit de chaque côté de l'expérience, dont quatre dans chacune des deux zones des quadripôles «faible bêta». Huit autres PMIL sont installés dans la caverne d'expérience UX. Trois détecteurs pour le contrôle du matériel (PCML) sont à disposition, le premier dans la caverne de services USC, le deuxième à la base du puits PM54 et le troisième à la sortie du puits PM56, dans le bâtiment SD en surface.

Octant 6

Le tunnel machine au point 6 abrite les systèmes de décharge des faisceaux utilisés pour envoyer les deux faisceaux vers les cavernes des blocs absorbeurs (UD) à la fin de chaque période de physique ou dans toute situation anormale. La surveillance des rayonnements diffusés est assurée par :

- un compteur rem installé dans la caverne de service US ;
- deux chambres d'ionisation hydrogène ;
- un compteur rem dans la caverne UX.

Quarante détecteurs de radioactivité induite PMIL sont installés dans l'octant 6 : quatre en R62 et en R68, huit dans les sections du tunnel au niveau de chambres de jonction UJ63 et UJ67, huit dans les zones de septa UJ64 et UJ66. Dans chacune des deux cavernes des blocs absorbeurs UD62 et UD68, il y a quatre ou huit PMIL. Pour le contrôle du matériel, deux PCML sont installés à la sortie des deux puits, dans les bâtiments de surface SD et SZ.

Octant 7

L'octant 7 abrite les collimateurs principaux («bêatron scrapers»). La zone souterraine étant très limitée, un seul détecteur est requis pour la surveillance des rayonnements diffusés (une chambre d'ionisation hydrogène placée à niveau de l'accès en UJ76). Pour la radioactivité induite, 24 détecteurs de type PMIL sont installés dans l'octant 7 : huit dans la section R74, quatre en R75, quatre en R76 et huit en R77. Un détecteur pour le contrôle du matériel est à disposition à la sortie du puits PM76 en surface dans le bâtiment SD.

Octant 8

La surveillance des rayonnements diffusés dans l'octant 8, abritant l'expérience LHC-B, est assurée par :

- une chambre d'ionisation hydrogène installée dans chacune des deux zones de jonction UJ84 et UJ86 qui donnent accès au tunnel machine ;
- un compteur rem placé dans la caverne de service US ;
- cinq détecteurs dans la zone de services UX.

Pour le contrôle de la radioactivité induite, 20 détecteurs PMIL ont été prévus : 16 sont installés dans l'octant 8 (huit de chaque côté de la zone d'expérience) et quatre dans la caverne d'expérience UX. Deux détecteurs PCML pour le contrôle du matériel sont à disposition, un dans la zone de service UX, l'autre dans le bâtiment de surface SD, à la sortie du puits PM85.

4. DOSIMETRIE INDIVIDUELLE

4.1 Dosimétrie passive (photons et bêta)

Au CERN, le contrôle individuel des doses de photons et bêta s'effectue à l'aide de films. Dans le porte-film, l'émulsion emballée pour assurer l'étanchéité contre la lumière est placée entre des filtres métalliques et plastiques qui absorbent, plus ou moins suivant leur composition et leur épaisseur, les rayonnements ionisants. Le noircissement et la façon dont il est distribué derrière les différents filtres sur le film permettent d'évaluer l'énergie des rayonnements ionisants et de les

convertir en dose équivalente personnelle enregistrée comme étant la dose efficace reçue par la personne au cours de la période pendant laquelle le film a été porté.

Le service de dosimétrie individuelle du CERN participe régulièrement aux intercomparaisons de son dosimètre organisées par l'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI), dont les résultats communiqués oralement ont toujours été considérés comme bons. Le service participe également une fois par an aux intercomparaisons obligatoires organisées pour les services de dosimétrie reconnus en Suisse. Les résultats pour une exposition au rayonnement de ^{137}Cs montrent que les déviations restent bien dans la fourchette de $\pm 10\%$ considérée comme nécessaire. Il faut souligner que les rayonnements photoniques au CERN se situent à des énergies autour de 500 keV, donc très proches de l'énergie du rayonnement émis par le ^{137}Cs . Le seuil inférieur de détection pour une telle énergie est de 0,2 mSv. Le film dosimètre du CERN peut être utilisé pour des photons entre 30 keV et 1,5 MeV et a été étalonné pour les doses bêta en utilisant de l'uranium appauvri comme source de calibration. Les films constituent ainsi des documents qui peuvent être archivés.

4.2 Dosimétrie passive de neutrons

L'expérience acquise auprès des accélérateurs de haute énergie a montré que les doses équivalentes ambiantes dues aux photons dépassent celles dues aux neutrons. En conséquence, le besoin d'un dosimètre personnel pour neutrons n'est pas évident. Toutefois, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) recommande, dans sa Publication 12, le contrôle individuel des neutrons quand la dose individuelle due aux neutrons est égale ou supérieure à 1/3 de la dose photon. Il a été décidé de doter les personnes qui travaillent près des expériences du LHC d'une émulsion nucléaire (NTA), placée dans un même badge puisque ces personnes travaillent aussi autour d'autres installations du CERN.

Le film neutron est scellé sous azote dans une poche en plastique le protégeant de l'humidité. Après développement, les traces de recul présentes dans l'émulsion sont analysées sous microscope. La dose équivalente personnelle due aux neutrons rapides et aux particules de haute énergie est évaluée à partir du nombre de traces. Elle présente généralement une surestimation d'un facteur trois par rapport à l'étalonnage avec une source radioactive. Cette surestimation peut être corrigée en fonction de la longueur des traces. Vu les faibles doses enregistrées au CERN, elle est seulement à prendre en considération pour des doses supérieures à 0,8 mSv.

4.3 Dosimétrie active

Pour une intervention de séjour limité dans une zone contrôlée, des dosimètres personnels électroniques sont disponibles. Ils délivrent des signaux acoustiques lorsque les débits de dose ou les doses intégrées dépassent des limites fixées dans le dosimètre. Le porteur est donc directement informé sur la situation des rayonnements ionisants autour de lui. Ces dosimètres munis de détecteurs semi-conducteurs sensibles aux rayonnements gamma et X et éventuellement aux rayonnements bêta fournissent également des signaux acoustiques proportionnels aux débits de dose et aux doses intégrées. Ces instruments sont délivrés à titre personnel par des techniciens de radioprotection en cas de besoin.

4.4 Assurance de la qualité

L'Ordonnance sur la dosimétrie individuelle, actuellement en préparation en Suisse, précise dans l'article 8: «Le service de dosimétrie individuelle doit justifier d'un programme d'assurance de la qualité et l'appliquer». En conséquence, le service de dosimétrie individuelle du CERN, agréé par l'Office fédéral de la santé publique suisse (OFSP), a introduit un système d'assurance de la qualité sous la forme d'un manuel de qualité composé :

- de chapitres généraux (politique en assurance de la qualité) ;
- d'un manuel de gestion de l'assurance de la qualité (description du système et son management) ;
- d'un manuel de gestion des processus (description des tâches administratives et techniques incombant au service) ;
- d'un manuel de gestion des résultats (édition et archivage des divers rapports dosimétriques, des dosimètres, évaluation statistique et archivage des paramètres de fonctionnement ainsi que contenu et fréquence des audits du système).

Le système d'assurance de la qualité est centré autour du manuel de gestion des processus qui contient des descriptifs détaillés des différentes étapes du travail (procédures) dans le service. La viabilité et l'application des procédures seront auditées régulièrement par le chef de section ou son assistant ; un audit par une autorité externe peut être mandaté à tout moment. Chacun des 19 chapitres du manuel d'assurance de la qualité suit la norme internationale ISO 9002; une accréditation formelle au delà de l'agrément de l'OFSP n'est pas envisagée pour le moment.

5. CONTROLE DE L'ENVIRONNEMENT

5.1 Programme de mesures

Le programme de contrôle de l'environnement, résumé dans le tableau VI.6, se répartit en trois grands domaines :

- 1) Contrôle du rayonnement diffusé aux limites du domaine du CERN et des rejets de radioactivité dans l'air ou dans l'eau (émissions). Chaque point de rejet est équipé d'instruments de contrôle décrits dans le paragraphe 3.1 de ce chapitre.
- 2) Contrôle de la radioactivité dans des échantillons de l'environnement. Les échantillons de l'environnement sont recueillis près des installations du CERN ou à des emplacements de référence éloignés des points de rejet du CERN et analysés dans le Laboratoire d'environnement (LE, voir paragraphe 5.3).
- 3) Calcul de la dose efficace pour le groupe critique de la population due aux rejets annuels du CERN. On utilise des modèles standards pour la dispersion des radionucléides et de calcul des doses. Ces modèles se fondent sur les informations météorologiques pour chaque point de rejet, sur les mesures relatives aux émissions de radioactivité et sur les habitudes de vie de la population locale [HSK97].

5.2 Contrôle de l'impact radiologique (immission)

L'emplacement de points de mesure et d'échantillonnage pour le contrôle de l'impact radiologique sur l'environnement est montré dans la figure VI.2. La nomenclature spécifique pour

chaque type de moniteur ou d'échantillonnage est annexée à la figure VI.2. Une description du contrôle de l'impact du CERN sur l'environnement est donnée comme suit :

Rayonnement diffusé : Le contrôle des rayonnements diffusés est effectué au moyen de chambres d'ionisation remplies d'argon (détecteur actif) et de dosimètres passifs thermoluminescents (${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$). Quelques stations de mesures sont également dotées d'un compteur proportionnel BF_3 dans un modérateur sensible aux neutrons (voir paragraphe 3.1 de ce chapitre).

Aérosols : Une station de prélèvement d'aérosols est installée près de chaque point de rejet prenant en considération la vitesse et la direction des vents (voir figure II.5). L'emplacement de ces stations est montré dans la figure VI.2 (PMA). Ce système d'échantillonneurs permanents d'aérosols est complété par un échantillonneur d'aérosols transportable de grand débit pouvant être déplacé en différents points du LHC en vue d'un échantillonnage très précis. Le débit maximum de cet échantillonneur est de $800 \text{ m}^3/\text{h}$, ce qui permet des limites de détection de quelques $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Précipitations : Deux stations de prélèvement recueillant l'eau des précipitations sur une surface de 1 m^2 pendant un mois sont installées sur les domaines du CERN (sites de Meyrin et de Prévessin). L'eau est analysée pour l'activité bêta totale dissoute (après évaporation de 4 l), de l'activité gamma et du tritium.

Eaux de rivière : L'eau est prélevée une fois par an dans les rivières qui reçoivent les eaux rejetées par les installations du CERN: le Nant d'Avril, le Lion, et l'Allondon pour l'ensemble du CERN et en ce qui concerne particulièrement les points de rejet du LHC (la Varfeuille, LHC-4 ; l'Oudar, LHC-5 ; le Nant de la Rabatière , LHC-6 ; le Gobé, LHC-7 ; et le Nant du Gobé, LHC-8). Un prélèvement est fait également dans la Versoix qui reçoit les eaux de l'Oudar et du Nant de la Rabatière (LHC-5, 6). L'eau est analysée pour déterminer l'activité bêta totale dissoute, de l'activité gamma et du tritium.

Eaux souterraines et de fontaine : L'eau des fontaines des villages entourant le LHC est recueillie et analysée chaque année pour son contenu en activité bêta totale dissoute et en activité gamma et tritium.

Végétation des rivières : Des échantillons de plantes aquatiques ou de mousses (s'il en existe) sont recueillis un fois par an dans les rivières énumérées ci-dessus. Cette végétation est analysée après séchage pour l'activité gamma. Les plantes aquatiques, et plus particulièrement les mousses, ont été identifiées comme des indicateurs sensibles à la radioactivité artificielle.

Sédiments de rivière : Une fois par an, des échantillons de sédiments, lorsqu'il en existe, sont recueillis dans les cours d'eau mentionnés ci-dessus et analysés après séchage pour l'activité bêta totale et l'activité gamma.

