

CERN
ORGANISATION EUROPEENNE POUR LA RECHERCHE NUCLEAIRE
Laboratoire européen pour la Physique des Particules

CERN AC Note (2000-03)

**DESCRIPTION GENERALE
DU PROJET DE FAISCEAU DE NEUTRINOS
DU CERN VERS LE GRAN SASSO
(CNGS)**

Geneva
2000

Date de publication: mai 2000

Editeur: K. Elsener

Auteurs: M. Buhler-Broglin, K. Elsener, L.A. Lopez Hernandez, G.R. Stevenson,
M. Wilhelmsson

Préparation de copie: D. Lajust, H.H. Vincke

Illustrations: J.-L. Caron
(Les figures 3 et 4 sont publiées avec l'accord du Laboratoire National du Gran Sasso)

Table des matières

	Page
1. Les fondements scientifiques du projet CNGS	5
1.1 Le CERN et la physique des neutrinos	5
1.2 Le laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie)	7
1.3 CNGS – un faisceau de neutrinos de longue portée	10
2 Description du projet CNGS	13
2.1 Les données de base du projet CNGS	13
2.2 Les principaux éléments du projet CNGS	13
2.3 Coût et planning	17
3. Ouvrages à réaliser	19
3.1 Le puits d'accès temporaire	19
3.2 La galerie d'accès	19
3.3 Le tunnel du faisceau de protons	19
3.4 La chambre des cibles et ses annexes	22
3.5 Le tunnel de désintégration	22
3.6 La chambre d'arrêt des hadrons et ses galeries de connexion avec le LEP/LHC	23
3.7 La deuxième chambre de détection de muons	23
4. La conduite des travaux de génie civil	25
4.1 Généralités	25
4.2 Coordination de la sécurité	25
4.3 Horaires de travail	25
4.4 Contraintes géologiques	25
4.5 Emploi des explosifs	26
4.6 Techniques de réalisation	26
4.7 Installations de chantier	27
5. Le CNGS et l'environnement	29
5.1 Déblais	29
5.2 Déchets	29
5.3 Effets sur les ressources en eau	30
5.4 Le bruit et les ébranlements liés aux chantiers	30
5.5 Transport, circulation et voirie	31
5.6 Aspects fonciers	31
5.7 Aspects radiologiques	31
5.8 Sécurité	32
5.9 Aspects socio-économiques	32
Liste des illustrations	33

1. Les fondements scientifiques du projet CNGS

1.1 Le CERN et la physique des neutrinos

Le CERN a pour mission d'étudier la structure ultime de la matière. Son domaine d'activité est la physique des hautes énergies, dite aussi physique des particules élémentaires.

Concrètement, le CERN conçoit, construit et fait fonctionner des accélérateurs de particules à hautes énergies ainsi que des détecteurs, qui sont les grands instruments scientifiques d'observation des particules nécessaires aux travaux de recherche. Ensemble avec des milliers de scientifiques dans le monde entier, qui poursuivent les études sur la composition sub-microscopique de la matière et sur les forces fondamentales, le CERN a beaucoup contribué à développer ce qu'on appelle le modèle standard (voir Figure 1).

Le modèle standard explique d'abord la composition de la matière ordinaire, donc des atomes et de leurs constituants: l'électron, une particule fondamentale, le proton et le neutron, tous deux composés de trois particules élémentaires, appelés quarks. De plus, le modèle standard contient tous les ingrédients nécessaires pour expliquer, d'une part, les particules découvertes dans les rayons cosmiques énergétiques, d'autre part, les particules produites par les accélérateurs, qui sont aussi celles présentes dans l'univers pendant les premières minutes après la naissance de l'univers, le « big bang ».

Parmi les particules subatomiques, les neutrinos sont les plus difficiles à étudier. Les neutrinos sont produits par la désintégration d'autres particules, par exemple des neutrons dans un noyau radioactif:



Ils sont neutres (pas de charge électrique) et leur probabilité d'interaction avec la matière est extrêmement faible. Ceci est bien illustré par le fait que chaque homme sur terre est traversé chaque seconde par la quantité énorme de 400'000 milliards de neutrinos provenant du soleil. Les neutrinos traversent notre planète avec une très faible probabilité d'interaction avec la matière, ce qui démontre en même temps leur innocuité et la difficulté de les intercepter dans une expérience de physique.