Herbes ou sols : Des échantillons d'herbe ou de sol sont prélevés à des emplacements situés sous le vent par rapport aux principaux points de rejet d'air et analysés pour l'activité gamma. Un échantillon de référence est recueilli dans le Vengeron, près du Lac Léman (Suisse).

Produits agricoles : Pendant les récoltes, des produits de l'agriculture des fermes proches des installations du CERN sont recueillis et analysés pour déterminer l'activité gamma. Des échantillons de vin sont également analysés après distillation pour le tritium.

Les activités de contrôle liées spécialement au fonctionnement du LHC sont complétées par le contrôle courant de l'environnement effectué pour d'autres installations du CERN.

Tableau VI.6 - Programme du contrôle de l'environnement autour du LHC

Sujet contrôlé	Rayonnements, radioactivité	Fréquence et type de l'échantillonnage ou de la mesure
Rayonnements diffusés	Débit de dose gamma Débit de dose neutron	<i>En continu</i> Chambre d'ionisation remplie par Ar et l'air Compteur proportionnel BF ₃ dans un modérateur
Air/aérosol	Bêta total Gamma	<i>Filtre d'aérosol changé 2 fois par mois</i> Compteur proportionnel à grande surface Spectrométrie par détecteur HPGe
Eau du robinet et du puits	Bêta total dissous Gamma Tritium	<i>Une fois par an</i> Compteur proportionnel à grande surface. Si bêta est > 0.37 Bq/l, Spectrométrie par détecteur HPGe Compteur à scintillation liquide
Eau pluviale	Bêta total dissous Gamma Tritium	<i>Echantillonnage: 1 par mois</i> <i>Superficie d'entonnoir: 1 m²</i> Compteur proportionnel à grande surface. Si bêta est > 0.37 Bq/l, Spectrométrie par détecteur HPGe Compteur à scintillation liquide
Rivières/eau, sédiment, mousse	Bêta total dans l'eau et le sédiment. Gamma du sédiment et de la mousse Tritium dans l'eau	<i>Une fois par an</i> Compteur proportionnel à grande surface Spectrométrie par détecteur HPGe Compteur à scintillation liquide
Herbe, sol	Bêta totale dans le sol Gamma de l'herbe et du sol	<i>Une fois par an</i> Compteur proportionnel à grande surface Spectrométrie par détecteur HPGe
Produits agricoles	Gamma	<i>Une fois par an pendant la récolte</i> Spectrométrie par détecteur HPGe

5.3 Instrumentation du laboratoire de l'environnement

Les instruments du LE permettent d'analyser l'activité gamma, bêta total et tritium dans les échantillons d'environnement et les filtres d'aérosols.

La spectroscopie gamma est effectuée par quatre détecteurs au germanium pur (HPGe). Trois d'entre eux ont des rendements relatifs de 20 à 35%. Deux sont placés dans un blindage en fer et dans un blindage en plomb. Le quatrième détecteur, d'un rendement relatif de 50% et d'un bruit de fond intégral de 1,3 coup/mn seulement, est utilisé pour les analyses d'échantillons de très faible activité. Il comporte un cryostat à faible bruit de fond et il est placé dans un blindage en plomb de faible activité recouvert d'étain et de cuivre à haute conductivité exempt d'oxygène. Le système d'acquisition et d'évaluation des données avec une résolution des canaux de 8k est basé sur une technologie récente utilisant un système de communications Ethernet et un ordinateur personnel de contrôle. Pour l'analyse des activités gamma, on utilise le logiciel Genie 2000 sous Windows 95. En plus des fonctions classiques d'analyse des pics, il existe des logiciels pour l'assurance qualité et le lissage interactif des pics permettant d'analyser des spectres très complexes. Les limites de détection sont : 0,6Bq/litre d'eau (²²Na) et 200 µBq/m³ (⁷Be sur filtres d'aérosols ; débit d'air : 800 m³/h)

Pour les mesures de l'activité bêta totale, on utilise un ensemble de quatre compteurs proportionnels à grande surface contrôlés par un ordinateur. Ces compteurs permettent de mesurer l'activité bêta sur une surface de 314 cm² (diamètre 20 cm). Ils sont placés dans des blindages en plomb et équipés de compteurs d'anticoïncidences pour réduire leur bruit de fond. Le rendement type pour le rayonnement bêta avec un bruit de fond habituel est de 40% environ. Il existe quatre évaporateurs d'eau automatiques pour préparer des échantillons adaptés aux mesures des émetteurs bêta dissoutes dans l'eau.

La présence de tritium dans l'eau est mesurée au moyen d'un compteur à scintillateur liquide. La limite de détection est de 5 Bq/l pour les mesures avec un faible bruit de fond (10 h de mesures pour un échantillon, 20 h pour le bruit de fond). On atteint cependant 15 Bq/l dans les mesures courantes. Un appareil de distillation de l'eau est disponible pour les cas où un échantillon ne pourrait pas être compté directement dans le compteur à scintillateur liquide en raison d'une forme chimique inadaptée. Le LE possède et utilise également un dispositif pour l'échantillonnage du tritium qui se trouve dans l'air sous forme de vapeur d'eau ou d'hydrogène (APTA 2G).

5.4 Assurance de la qualité

Régulièrement, le LE du CERN participe aux mesures d'intercomparaisons organisées par l'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants en France (décret n° 88-715 du 9 mai 1988) et celles organisées par d'autres établissements reconnus, pour la plupart en Suisse et en Allemagne. On compte en moyenne quatre intercomparaisons par an comprenant des analyses de l'activité gamma et de l'activité du tritium. Les résultats de ces intercomparaisons sont publiés dans les rapports annuels du groupe RP. Conformément aux dispositions du décret n° 88-715, un certificat de qualification a été délivré au LE dans les catégories de mesures des émetteurs bêta-gamma par spectrométrie gamma et des émetteurs bêta purs par scintillation liquide. La certification est publiée au Journal Officiel de la République française du (JOF98).

Le nouveau logiciel de spectrométrie gamma a une partie inhérente d'assurance de la qualité qui respecte la norme ISO 9002. Il inclut des contrôles mensuels d'étalonnage d'énergie, d'efficacité et de résolution spectrométrique des détecteurs gamma. Le logiciel permet de prévenir en cas de détérioration du fonctionnement de l'appareil. Le compteur de scintillation liquide possède un programme d'auto-diagnostic appliqué après chaque mesure d'échantillons. L'efficacité et le bruit de fond des compteurs proportionnels à grande surface sont également contrôlés avant chaque mesure.

Les moniteurs de site (rayonnement diffusé) sont étalonnés tous les trois ans par la section Dosimétrie et Etalonnage du groupe RP et les résultats sont archivés dans une base de données. Les moniteurs sont contrôlés quotidiennement par un logiciel dans l'ARCON qui teste leur bon fonctionnement et contrôle si les résultats de mesure sont raisonnables. En cas de doute, le personnel du groupe RP réagit immédiatement.

Un projet d'introduction plus formel d'un système d'assurance de la qualité suivant la norme internationale ISO 9002 est prévu en 1999 pour le LE.

6 MATERIAUX ET DECHETS RADIOACTIFS

6.1 Transport des matériaux radioactifs

6.1.1 Transport à l'intérieur des zones clôturées du CERN

Le groupe RP doit donner une autorisation pour chaque transport de matériaux radioactifs. Auparavant, la section de surveillance responsable de la zone de départ doit vérifier que la zone de destination convient pour la réception des matériaux radioactifs (zones réglementées selon le chapitre III, paragraphe 1.1 du MRP).

Le transport des sources radioactives classées dangereuses ou très dangereuses (voir chapitre IV, paragraphe 4.1 du MRP) doit toujours être effectué par ou sous la surveillance directe du groupe RP. La section de surveillance responsable de la zone de destination de la source doit être consultée et recevra une copie du «permis de sources radioactives» délivrée à l'utilisateur.

6.1.2 Transport entre les zones clôturées du CERN

Pour tout transport entre les zones clôturées du CERN, les consignes du MRP (chapitre IV, paragraphes 3.4.1 et 3.4.2) à observer sont clairement définies dans la Procédure de Radioprotection [PRP5] «Sources et matériaux radioactifs». Pour les transports radioactifs, une fiche de transfert spéciale, qui doit être dûment remplie, est exigée. Une copie de cette fiche est donnée à l'agent de surveillance à la sortie du site et les autres copies sont classées par les sections de surveillance expéditrice et destinataire pour enregistrer le transport.

6.1.3 Transport hors du CERN

Pour le transport des matériaux radioactifs sortant du domaine du CERN, il est impératif de connaître de manière approfondie les règlements en vigueur. Seuls les membres du groupe RP peuvent autoriser et organiser de tels transports. Les règles générales pour le transport des matériaux radioactifs hors du CERN se trouvent dans le MRP (chapitre IV, paragraphe 3.4.3) et, plus en détail, dans la PRP5 «Sources et matériaux radioactifs». Pour tout transport hors du CERN, le groupe RP délivre le document de transport nécessaire. En outre, lorsqu'il s'agit d'un transport par route, le conducteur reçoit une «Fiche d'information en cas d'accident»; pour le transport par air, une déclaration de marchandise dangereuse (shipper's declaration) doit être remplie. Tous les documents de transport doivent être signés par le chef de la section de surveillance du site de Meyrin ou, en son absence, par le chef de groupe RP, le chef de la Commission TIS ou son adjoint.

Le récepteur des substances radioactives doit impérativement posséder un «permis de les tenir» délivré par les autorités de son pays.

6.2 Stockage et élimination des matériaux radioactifs

En règle générale, pour tout matériel (déchets ou valorisable) issu du LHC, les réglementations françaises en vigueur seront respectées. On établira un référentiel de gestion des déchets essentiellement basé sur :

- un zonage de l'installation établi avant le démarrage du LHC et mise à jour régulière pendant l'exploitation ;

- la traçabilité des matériaux ;
- un bordereau de suivi des déchets ;
- la définition des filières d'élimination vers des installations réceptrices autorisées avec validation par étude d'impact.

En ce qui concerne les matériaux radioactifs, on distingue au CERN deux formes de stockage :

- le stockage d'éléments radioactifs d'accélérateur pour une réutilisation éventuelle, assuré par les divisions d'accélérateurs mais supervisé par le groupe RP en ce qui concerne leurs risques radiologiques
- le stockage des déchets radioactifs sous la responsabilité du groupe RP. Ces déchets sont également en grande partie des éléments d'accélérateur mais aussi des câbles électriques usés ainsi que de tous les autres déchets industriels radioactifs.

6.2.1 Le stockage des matériaux radioactifs au CERN

Tout matériel radioactif est gardé dans des zones contrôlées et stocké sous toit. Actuellement, la division PS stocke son matériel dans les bâtiments et halls 150, 151, 157 et 225 sur le site de Meyrin tandis que la division SL utilise les bâtiments et halls 887, 917, 955 sur le site de Prévessin.

Le stockage des déchets radioactifs est géré par le groupe RP et occupe sur le site de Meyrin une partie du tunnel des anciens ISR, des tunnels de transfert désaffectés et un emplacement au centre de l'accélérateur PS. Il n'y a pas de stockage de déchets radioactifs sur le site de Prévessin.

6.2.2 La gestion des déchets radioactifs

La gestion des déchets radioactifs est assurée par le groupe RP avec l'aide des divisions concernées. A la sortie des zones contrôlées des accélérateurs, des tunnels de transfert et des zones de cibles, le matériel radioactif est pris en charge par le groupe RP, évalué selon son risque radiologique, marqué et, s'il s'agit de déchets, préparé pour le transport vers le centre de gestion au centre de l'anneau du PS. Tous les transports se font suivant le règlement décrit au paragraphe 6.1. Après réception, le matériel est enregistré selon sa provenance et trié suivant son risque radiologique. Ce premier traitement est suivi d'analyses approfondies : identification des radionucléides par spectrométrie gamma pour établir la radioactivité massique ; séparation des matériaux ; conditionnement et stockage des déchets dans des containers appropriés. Un affichage des résultats de mesures de l'activité massique et des débits de dose à l'extérieur des containers complète l'action. Ces informations radiologiques et les coordonnées de l'emplacement du stockage sont entrées dans une base de données.

6.2.3 Le traitement des déchets radioactifs

Le conditionnement des déchets commence avec une séparation des matériaux suivant leur nature et leur radioactivité. Une réduction du volume est obtenue par le coupage par chalumeau à plasma et ciseaux mécaniques et par le compactage par des presses hydrauliques. Des discussions sont en cours pour l'acquisition d'un brouilleur granulaire qui permettrait le morcellement des câbles électriques et la séparation du métal de ses isolations plastiques qui s'avèrent toujours être moins actives que le conducteur. Une telle opération résultera dans une forte réduction de volume.

6.2.4 Assurance de la qualité

La gestion des matériaux radioactifs au CERN passe par leur recensement et leur conditionnement suivis éventuellement de leur élimination des sites du CERN soit comme déchets radioactifs vers les centres de stockage agréés dans les pays hôtes, soit comme matériaux non actifs censés être recyclés également dans des établissements agréés. Cette gestion bien suivie et documentée au CERN fera prochainement l'objet d'une étude en vue d'aboutir à un système d'assurance de qualité. Cette étude sera concentrée dans un premier temps sur la description et l'évaluation de tous les processus actuellement impliqués dans la gestion des matériaux radioactifs dès leur sortie des zones contrôlées jusqu'à leur élimination.

6.2.5 Le recyclage des matériaux radioactifs

La plus grande partie des déchets radioactifs dans un accélérateur est métallique avec une radioactivité relativement modeste. On préconise donc plutôt leur recyclage que leur élimination comme déchets [Höf98c]. Pour un recyclage des matériaux très légèrement radioactifs dans le domaine non radioactif, des seuils de libération universels sont nécessaires. Or, ce concept n'a été pas retenu dans la Directive européenne mais reste en discussion sur le plan international [Dir96, IAEA96]. La France ne reconnaît pas ces seuils de libération universels ; elle impose une traçabilité de tous les déchets issus d'une installation INB en introduisant la définition des déchets très faiblement radioactifs (TFA) avec une radioactivité massique en dessous de 100 Bq/g. Dans le cadre de cette définition, il n'est pas possible de recycler un matériel même si sa radioactivité n'est que très difficile à détecter.

6.2.6 L'élimination des déchets radioactifs

Les coûts d'élimination des déchets radioactifs vers les agences agréées des pays hôtes (ANDRA et NAGRA) et les exigences de leur conditionnement sont très élevés. Les deux agences demandent en outre une connaissance complète de tous les radionucléides issus d'un accélérateur. Le groupe RP a mis sur pieds un programme de recherche sur ce problème d'identification des radionucléides en collaboration avec le Paul-Scherrer-Institut (PSI) en Suisse. Le PSI se trouve dans la même situation que le CERN avec ses déchets sortant de leurs accélérateurs. L'identification de radionucléides exotiques et de ceux difficilement détectables, présents dans ces déchets en très faible quantité pose des problèmes. Leur présence ou absence dans des déchets à éliminer doit être prouvée malgré leur importance négligeable sur le plan radiologique.

Dans le cadre de la collaboration entre le PSI et le CERN, le groupe RP a installé un laboratoire de bas bruit de fond équipé de détecteurs pour spectrométrie gamma d'une grande efficacité. L'identification des radionucléides difficilement détectables par une spectrométrie gamma est entreprise par le PSI. Leurs efforts pour quantifier les radionucléides même de faible teneur sont centrés sur une séparation chimique de différents éléments, surtout en ce qui concerne la formation de tritium dans des solides par des réactions de spallation.

6.3 Démantèlement du LHC

Selon le décret français N° 90-78 du 19 janvier 1990 modifiant le décret N° 63-1228 du 11 décembre 1963 relatif aux installations nucléaires, l'exploitant est tenu, entre autres, à l'appui de sa

demande d'autorisation, de préciser les dispositions prises pour faciliter le démantèlement ultérieur de son installation [Déc90].

Les dispositions de la législation française actuelle seront appliquées pour le démantèlement du LEP. Le démantèlement du LHC sera également organisé sous forme d'un projet soumis aux autorités INB pour approbation. Dans le cadre de ce projet, les procédures de démontage seront étudiées et préalablement établies, de même que la traçabilité et les filières d'élimination des matériaux récupérés seront définies en fonction des catégories établies en France : non active (NA), très faiblement active (TFA) ou faiblement active (FA). Dans tous les cas, les travaux de démantèlement seront effectués sous contrôle strict de sorte qu'aucun élément radioactif de l'accélérateur n'entre dans le domaine public.

Pour le matériel placé directement autour des faisceaux (aimants, chambres à vide etc.), une période de décroissance de plusieurs années sera nécessaire mais suffisante pour atteindre des valeurs inférieures à 10 Bq/g. En effet, on peut s'attendre, après une année de refroidissement radioactif, à ce que la plus grande partie des composants du LHC tombe dans la catégorie TFA.

Les éléments fortement activés (les blocs absorbeurs, les collimateurs, etc.) ainsi que leur blindage seront éliminés comme déchets radioactifs vers l'agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, ANDRA, en France. Pour cette dernière catégorie, il s'agira d'un volume de l'ordre de 500 m³, principalement composé d'environ 2500 tonnes d'acier provenant des blocs absorbeurs et des éléments du LHC en aval des collimateurs. Après une période de refroidissement de plusieurs années, le démontage des blocs absorbeurs et des collimateurs ne posera pas de problèmes radiologiques majeurs. En tenant compte de la distribution de l'activité massique dans les blindages de fer des blocs absorbeurs, on peut s'attendre à ce que la plus grande partie soit recyclée dans le domaine radioactif. Dans ce cas, le volume total à éliminer comme déchet radioactif sera d'autant plus faible.

7 REFERENCES

- CERN96 Manuel de RP 1996, CERN, (1996).
Dir96 Directive 96/29/Euratom du Conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, Journal officiel des communautés européennes, No L. 159 du 29 juin 1996, page 1, (1996)
Daw98 I. Dawson and G. R. Stevenson, Radiological impact of the LHC beam-dumps, CERN/TIS-RP/IR/98-27 (1998)
DEC90 Décret N° 90-78 du 19 janvier 1990 modifiant le décret N° 62-1228 du 11 décembre 1963 relatif aux installations nucléaires. Journal officiel de la République Française, page 881, (21 janvier 1990).
Höf97 M. Höfert, L. Moritz et G. R. Stevenson, Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement, CERN/TIS-RP/97-06 (1997)
Höf98a M. Höfert, ed., Radiation Protection Group Annual Report 1997.
Höf98b M. Höfert, Categorization and treatment of solid material with low specific radioactivity from the high-energy accelerator environment, Submitted as contribution to an International Atomic Energy Agency (IAEA) Safety Guide on: Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities, CERN/TIS-RP/98-15 (1998)
Höf98c M. Höfert, J. W. N. Tuyn and D. Forkel-Wirth, The decommissioning of accelerators : an exercise in the recycling of radioactive material, 15th International Conference on the

- Application of Accelerators in Research and Industry, Denton, CERN/TIS-RP/IR/98-18/CF (1998)
- HSK97 Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen, HSK-R-41/d (Juli 1997)
- Huh98 M. Huhtinen and P. Aarnio, Production of long-lived radionuclides in CMS, CMS Note 1998/044 (1998)
- IAEA96 International Atomic Energy Agency, Clearance levels for radionuclides in solid materials, IAEA-TECDAO-855 (1996).
- JOF98 Journal officiel de la République française du 26/06/98, Arrêté du 22 mai 1998 fixant la liste des laboratoires ayant obtenu un certificat de qualification technique pour la mesure de la radioactivité de l'environnement et de denrées destinées à la consommation (1998).
- ORaP94 Ordonnance suisse sur la RP du 22 juin 1994 (1994)
- PRP1 Procédure de RP 1, La signalisation des zones de travail, TIS/RP 6.11.97.
- PRP5 Procédure de RP 5, Sources et matériaux radioactifs, TIS/RP 15.01.98.
- PRP3 Procédure de RP 3, Enregistrement à la section dosimétrie individuelle du Groupe RP, TIS/RP 30.07.98.
- PRP10 Procédure de RP 10, Le système d'acquisition des données ARCON, TIS/RP 14.06.98.
- Ste92a G. R. Stevenson, A. Fassò and J. Zazula, The estimation of parameters of radiological interest for the scraper system of the LHC, TIS-RP/IR/92-25, (1992).
- Ste92b G. R. Stevenson, A. Fassò and J. Zazula, The estimation of parameters of radiological interest for the LHC main ring, TIS-RP/IR/92-08, (1992).

the 1990s, the number of people with a disability in the United States has increased by 25% (U.S. Census Bureau 1997).

As a result of the increase in the number of people with disabilities, the need for accessible information has become more acute. The Americans with Disabilities Act (ADA) of 1990 (Public Law 101-354) has provided a legal framework for the development of accessible information. The ADA requires that information be accessible to people with disabilities.

The ADA defines information as any material, regardless of the form or medium, that is disseminated to the public. This includes printed materials, audio recordings, video recordings, computer software, and the Internet. The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

The ADA requires that information be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities. This means that information must be accessible to people with disabilities in the same way that it is accessible to people without disabilities.

PROJET LHC
Zonage radiologique

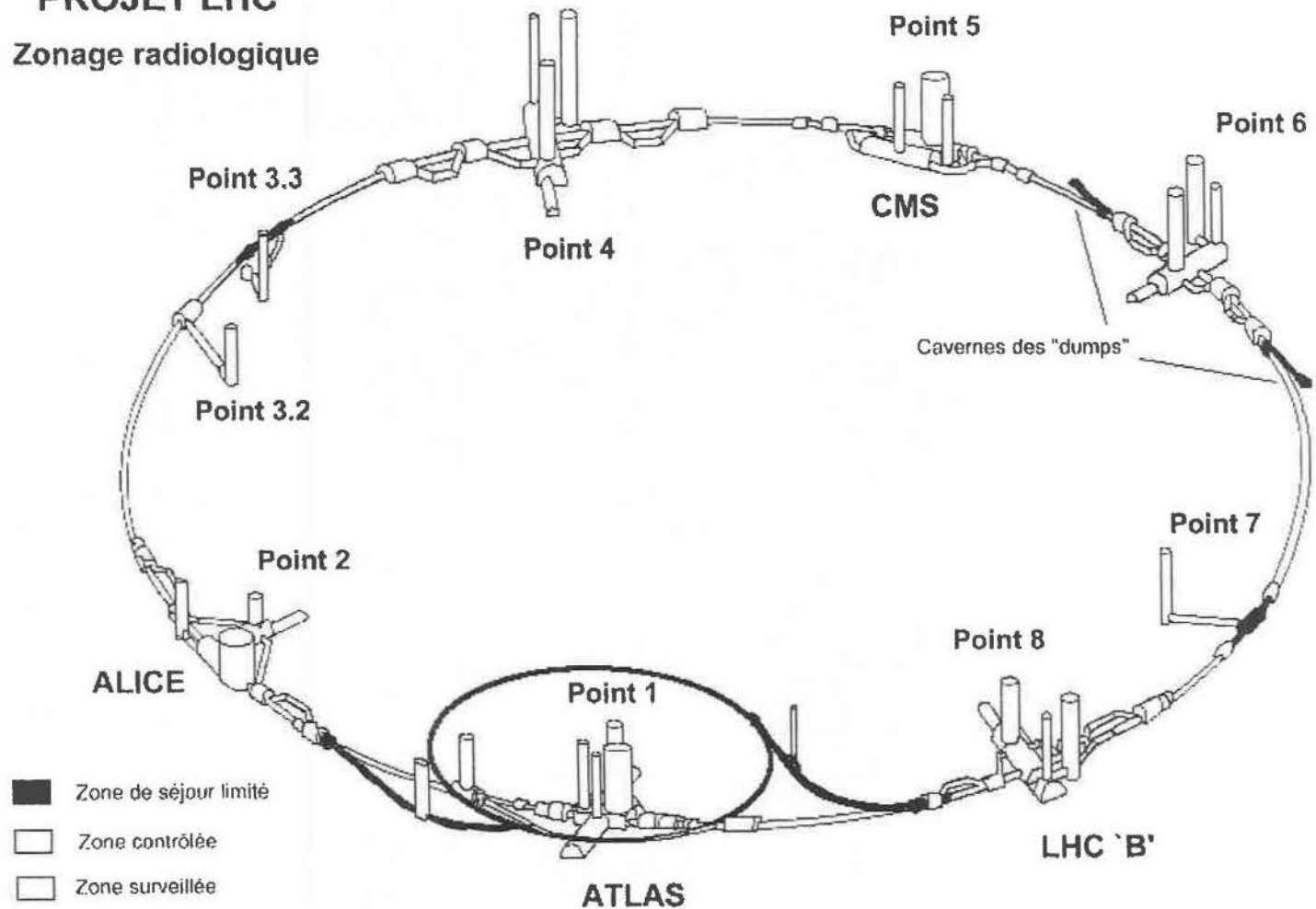


Figure VI.1 – Classification des zones radiologiques du LHC

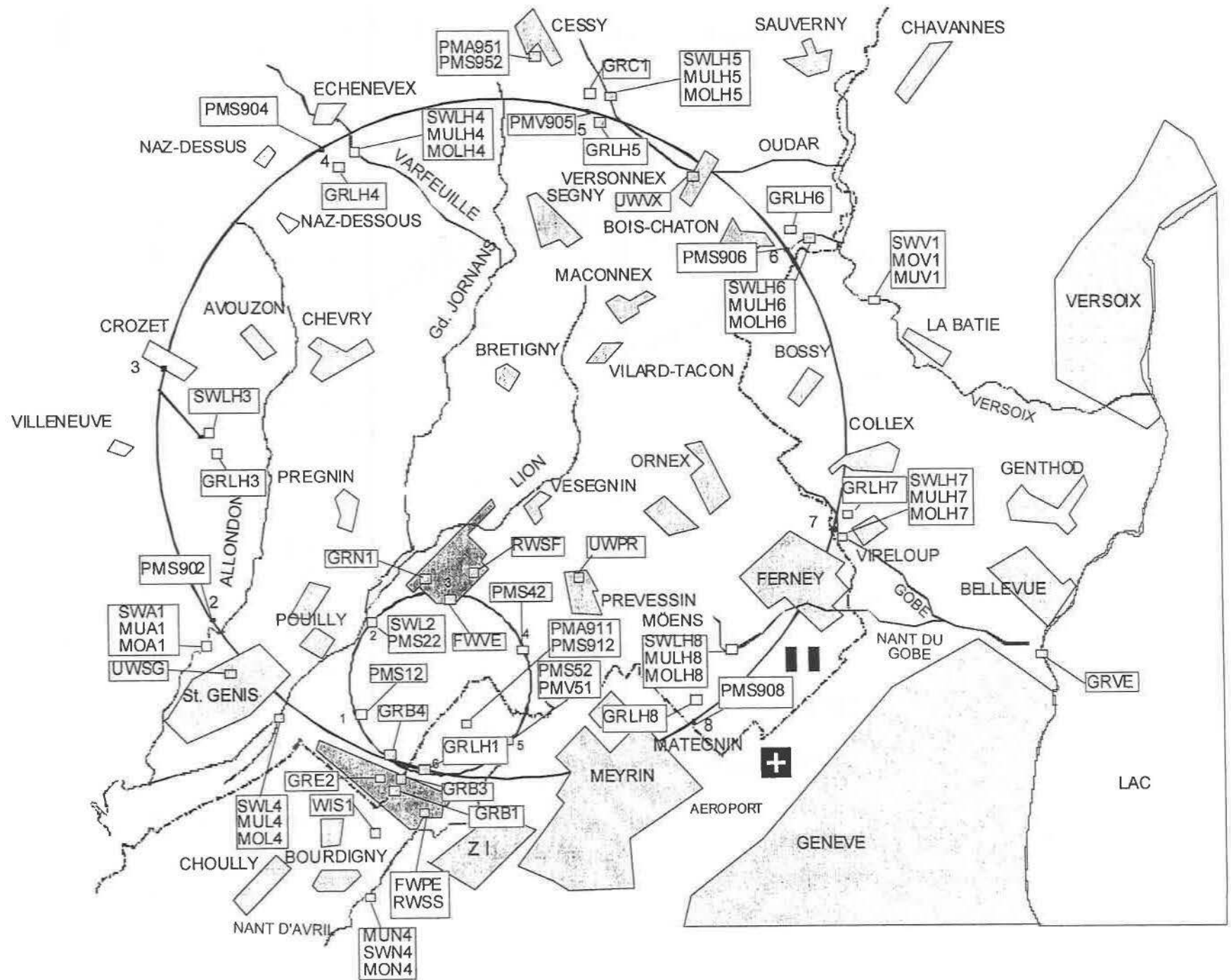


Figure VI.2 – Emplacement des points de mesures et d'échantillonnage

Annexe à la figure VI.2

Nomenclature (légende)

- PMV : Filtre d'aérosol pour la ventilation (émission)
- PMVG : Chambre d'ionisation différentielle pour la ventilation (émission)
- PMW : Moniteur de l'eau rejetée (émission)
- SW : Echantillonneur automatique de l'eau rejetée (émission)
- PMS : Moniteur des rayonnements diffusés
- PMA : Echantillonneur d'aérosol (immission)
- RW : Echantillonneur de l'eau pluviale (immission)
- SW : Lieu d'échantillonnage de l'eau de rivière (immission)
- UW : Lieu d'échantillonnage de l'eau souterraine (immission)
- MO : Lieu d'échantillonnage de végétation des rivières (immission)
- MU : Lieu d'échantillonnage des sédiments des rivières (immission)
- GR : Lieu d'échantillonnage d'herbes ou du sol (immission)
- THVS Echantillonneur d'aérosols transportable de grand volume (immission)

VII REGLES GENERALES D'EXPLOITATION DU LHC

1 ORGANISATION DE LA SECURITE AU CERN

1.1 Généralités

La politique du CERN en matière d'hygiène, de sécurité du travail et de protection de l'environnement est définie dans le document SAPOCO/42, révisé en septembre 1994. Ce document précise les obligations et les pouvoirs de l'Organisation et définit les devoirs, droits et moyens de chacun travaillant sur le domaine du CERN.

1.2 Structure hiérarchique et responsabilités en matière de sécurité

La structure hiérarchique du CERN en matière de sécurité est représentée sur l'organigramme en figure VII.1. Le Directeur général est responsable devant le Conseil du CERN pour toutes les questions de sécurité de l'Organisation. Il est assisté dans cette mission par :

- les Directeurs ;
- la structure hiérarchique des divisions ;
- la Commission de l'Inspection technique et de la Sécurité TIS (voir paragraphe 1.4 de ce chapitre) ;
- le Comité pour la Politique de Sécurité (SAPOCO) ;
- les Comités des Délégués divisionnaires à la Sécurité (DSOC), des délégués à la Sécurité de Radiation (RSOC) et des Délégués à la Sécurité des Gaz inflammables (FGSOC) ;
- les Comités tripartites (CERN, autorités françaises et suisses) de Radioprotection (RPC) et des Conditions de Sécurité de Travail des Entreprises intervenant sur le domaine du CERN (CECSTE) ;
- la Commission des Accidents.

Les membres des collaborations d'expérimentateurs relèvent aussi de l'autorité du Directeur général et doivent se conformer à la réglementation de la sécurité en vigueur dans l'Organisation, tant pour la construction des équipements que pour leur exploitation au CERN. Ils sont intégrés dans la structure hiérarchique du CERN grâce à leur rattachement à une division-hôte qui fournit toutes les informations sur l'Organisation et sur la réglementation de la sécurité au CERN et qui veille à ce que cette dernière soit respectée à tous les stades d'une expérience.

Pour les questions de sécurité, une collaboration d'expérimentateurs nomme un chef de groupe (GLIMOS : Group Leader In Matters Of Safety) qui assume la responsabilité avec l'autorité et le pouvoir nécessaires de la conception jusqu'au démantèlement d'une expérience.

1.3 La réglementation de la sécurité au CERN

Le CERN, en tant qu'organisation internationale, s'est dotée d'une réglementation propre en matière de sécurité, unifiée et valable pour les deux pays-hôtes qui abritent ses sites, et également dans le but de couvrir des domaines d'activités pour lesquels il n'existe pas de réglementation.

La réglementation du CERN est essentiellement basée sur les Directives européennes et les règles en vigueur dans les pays-hôtes en tenant toujours compte de la réglementation la plus récente et la plus contraignante. Pour la construction d'équipements, le CERN choisit en priorité soit les règles et normes européennes, soit les règles et normes de l'un des Etats membres.

Les documents de sécurité qui ont force d'obligation se classent en six catégories :

- le document SAPOCO/42 qui définit la politique en matière de sécurité ;
- les codes de sécurité qui traduisent la politique de sécurité en règles applicables ;
- les plans divisionnaires de sécurité qui définissent l'organisation et les dispositions particulières d'une division et la responsabilité territoriale sur le domaine du CERN ;
- les instructions de sécurité qui fixent les modalités d'application des codes de sécurité ou traitent de sujets bien déterminés ;
- le rapport de sécurité de projets, les rapports d'inspection, les certificats d'essai ;
- d'installation ou d'équipements et les autorisations de dérogation avec leurs exigences ;
- les consignes de sécurité pour l'exploitation.

L'information sur la sécurité est complétée par des notes et des bulletins de sécurité publiés par la Commission TIS.

1.4 La Commission de l'Inspection technique et de la Sécurité (TIS)

Dans sa mission d'aider le Directeur général à s'acquitter de sa responsabilité en matière de sécurité, la Commission TIS a les fonctions générales suivantes :

- élaborer et diffuser les documents de sécurité (voir paragraphe 1.3 de ce chapitre) ;
- vérifier par des inspections et des contrôles réguliers ou ponctuels que la réglementation est bien appliquée ;
- examiner les demandes de dérogations et décider de leur autorisation ;
- stimuler et organiser des séances de formation et d'information sur la sécurité ;
- effectuer des enquêtes circonstanciées suite à des accidents ou incidents.

Outre ces fonctions générales, la Commission TIS a des responsabilités exécutives dans certaines tâches spécifiques :

Le groupe de Sécurité générale

- décide de la prise de précautions spéciales et supervise leur application ;
- gère et supervise l'achat, l'utilisation, le stockage, le transport et l'évacuation des matières dangereuses ;
- étudie les problèmes de sécurité posés par l'utilisation de nouveaux matériaux ou méthodes de travail et donne des conseils pour leur application ;
- suit les équipements et les installations exigeant des contrôles et essais réguliers.

Le groupe de Radioprotection

- exerce une mission de surveillance, de contrôle et d'intervention ;
- représente, en matière de protection contre les rayonnements, la direction auprès des chefs de division ;
- fournit à ces derniers tous conseils en matière de protection contre les rayonnements, aussi bien au stade du projet qu'en fonctionnement de routine ;

- donne son avis lors de l'établissement des dossiers de sûreté pour la définition des moyens de protection et de contrôle et intervient pour leur mise en place ;
- établit les consignes générales de radioprotection appelés «Procédures de Radioprotection» et participe à l'élaboration, avec des responsables d'installations, des consignes particulières et règles d'exploitation des accélérateurs ;
- exerce une mission générale de contrôle sur l'existence et la validité des autorisations et sur l'applications des mesures et consignes générales. En particulier, les agents du groupe RP contrôlent l'efficacité des consignes de radioprotection. Ils proposent les modifications ou compléments qui s'avèrent nécessaires suite aux résultats de mesure de rayonnement et par l'accomplissement des tâches qui lui sont confiées par les textes réglementaires et le règlement interne du CERN ;
- assure l'information du personnel en matière de radioprotection ;
- intervient en cas d'accident dans une installation ;
- participe aux travaux du «Comité de Radioprotection» et en assure le secrétariat ;
- assure l'entretien du matériel de radioprotection.

Le Service médical

- assure la surveillance médicale et effectue les examens médicaux réglementaires pour le personnel du CERN et, le cas échéant, pour le personnel d'entreprises ;
- surveille les places de travail aux points de vue de l'hygiène et de l'ergonomie ;
- organise un service de premier secours.

Le Service de feu et de secours

- assure un service d'intervention d'urgence permanent pour le sauvetage, la lutte contre le feu et les premiers secours ;
- assure le fonctionnement d'une centrale d'alarme (SCR) 24 h/24 et 365 jours/an ;
- assure la liaison avec les brigades du feu et autres services d'urgence dans les pays-hôtes.

1.5 La sécurité des entreprises

Les entreprises intervenant sur le domaine du CERN sont soumises à la réglementation du pays-hôte (France ou Suisse), en matière de sécurité, selon le domaine dans lequel elles exercent leurs activités. Elles doivent également se conformer à la réglementation du CERN en la matière. Le contrôle du respect des règles de sécurité des pays-hôtes par les entreprises incombe aux organismes officiels du pays-hôte concerné. La Commission TIS veille au respect des règles spécifiques aux travaux au CERN par les entreprises.

Pour les travaux de moyenne ou de grande envergure (volume de travail >4000 h) et faisant intervenir plusieurs entreprises, le CERN applique les Directives européennes (89/391/CEE et 92/57/CEE) et, en particulier, les décrets français 93-1418 (décembre 1993) et 94-1159 (décembre 1994) et ceux relatifs à la coordination de sécurité pour les chantiers. Des coordinateurs qualifiés de première catégorie suivront les chantiers d'installation du LHC.

Un Comité d'Etude des Conditions de Sécurité du Travail des Entreprises (CECSTE) coordonne les actions préventives en matière de sécurité et d'hygiène du travail pour l'ensemble des activités des entreprises sur le domaine du CERN. Il comprend :

- des représentants des Inspections du travail et autres organismes officiels des pays-hôtes ;
- des représentants de la Commission TIS ;

- des représentants des divisions du CERN, ordonnateurs de travaux ;
- des représentants des entreprises concernées par les problèmes figurant à l'ordre du jour.

Un Comité spécial d'Hygiène et de Sécurité (CSHS), structure de prévention permanente, traite toutes les questions de sécurité et d'hygiène du travail des entreprises intervenant au CERN avec visites régulières des chantiers et des lieux de travail. La composition de ce comité est la même que pour le CECSTE.

2 ORGANISATION DE LA PREVENTION GENERALE

2.1 Exploitation du LHC et de ses expériences

L'exploitation des accélérateurs faisant partie du complexe LHC est assurée par les divisions qui ont eu la responsabilité de la conception et de la réalisation des différentes parties du projet. Ce sont les divisions PS pour les pré-injecteurs (LINAC, Booster, Accumulateur d'Ions, Proton Synchrotron) et les divisions LHC et SL pour le SPS et le LHC.

L'exploitation des pré-injecteurs se fait à partir d'une salle de commande située sur le site de Meyrin (MCR). Les contrôles de l'opération du SPS et du LHC sont regroupés dans une même salle de commande (PCR) située sur le site de Prévessin. Il faut mentionner que pendant les arrêts des accélérateurs, au moins une personne est en poste dans les salles de commande, essentiellement pour gérer les accès aux ouvrages souterrains.

Les installations d'infrastructure et les services généraux, non liés directement au fonctionnement des accélérateurs, sont à la charge de la division ST avec une salle de commande commune (TCR) pour tous les sites du CERN. Le TCR, situé sur le site de Meyrin, fonctionne 24 h/24, 365 jours/an. Les opérateurs du TCR interviennent eux-mêmes en cas d'incident (alarme de niveau 2, voir chapitre V, paragraphe 9.1) ou font appel aux groupes techniques concernés présents sur les sites ou en piquet.

Chacune des expériences LHC a sa propre salle de commande située en surface des points d'accès. Pendant les tests et l'exploitation des expériences, un expert en systèmes de sécurité est présent en salle de commande (service de quart, GLIMOS ou SLIMOS = chef de quart en matière de sécurité).

2.2 Consignes de sécurité et formation du personnel

Chaque personne arrivant au CERN pour y travailler (membre du personnel, visiteur scientifique, personnel d'entreprise) doit suivre une session d'information générale de base d'une demi-journée sur la sécurité avant d'obtenir une carte d'accès. Après un rappel des dangers qui présentent l'exercice d'une activité en milieu industriel, les risques spécifiques du CERN et les consignes à observer sont expliqués: rayonnements ionisants, matériaux radioactifs, champs magnétiques, lasers, produits chimiques, gaz et liquides inflammables, pollutions, installations électriques, espaces confinés, équipement sous pression, etc. Sont également expliqués les moyens de secours et d'intervention d'urgence, les arrêts d'urgence, l'évacuation des ouvrages, l'utilisation des extincteurs, les permis de feu, et les procédures à suivre en cas d'accident ou d'incident. Les personnes appelées à travailler dans les ouvrages souterrains doivent suivre un cours de sécurité spécial avant d'obtenir l'autorisation d'y accéder. Dans ce cours, sont spécifiquement évoqués les

procédures d'accès, l'évacuation et les sorties de secours et le port des masques à oxygène autonomes.

Les consignes de sécurité qui ont force d'obligation sont élaborées par la Commission TIS et les responsables de la sécurité des divisions concernées.

Le Code de sécurité A3, basé sur la Directive européenne 92/58/CE, définit les signes de sécurité à mettre en place au CERN pour donner des informations sur les risques ou dangers existants.

2.3 Contrôle et essais des systèmes et éléments de sécurité

Dans le cadre d'assurance de la qualité pour tous les systèmes de sécurité, le CERN applique les règles et normes en vigueur pour la sûreté des accélérateurs en France. En général, le CERN exige que les fournisseurs de systèmes de sécurité soient qualifiés et appliquent les normes de la série ISO 9000 ou équivalentes.

Pour les contrôles et vérifications initiaux et périodiques de ces systèmes, le CERN suit les recommandations et règlements français, souvent avec l'aide des organismes agréés.

Les systèmes ou équipement concernés sont :

- la détection d'incendie et d'extinction ;
- le réseau d'eau incendie ;
- l'alerte d'évacuation ;
- les moyens d'évacuation ;
- l'alerte «faisceau autorisé» ;
- les téléphones rouges ;
- la détection «gaz inflammables» ;
- la détection «manque d'oxygène» ;
- les alimentations électriques de secours ;
- les éclairages de secours ;
- les engins de levage (ascenseurs, ponts roulants, etc.) ;
- les équipements sous pression avec leurs dispositifs de sécurité ;
- les éléments importants pour la sécurité (EIS) des systèmes d'accès et de verrouillage de faisceaux (voir chapitre III, paragraphe 3.6) ;
- la détection de rayonnements et le contrôle des rejets.

2.4 Attitude et conduite en cas d'accident ou d'incident

En cas d'accident, d'incident ou de danger imminent, il faut alerter la centrale d'alarme du service de secours et feu du CERN en composant le 112 depuis un téléphone CERN ou en utilisant un TELEPHONE ROUGE. La localisation du poste d'appel apparaît immédiatement sur un écran dans la centrale d'alarme.

Après un accident ou un incident, le chef de groupe concerné doit établir un rapport factuel envoyé à la Commission TIS qui, le cas échéant, effectue une enquête circonstanciée. En cas d'accident grave, le Directeur général peut convoquer la Commission des Accidents et une Commission d'Enquête suivant la procédure administrative définie dans le document SAPOCO/42,

annexe 4, pour déterminer les faits et circonstances de l'accident et pour prendre les mesures et décisions qui s'imposent.

Tout incident ou accident qui concerne directement la sûreté du LHC, et en particulier ses EIS, ainsi que la protection de l'environnement, doit être immédiatement communiqué au chargé de sécurité INB du CERN qui le transmettra aux autorités françaises et suisses concernées.

3 ORGANISATION DU SERVICE DE SECOURS ET DU FEU

Le Service de Secours et du Feu du CERN (FB), caserné sur le site de Meyrin, dispose de 58 sapeurs-pompiers professionnels. Quatre équipes d'intervention de 12 sapeurs-pompiers assurent un service 24h/24 et 365 jours/an. Dix sapeurs-pompiers sont à la disposition du service pendant les heures de travail normales du CERN, s'occupant en outre de tâches administratives, d'organisation du service et de support technique. En cas d'intervention majeure, les équipes peuvent compter sur l'aide du chef de service et d'un pompier principal durant la journée et de trois sapeurs-pompiers en service de piquet à toute heure. Les délais d'intervention aux points les plus éloignés sont de l'ordre de 15 à 30 mns.

Chaque équipe d'intervention est composée d'un chef d'équipe, d'un chef d'équipe adjoint, de trois pompiers principaux et de six sapeurs-pompiers. Chaque équipe compte quatre secouristes et au moins un ambulancier professionnel. Le service FB dispose de deux véhicules d'incendie, deux ambulances, un véhicule lourd « pionnier » et un porte-benne pour le transport d'équipement supplémentaire (extincteurs, matériel de lutte contre la pollution, inondations etc.)

La salle de contrôle du service FB (SCR) est occupée en permanence par au moins une personne. Toutes les alarmes de niveau 3 (voir chapitre V, paragraphe.9.1), ainsi que d'autres informations importantes concernant la sécurité, sont reçues et traitées dans le SCR. En cas d'alarmes ou appels multiples arrivant au SCR, le chef d'équipe décide de la priorité des interventions. Le service FB est équipé d'un système de radiocommunication spécial pour toutes les communications entre le SCR, les équipes intervenant en surface et en souterrain, le Service d'Incendie et de Secours (SIS) du Canton de Genève, le service de secours par hélicoptère suisse (REGA) et les centres de secours volontaires du Pays de Gex.

4 EXPLOITATION DES SYSTEMES DE CONTROLE D'ACCES ET DE VERROUILLAGE

Les systèmes d'accès contrôlé aux sites, aux bâtiments et aux zones souterraines sans verrouillage des faisceaux du LHC (AC0 et AC1), fonctionnent en mode automatique. Les procédures de contrôle validant les vérifications ID+FB (film-badge personnel) déclenchent immédiatement l'activation des équipements de contrôle d'accès. A défaut, les vérifications s'effectueront à partir de la Centrale de Surveillance des Accès (Bât. 120, site de Meyrin) d'où il sera possible d'activer les équipements. Les systèmes d'accès contrôlé aux zones souterraines avec verrouillage des faisceaux ainsi qu'aux tunnels et aux expériences du LHC (AC3 et AC4), requièrent une supervision continue pour :

- l'exploitation des modes d'accès et l'activation des commandes pilotant les points d'accès délivrant les éléments de «Verrouillage Personnel-VP2 ou VP3» ;
- le déverrouillage temporaire et la commande d'ouverture de l'EIS-accès ;

- la supervision du franchissement dans la zone contrôlée des personnes autorisées par l'intermédiaire de caméras vidéo et de stations d'interphones.

Le trafic du personnel prévu, les modes d'accès et la localisation des systèmes nous ont amenés à prévoir une supervision décentralisée. En effet, la salle de contrôle principale (PCR) est chargée d'établir les conditions de sécurité requises autorisant l'accès et les modes d'exploitation au moyen des chaînes de sécurité principales et locales. Ensuite, les systèmes d'accès contrôlé sont exploités, soit depuis la salle de contrôle, soit localement au niveau de chaque site. Cette décentralisation permet d'augmenter la capacité du système de contrôle d'accès avec la prise en charge simultanée de plusieurs points d'accès.

4.1 Mise en route de l'accélérateur

Préparation de la machine pour sa mise en route

Pour mettre en route le LHC, il est indispensable que tous les EIS-accès soient en position sûre et que les zones avec verrouillage des faisceaux ainsi que les tunnels et expériences du LHC soient vides de toute personne, que toutes les portes et grilles de séparation soient en position sûre et enfin, que tous les verrouillages personnels soient levés. Afin de satisfaire ces conditions, une patrouille est effectuée dans toutes les zones de la machine délimitant le périmètre de verrouillage de l'accélérateur. La patrouille dans un accélérateur tel que le LHC est rendue difficile par l'étendue de l'ouvrage. C'est pourquoi la totalité de l'espace de recherche a été découpée en huit zones comprenant chacune une subdivision en secteurs. Ces patrouilles peuvent également être prises en charge à partir des consoles décentralisées de supervision, afin de diminuer les temps d'intervention.

Basculement du système ACS vers le système MIS

En mode «accès», toutes les clés de sécurité centrales sont captives dans les cylindres de clé correspondant au système de contrôle d'accès (ACS). Au fur et à mesure que les zones sont «patrouillées» et fermées, les EIS-accès de chaque chaîne de sécurité apparaissent en position sûre et, dès lors, il est possible d'activer les commandes de libération des clés de sécurité centrales afin de les positionner dans les cylindres correspondants au système de verrouillage des faisceaux (MIS).

Toute procédure d'accès au sein d'une chaîne de sécurité devient impossible du moment que la clé de sécurité centrale se trouve dans le cylindre dédié au système de verrouillage des faisceaux. Les signaux d'inhibition VETO appliqués aux EIS-machine sont levés uniquement après que l'avertissement sonore dans les tunnels signifiant l'imminence des faisceaux a retenti durant un délai fixé (env. 5 mns). A ce stade, les opérateurs de la salle de contrôle sont en mesure d'alimenter les équipements du LHC et d'injecter les faisceaux.

4.2 Arrêt de l'accélérateur

Arrêt programmé

Lorsqu'il s'agit d'un arrêt prévu, les opérateurs de la salle de contrôle arrêtent les équipements de la machine depuis leurs consoles d'exploitation. Ainsi, les EIS-machine des chaînes de sécurité

basculent en position sûre et, dès lors, il est possible d'activer les commandes de libération des clés de sécurité centrales afin de les positionner dans les cylindres correspondants au système de contrôle d'accès (ACS). Le basculement a pour effet l'application du signal d'inhibition VETO sur les EIS-machine de la chaîne de sécurité correspondante. Toute activation des EIS-machine d'une chaîne de sécurité est impossible du moment que la clé de sécurité centrale se trouve dans le cylindre dédié au système de contrôle d'accès. Une fois la machine arrêtée, les opérateurs de la salle de contrôle donnent l'accès à une équipe du service de radioprotection qui est chargée d'effectuer la «patrouille radiation». Cette opération consiste à mesurer le niveau de radiation résiduelle avant d'autoriser l'accès au personnel.

Arrêt lié à l'activation d'un dispositif de passage d'urgence

En mode «machine», l'activation du dispositif de passage d'urgence d'un EIS-accès entraîne l'arrêt immédiat des EIS-machine de la chaîne de sécurité à laquelle il appartient. En fonction de la localisation de l'EIS-accès, l'arrêt de l'accélérateur peut être immédiat ou progressif. A titre d'exemple, l'activation du dispositif de passage d'urgence en tête d'un puits du LHC ne justifie pas l'arrêt brutal de l'accélérateur. Dans ce cas, une fois les faisceaux circulants et injectés supprimés, il est envisagé de conserver certains équipements sous tension tant que les EIS-accès délimitant la zone les contenant restent inviolés. Lorsque les EIS-machine d'une ou des chaînes de sécurité impliquées sont en position sûre, l'opérateur de la salle de contrôle libère la ou les clés de sécurité centrales et effectue le transfert dans les cylindres de clés correspondant au système de contrôle d'accès. L'opérateur donne l'accès à une patrouille de fermeture qui est chargée de rétablir les conditions de sécurité et de s'assurer que les zones concernées sont vides de toutes personnes.

Exploitation centralisée/décentralisée

De par l'étendue et la fréquentation estimée du LHC, il est prévu, en plus de l'exploitation à partir de la salle de contrôle (PCR), une exploitation locale du système de contrôle d'accès, au niveau des différents sites. A titre d'exemple, une fois les conditions d'accès établies par les opérateurs de la salle de contrôle (PCR), des personnes autorisées et formées seront en mesure de donner l'accès à leur caverne d'expérience. La décentralisation de l'exploitation du système de contrôle d'accès est possible du fait qu'aucunes des fonctions liées à la sécurité ne sont accomplies par l'informatique. Ainsi la convivialité du système de contrôle d'accès est améliorée de par la disponibilité de ressources humaines et matérielles. A titre d'exemple, avec une exploitation centralisée, lors d'une défaillance du réseau de communication de la salle de contrôle, l'accès à l'ensemble du LHC devient impossible. Pour cette même défaillance, au moyen d'une exploitation décentralisée, l'exploitation du système de contrôle d'accès peut s'effectuer au niveau des sites du moment que les chaînes de sécurité sont opérationnelles.

4.3 Assurance de la qualité

Plan d'assurance qualité

Les systèmes de contrôle d'accès et de verrouillage de faisceaux sont soumis à un Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ) couvrant les différentes phases du projet. Les phases du projet couvertes par le Plan d'Assurance de la Qualité sont :

- la définition des besoins, les spécifications techniques et fonctionnelles des systèmes «hardware et software» ;
- l'étude et l'analyse de sûreté ;

- la réalisation des prototypes, la validation en usine ;
- la réalisation, l'installation des systèmes sur les sites, la validation sur site ;
- les procédures d'habilitation, les sauvegardes des progiciels et des données, les vérifications périodiques ;
- la maintenance ;
- l'évolution du projet ;
- l'archivage des documents (rapports et protocoles) liés à la traçabilité des actions et vérifications conduites dans le cadre du cycle de vie du projet.

Les réglementations et normes servant de références pour le projet seront basées sur l'arrêté du 10 août 1984 relatif à la qualité de la conception, de la construction et de l'exploitation d'une INB et sur le référentiel ISO 9000, ou similaire.

Contrôles et essais périodiques

Dans le cadre du suivi de la qualité, les procédures de tests des équipements de contrôle d'accès et de verrouillage de faisceaux ont pour objectif de vérifier et d'éprouver le bon fonctionnement de tous les dispositifs constituant l'Elément Important pour la Sûreté (EIS). Ces essais et vérifications sont conduits selon un protocole particulier à chacune des chaînes de verrouillage et les résultats sont reportés dans un dossier comprenant tous les essais pratiqués avec les annotations concernant les résultats obtenus. Les anomalies ou dysfonctionnements rencontrés font l'objet d'une fiche d'anomalie avec le traitement qui en découle pour rétablir les conditions de fonctionnement normal.

Ces essais se déroulent en fonction de l'exploitation ou de l'évolution de la machine :

- essais annuels complets avant la remise en fonctionnement de l'accélérateur après la période d'arrêt d'hiver ;
- essais de vérification partielle consécutifs à la modification ou à la réparation d'équipements touchant la sûreté de l'accélérateur ;
- essais de vérifications partielle ou totale en cas de modification ou d'évolution touchant des parties ou la totalité de l'EIS ;
- essais sur demande des services compétents en matière de sûreté.

Maintenance

Afin que les installations soient toujours en état de fonctionner de manière satisfaisante, un plan de maintenance est établi pour satisfaire cet objectif. Il faut distinguer les services de maintenance particuliers suivants :

- maintenance préventive, réalisée selon un planning et des gammes adéquates pour les différents types d'équipements ;
- maintenance corrective, réalisée selon les nécessités en cas de dysfonctionnement ;
- maintenance évolutive, réalisée en fonction des besoins nouveaux d'exploitation et de la disponibilité de nouvelles versions des supports informatisés.

La maintenance est organisée dans le cadre de la section responsable des systèmes d'accès et comprend un service d'astreinte avec intervention sur appel de la salle de contrôle en cas de défaillance. Les interventions sont signalées et reportées dans les dossiers de suivi de la qualité.

the 1990s, the number of people with a mental health problem has increased in the UK (Mental Health Act 1983, 1990).

There is a growing awareness of the need to improve the lives of people with mental health problems. The Department of Health (1999) has set out a vision for the future of mental health care in the UK. This vision is based on the following principles: (1) people with mental health problems should be treated as individuals; (2) people with mental health problems should be given the opportunity to participate in decisions about their care; (3) people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes; (4) people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own communities; (5) people with mental health problems should be given the opportunity to live a full and meaningful life.

The Department of Health (1999) has also set out a number of key objectives for the future of mental health care in the UK. These objectives are:

- (1) to reduce the number of people with mental health problems who are admitted to hospital;
- (2) to reduce the number of people with mental health problems who are admitted to hospital for long-term care;
- (3) to reduce the number of people with mental health problems who are admitted to hospital for acute care;
- (4) to reduce the number of people with mental health problems who are admitted to hospital for forensic care;
- (5) to reduce the number of people with mental health problems who are admitted to hospital for residential care.

The Department of Health (1999) has also set out a number of key strategies for the future of mental health care in the UK. These strategies are:

- (1) to improve the quality of care for people with mental health problems;
- (2) to improve the access to care for people with mental health problems;
- (3) to improve the support for carers of people with mental health problems;
- (4) to improve the support for people with mental health problems who are living in their own homes;
- (5) to improve the support for people with mental health problems who are living in their own communities.

The Department of Health (1999) has also set out a number of key actions for the future of mental health care in the UK. These actions are:

- (1) to improve the quality of care for people with mental health problems;
- (2) to improve the access to care for people with mental health problems;
- (3) to improve the support for carers of people with mental health problems;
- (4) to improve the support for people with mental health problems who are living in their own homes;
- (5) to improve the support for people with mental health problems who are living in their own communities.

The Department of Health (1999) has also set out a number of key challenges for the future of mental health care in the UK. These challenges are:

- (1) to improve the quality of care for people with mental health problems;
- (2) to improve the access to care for people with mental health problems;
- (3) to improve the support for carers of people with mental health problems;
- (4) to improve the support for people with mental health problems who are living in their own homes;
- (5) to improve the support for people with mental health problems who are living in their own communities.

The Department of Health (1999) has also set out a number of key messages for the future of mental health care in the UK. These messages are:

- (1) people with mental health problems should be treated as individuals;
- (2) people with mental health problems should be given the opportunity to participate in decisions about their care;
- (3) people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes;
- (4) people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own communities;
- (5) people with mental health problems should be given the opportunity to live a full and meaningful life.

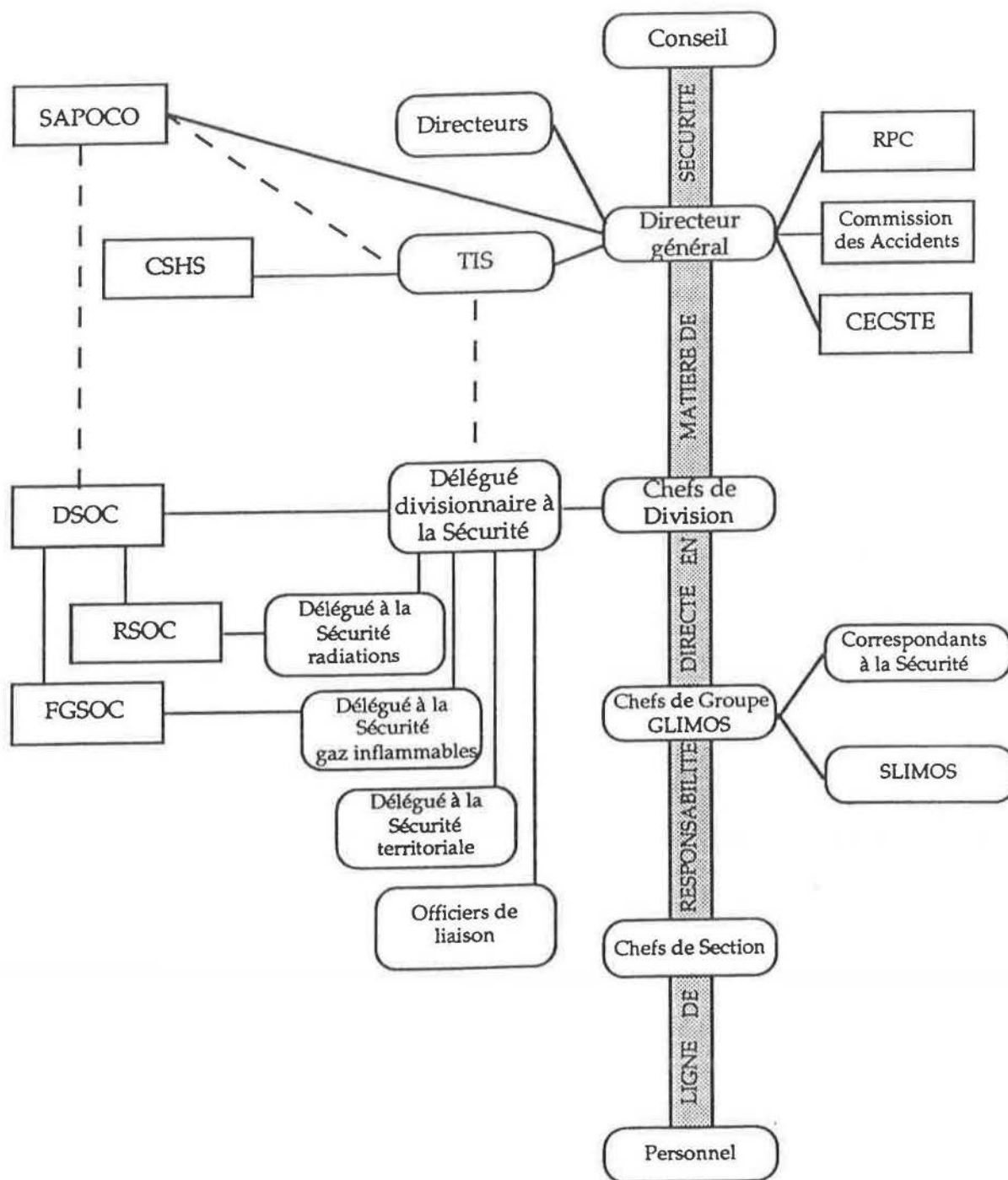


Figure VII.1 - Organisation de la sécurité au CERN

VIII ANALYSE CRITIQUE DE LA SURETE DU LHC

1 SURETE DANS L'INSTALLATION SUITE A UN INCIDENT RADIOLOGIQUE

Malgré toutes les mesures de prévention prises, les contrôles et les surveillances des faisceaux prévus, on ne peut pas complètement exclure qu'un faisceau de protons circulant ($4,7 \cdot 10^{14}$ protons à une énergie de 7 TeV) se perde localement dans le LHC. Un tel incident a comme première conséquence la destruction de la chambre à vide et de l'élément de la machine le plus proche ; l'arrêt de la machine est ensuite immédiat et elle ne peut reprendre son fonctionnement qu'après plusieurs semaines, voire plusieurs mois.

Le scénario le plus pessimiste de perte de faisceau dans la machine résulte de la conjonction de deux événements indépendants :

1. Nécessité d'éjecter les faisceaux due à :
 - des pertes importantes d'un faisceau ;
 - une panne du système RF ;
 - une transition d'un ou plusieurs aimants supraconducteurs («quench») ;
 - déclenchement du système de protection des aimants cryogéniques ;
 - chute de l'alimentation électrique 400 kV ;
2. Panne dans le système d'éjection, conçu pour fonctionner même en cas d'une panne générale de l'alimentation électrique (voir paragraphe 3 de ce chapitre).

Ces événements risquent fortement d'entraîner les résultats suivants :

- la chambre à vide sera percée ;
- les collimateurs au point 7 seront fondus ;
- quelques éléments de la machine (essentiellement les quadripôles chauds) seront endommagés sur quelques centaines de mètres en amont et en aval des collimateurs.

Pour les estimations radiologiques, l'hypothèse de perte totale d'un faisceau dans un bloc métallique (fer) a été retenue.

Suite à un tel incident, l'analyse des risques retiendra les conséquences suivantes :

- l'activation et la contamination de l'air par des matériaux évaporés ;
- les doses ou débits de dose dans les zones accessibles pendant le fonctionnement de l'accélérateur ;
- contamination éventuelle de la zone concernée par des matériaux évaporés.

Activation de l'air après une perte totale de faisceau

Une estimation globale et approximative pour la radioactivité lorsqu'un faisceau de proton stocké dans le LHC est complètement perdu dans la machine peut être obtenue à partir d'une formule de Thomas et Stevenson [Tho88]. L'activation à saturation A_{sat} en Bq dans un bloc de fer est le produit entre l'intensité des protons n_p par seconde multipliée avec leur énergie E en GeV.

$$A_{\text{sat}} = n_p \cdot E$$

La perte totale d'un faisceau se passe dans un temps qui correspond à la longueur du faisceau stocké dans la machine qui, pour le LHC, est de 100 μs . Or, la relation mentionnée plus haut est modifiée par un terme qui prend en considération le temps d'activation et la décroissance de la

radioactivité. Un tel terme a été proposé par Sullivan [Sul92]. L'activité après un temps d'activation T et une période de décroissance t se calcule de la manière suivante :

$$A = n_p \cdot E \cdot \ln[(t + T)/t] / k$$

La constante k peut être estimée en supposant que le LHC fonctionnera à 7 TeV avec une perte de $4,7 \cdot 10^{18}$ protons par seconde pour un temps T de 10 ans et le temps de refroidissement t sera de 100 μ s :

$$k_{sat} \approx 7000 \cdot 4,7 \cdot 10^{18} \ln [(10 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 300) / 10^{-4}]$$

En réalité, le faisceau de protons ne réagit que pendant 100 μ s ce qui résulte dans une activité, après un temps de refroidissement radioactif également de 100 μ s, de :

$$A = 7000 \cdot 4,7 \cdot 10^{18} \ln [2 \cdot 10^{-4} / 10^{-4}] / 28,8 = 7,9 \cdot 10^{20} \text{ Bq}$$

Cette radioactivité totale sera décrie à :

$1,3 \cdot 10^{14}$ Bq après 10 mns, à $9,5 \cdot 10^{11}$ Bq après un jour et à $3,1 \cdot 10^{10}$ Bq après un mois d'attente.

Des estimations plus précises obtenues par des simulations effectuées en utilisant le programme FLUKA sont résumées dans le tableau VIII.1.

Tableau VIII.1 - Activité dans l'air en Bq après une perte de faisceau de $4,7 \cdot 10^{14}$ protons à 7 GeV

Temps de décroissance	Total Bq	³ H	⁷ Be	T _{1/2} < 1 jour	T _{1/2} > 1 jour
10mns	$1,10 \times 10^{14}$	$1,63 \times 10^9$	$1,41 \times 10^6$	$1,10 \times 10^{14}$	$4,19 \times 10^{11}$
1 h	$3,10 \times 10^{13}$	$1,63 \times 10^9$	$1,41 \times 10^6$	$3,06 \times 10^{13}$	$4,17 \times 10^{11}$
10 h	$2,08 \times 10^{12}$	$1,63 \times 10^9$	$1,41 \times 10^6$	$1,68 \times 10^{12}$	$4,01 \times 10^{11}$
3 jours	$3,27 \times 10^{11}$	$1,63 \times 10^9$	$1,36 \times 10^6$	$1,05 \times 10^{10}$	$3,15 \times 10^{11}$
30 jours	$1,13 \times 10^{11}$	$1,62 \times 10^9$	$9,58 \times 10^5$	$1,64 \times 10^1$	$1,11 \times 10^{11}$
1 an	$2,57 \times 10^{10}$	$1,54 \times 10^9$	$1,23 \times 10^4$	0,0	$2,42 \times 10^{10}$
10 ans	$2,27 \times 10^9$	$9,28 \times 10^8$	0,0	0,0	$1,35 \times 10^9$
Limite (référence CERN) pour les rejets annuels		$1,00 \times 10^{16}$	$3,00 \times 10^{13}$	$3,80 \times 10^{15}$	$4,00 \times 10^{10}$

Pour ces valeurs, on suppose que **toute** activité produite après une perte totale de faisceaux se retrouve sous forme d'aérosols suspendus dans l'air (évaporation des matériaux). Cette hypothèse pessimiste, et certainement non réaliste, donne une grande surestimation de l'activité dans l'air.

Suite à une perte de faisceaux, on doit s'attendre à un rejet de l'hélium liquide contenu dans deux demi-cellules de la machine (≈ 475 kg) avec environ 10 MBq de tritium.

Actions après une perte totale de faisceau

Après une perte de faisceaux dans le LHC, les actions suivantes sont retenues :

- arrêt immédiat du système de ventilation ;
- attente d'au moins 1 h avant toute intervention ;
- analyse de l'air du tunnel par échantillonnage ;

- examen des filtres d'air à la sortie du système de ventilation ;
- intervention des agents du groupe RP équipés de moyens de protection adéquats (filtres d'air, vêtements de protection, masques autosauveteurs, etc.) pour vérifier s'il y a contamination éventuelle de la zone ;
- le cas échéant, la décontamination de la zone par une firme spécialisée est prévue avant toute intervention technique sur la machine

Doses et débits de dose dans les zones accessibles

Les blindages nécessaires pour la machine et les zones d'expérience sont basés sur les doses et débits de dose limites dans les zones accessibles :

- Zones contrôlées : 50 mSv (perte totale) – 10 μSv/h (fonctionnement)
- Zones supervisées : 2,5 mSv (perte totale) – 1 μSv/h (fonctionnement)
- Zones non réglementées : 0,3 mSv (perte totale) – 0,1 μSv/h (fonctionnement)

Ces valeurs ne doivent être dépassées ni dans le cas de perte totale d'un faisceau ($4,7 \cdot 10^{14}$ protons à 7 TeV), ni durant le fonctionnement de la machine (10^9 interactions p-p /s à 7 + 7 TeV), ni à cause d'une perte du faisceau dans les lignes d'injection ($0,8 \times 10^{12}$ p/s à 450 GeV).

Les doses et débits de dose pour les blindages retenus ont été calculés en utilisant le programme FLUKA. Les résultats de ces calculs sont présentés dans les tableaux VIII.2 à VIII.9. Ils donnent soit l'estimation de la dose suite à une perte de faisceau, soit le débit de dose pour le fonctionnement de la machine dans les différentes zones accessibles du LHC en indiquant également le chemin entre la source et ces zones.

Si les débits de dose sont indiqués dans ces zones, les doses dues à une perte du faisceau sont radiologiquement moins importantes.

Tableau VIII.2 – Doses et débits de dose aux points 1 et 1.8

Zones accessibles	Cheminement des rayonnements	Dose (perte totale)	Estimation Débit de dose (fonctionnement normal)	Classification de la zone
<u>Point 1</u>				
SD1	PM15		< 2 pSv/h	Non réglementée
SX15	PX14		0,5 μSv/h	Supervisée
SX15	PX16		0,2 μSv/h	Supervisée
SDX1	PX15		< 3 pSv/h	Non réglementée
USA15	Blindage principal		3 μSv/h	Contrôlée
USA15	UPX14/UPX16		< 3 nSv/h	Contrôlée
USA15	ULX14/ULX16		< 30 nSv/h	Contrôlée
USA15	TE14/TE16		< 600 nSv/h	Contrôlée
USA15	Passage de câbles		< 1,5 mSv/h	Contrôlée
Fond du PX15	ULX15		< 30 nSv/h	Contrôlée
<u>Point 1.8</u>				
SM18 extérieur blindage	PM18	1,5mSv		Contrôlée
SD18	PM18	< 0,2 mSv		Supervisée

Tableau VIII.3 – Doses et débits de dose au point 2

Zones Accessibles	Cheminement des rayonnements	Estimation		Classification de la zone
		Dose (perte totale)	Débit de dose (fonctionnement normal)	
PGC2 haut	PGC2	0,12 mSv		Non réglementée Supervisée Supervisée Contrôlée
SD2	Cage d'ascenseur	< 1 mSv		
SD2	PM25	0,5 mSv		
PX24	PM24 blindage principal	12 mSv		
SX2	PX24	0,15 mSv		Supervisée

Tableau VIII.4 – Doses et débits de dose au point 3

Zones accessibles	Cheminement des rayonnements	Estimation		Classification de la zone
		Dose (perte totale)	Débit de dose (fonctionnement normal)	
SZ3	PZ31	< 1 μ Sv		Non réglementée
SD3	PM32	< 2 μ Sv		Non réglementée

Tableau VIII.5 – Doses et débits de dose au point 4

Zones accessibles	Cheminement des rayonnements	Estimation		Classification de la zone
		Dose (perte totale)	Débit de dose (fonctionnement normal)	
SD4	PM45	25 μ Sv		Supervisée
SX4	PX46	2,5 μ Sv		Non réglementée
SZ4	PZ45	10 nSv		Non réglementée

Tableau VIII.6 - Doses et débits de dose au point 5

Zones accessibles	Cheminement des rayonnements	Estimation		Classification de la zone
		Dose (perte totale)	Débit de dose (fonctionnement normal)	
SD5	PM56		<10 nSv/h	Non réglementée
SX5	PX56		<0,5 μ Sv/h	Supervisée
SDX5	PM54		<1 nSv/h	Non réglementée
US54	Blindage mobile		<5 μ Sv/h	Contrôlée
US54	UP55		<1 nSv/h	Contrôlée
USC55	Blindage principal		<1 nSv/h	Contrôlée
USC55	UL551		<0,1 μ Sv/h	Contrôlée
USC55	UL552		<0,1 μ Sv/h	Contrôlée
USC55	UL553		<0,1 μ Sv/h	Contrôlée
USC55	UP53		1 μ Sv/h	Contrôlée
USC55	UPX56		<1 nSv/h	Contrôlée
USC55	UP56		<1 nSv/h	Contrôlée
USC55	Passage câbles		<0,1 μ Sv/h	Contrôlée
USC55	Passage tuyaux		1 μ Sv/h	Contrôlée

Tableau VIII.7 - Doses et débits de dose au point 6

Zones accessibles	Cheminement des rayonnements	Estimation		Classification de la zone
		Dose (perte totale)	Débit de dose (fonctionnement normal)	
SD2655	PM65	0,5 μ Sv		Supervisée Non réglementée Non réglementée
SX2685	PX64	50 μ Sv		
SZ2695	PZ65	0,3 μ Sv		

Tableau VIII.8 - Doses et débits de dose au point 7

Zones accessibles	Cheminement des rayonnements	Estimation		Classification de la zone
		Dose (perte totale)	Débit de dose (fonctionnement normal)	
SD2755	PM75	< 0,2 μ Sv		Non réglementée

Tableau VIII.9 - Doses et débits de dose au point 8

Zones accessibles	Cheminement des rayonnements	Estimation		Classification de la zone
		Dose (perte totale)	Débit de dose (fonctionnement normal)	
SD2855	PM85	<2 μ Sv		Supervisée Non réglementée Non réglementée
SX2885	PX84	<0,2 μ Sv		
SZ2895	PZ85	<1 nSv		
UX85P	Blindage principal	5 mSv		Contrôlée
UX85P	Passage d'accès	5 mSv		Contrôlée
UX85P	Passage câbles	<10 mSv		Contrôlée
UX85P	Passage gaines	500 mSv		Inaccessible

Ces résultats montrent que tous les blindages prévus pour les zones accessibles du LHC doivent garantir le respect des limites de dose ou débits de dose.

Mauvais fonctionnement des équipements de sûreté

Les moniteurs qui surveillent les niveaux de rayonnement dans les zones d'expériences accessibles sont munis d'un système d'avertissement de mauvais fonctionnement. Dans le cas très peu probable où aucun des moniteurs ne fonctionnerait en même temps qu'un mauvais fonctionnement de l'accélérateur produirait des pertes près d'une expérience, le blindage prévu évite que l'on atteigne des niveaux de rayonnement limites.

Les systèmes de verrouillage des faisceaux sont fiables : en effet, durant près de 200000 h de fonctionnement des grands accélérateurs du CERN, aucun accident grave dû à un mauvais fonctionnement des systèmes de verrouillage n'a été enregistré.

Pendant le fonctionnement de l'accélérateur, l'accès aux zones souterraines est interdit. Le système de contrôle d'accès prévu en tête des puits (voir chapitre III, paragraphe 3.6) est très fiable, redondant et à sécurité positive.

Pour qu'une personne soit irradiée dans le tunnel, il faudrait que les circonstances suivantes soient réunies dans la procédure de mise en route de l'accélérateur après un accès :

- qu'elle n'ait pas été enregistrée par le système de contrôle d'accès ;
- qu'elle n'ait été repérée et évacuée par la patrouille ;
- qu'elle n'ait pas entendu la sirène d'évacuation ;
- qu'elle n'ait pas forcé une porte pour sortir ou actionné un bouton d'arrêt d'urgence.

Les deux dernières actions empêchent l'injection des faisceaux et sont signalées simultanément à la salle de commande PCR et à la centrale des services de secours où elles déclenchent une alarme de niveau 3, donc une intervention immédiate des services de secours.

Les circonstances mentionnées sont hautement improbables en raison :

- de la fiabilité du système de contrôle d'accès ;
- du parcours imposé à la patrouille pour inspecter la totalité des zones souterraines ;
- du contrôle exercé sur l'accomplissement effectif de ce parcours par la patrouille au moyen d'appareils de pointage judicieusement disposés et en nombre suffisant ;
- des verrouillages d'accès effectués dans des délais requis par l'opérateur du PCR pour qu'aucune personne ne puisse pénétrer dans les zones interdites pendant que la patrouille opère et après son passage.

Références

[Sul 92] A. H. Sullivan, A Guide to Radiation and Radioactivity Levels near High-Energy Particle Accelerators, Nuclear Technology Publishing, Ashford 1992.

[Sul 92] N° 283, IAEA, Vienna (1988)

[Tho 92] R.H. Thomas and G.R. Stevenson, Radiological safety aspects of the operation of proton accelerators, Technical Report Services

2 SURETE DE L'INSTALLATION SUITE A UN INCIDENT NON RADIOLOGIQUE

Incendie en milieu souterrain

Vu la faible quantité de matériaux organiques présents dans le tunnel principal du LHC (essentiellement des câbles peu activés), un incendie majeur est peu probable. Les zones abritant des installations électriques importantes (RA, RE) ainsi que les zones d'expériences sont munies de systèmes de détection de fumée générant une alarme de niveau 3 transmise à la centrale (SCR) du service de secours et du feu. L'intervention des pompiers est immédiate et se déroule suivant une organisation et des consignes permanentes. Tous les travaux par point chaud dans les zones souterraines exigent un permis de feu. Vu les mesures de prévention mises en place avec les systèmes d'extinction automatique installés dans ces zones, un incendie important est peu probable.

Explosion de gaz dans une zone expérimentale

Le second type d'accident non radiologique possible est l'explosion d'un mélange de gaz inflammables dans une zone expérimentale. Une fuite de gaz dans une zone expérimentale est détectée par le système S.D.N. (Système de Détection et de Neutralisation) qui, en plus de détecter,

permet l'injection de gaz inertes dans l'ensemble des détecteurs d'une expérience. La détection d'une fuite provoque automatiquement l'arrêt de l'alimentation en gaz en surface, la mise hors tension des équipements électriques dans l'expérience et déclenche une alarme de niveau 3 pour l'intervention des pompiers.

Par ailleurs, tant qu'une expérience présente ce risque, elle fera l'objet d'une surveillance permanente de la part des membres du groupe de physique concerné.

Toutes ces mesures alliées au fait que la plupart des mélanges de gaz se trouvent hors des limites de l'explosion font qu'un tel accident est extrêmement peu probable.

Rejet d'hélium liquide dans le tunnel

Le rejet d'hélium dans le tunnel après une perte de faisceau ne présente aucun risque pour le personnel ni pour l'environnement (voir paragraphe 1 de ce chapitre).

3 EJECTION ET ARRET DES FAISCEAUX

Un dysfonctionnement du système d'éjection et d'arrêt du faisceau peut avoir comme conséquence la destruction d'une partie de l'accélérateur. La fiabilité de ce système qui a une importance primordiale, est basée sur les principes de conception et les procédures opérationnelles suivantes :

- Utilisation des matériels et composants de la meilleure qualité ;
- Fonctionnement des composants avec une large marge de sécurité, par exemple toujours en dessous de leurs valeurs nominales,
- Redondance des différents sous-systèmes (duplication des commutateurs de puissance, de toutes les lignes de transmission de signaux etc.) ;
- Indépendance totale de l'alimentation électrique générale ;
- Surveillance et contrôle permanents du système. En cas de détection d'une faute dans un des sous-systèmes (déviation d'une valeur préfixée), éjection automatique des faisceaux ;
- Vérification complète du système avant chaque injection de faisceau dans le LHC ;
- Enregistrement et analyse de toutes les données obtenues pendant chaque opération d'éjection ;
- En cas de détection d'une faute, arrêt de l'accélérateur et intervention d'un personnel hautement qualifié.

Afin d'éviter un échauffement instantané excessif et ponctuel du bloc absorbeur en graphite, l'énergie déposée par le faisceau est diluée grâce à un ensemble d'aimants orthogonaux à déflexion rapide. La température maximale ainsi obtenue (dans les conditions ultimes d'énergie et d'intensité du faisceau) est d'environ 1300°C, ce qui est une valeur tout à fait modeste pour le graphite. Une défaillance totale et simultanée des 10 aimants dilueurs (quatre horizontaux et six verticaux) est hautement improbable. La question se pose néanmoins légitimement de savoir ce qu'il adviendrait si le faisceau n'était pas dilué.

Une étude préliminaire réalisée en 1997 ^[1] tend à montrer que les températures et pressions développées dans un tel cas situent le phénomène dans les zones solide et liquide du diagramme de phase du carbone, et non dans sa zone gazeuse. Aucune conséquence grave découlant d'une telle éventualité n'est attendue, car :

- la chaleur latente de fusion du carbone relativement élevée (~9 kJ/g) tend à limiter l'élévation de température du milieu avoisinant ;

- une faible quantité de graphite liquide au centre du bloc n'altère pas sa capacité globale d'absorption et peut même l'améliorer localement ;
- le graphite liquide est confiné à l'intérieur d'une forte épaisseur de graphite solide (<30 cm), lui-même entouré d'une enveloppe épaisse d'aluminium ;
- la couche viscoplastique intermédiaire entre liquide et solide est un excellent amortisseur des contraintes dynamiques engendrées par la brusque déposition d'énergie (86 μ s) ;
- la zone liquéfiée doit se resolidifier rapidement après l'absorption du faisceau réduisant finalement à une altération locale les dommages causés au graphite.

La vérification expérimentale «en vraie grandeur» de ces hypothèses est actuellement impossible. L'effort d'investigation porte sur la validation théorique de leur prémisses communes, c'est à dire la fusion du carbone et non sa vaporisation. Une analyse indépendante va être menée par un consultant spécialisé qui devrait en principe confirmer cette hypothèse

Référence

- [1] J.-M. Zazula, On graphite transformations at high temperature and pressure induced by absorption of the LHC beam, LHC Project Note 78, January 1997.

4 CONCLUSIONS

En tout état de cause et en fonction de l'expérience autour des grands accélérateurs fonctionnant au CERN depuis plus de 40 ans, la probabilité qu'un de ces incidents se produisent est extrêmement faible. Les mesures de prévention mises en place et la surveillance continue de l'installation par des opérateurs qualifiés limiteront les conséquences pour le personnel et n'entraîneront aucun risque pour l'environnement du CERN.