La difficulté de détecter les neutrinos explique, en partie, le mystère qui les entoure toujours en physique des particules. A présent, il est établi que les neutrinos ont soit une très petite masse, soit pas de masse du tout. Distinguer ces deux possibilités relève d'une importance capitale pour le modèle standard, mais aussi pour notre compréhension de l'évolution de l'univers. On sait que notre univers contient, en moyenne, environ 330 millions de neutrinos par mètre cube, mais seulement 0,5 proton par mètre cube. Si les neutrinos ont une masse, ils constitueront donc une partie de la « matière noire » des galaxies. L'univers pourrait ainsi avoir une gravité suffisante pour qu'un jour il arrête son expansion, puis se rétracte.

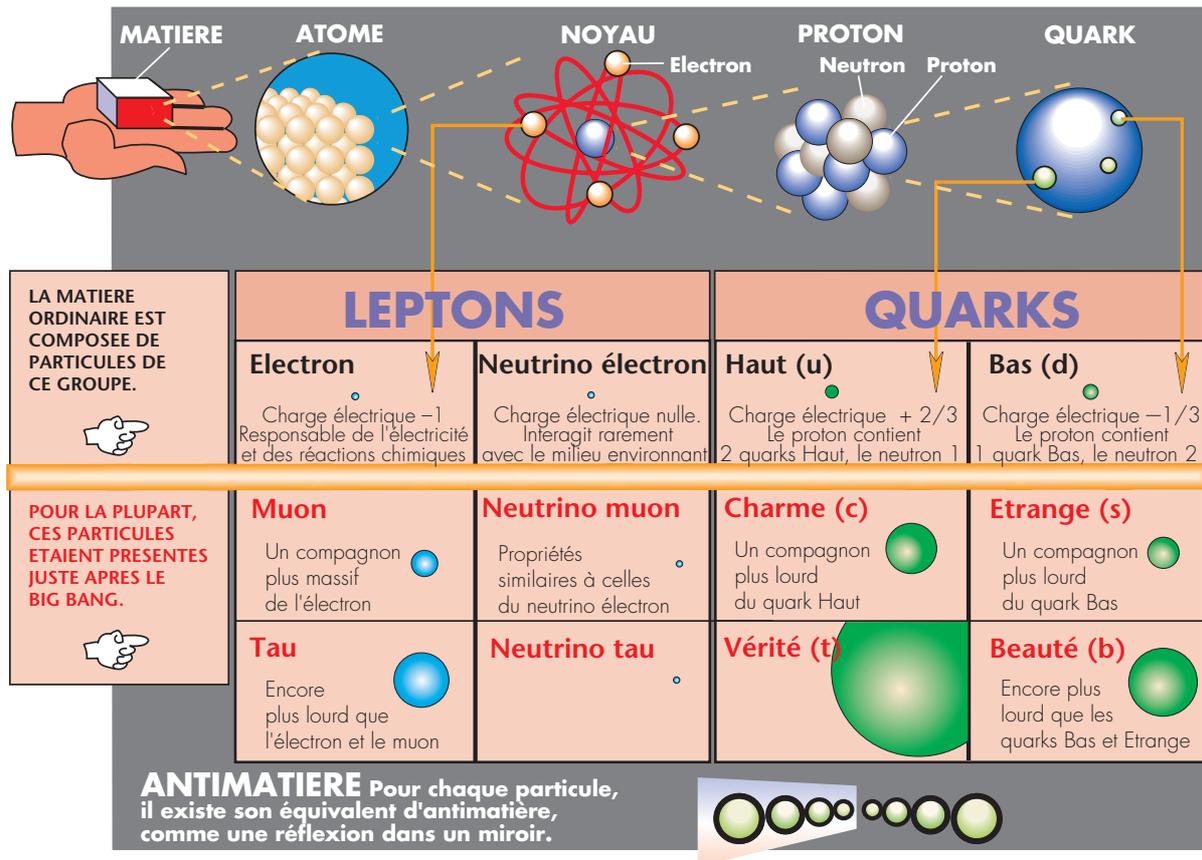
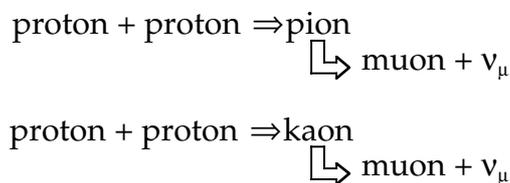


Figure 1: Le modèle standard

Les neutrinos se répartissent en trois familles, appelées ν_e , ν_μ et ν_τ , indiquant qu'ils sont associés à trois types de particules chargées: électron (e), muon (μ) et tau (τ) (voir Figure 1). Dans l'hypothèse de neutrinos avec une petite masse, il est concevable que les trois types de neutrinos soient en quelque sorte « mélangés » (voir Figure 2)); par exemple, qu'un neutrino du type ν_μ ait une possibilité de se transformer en neutrino du type ν_τ . Ce phénomène est appelé "oscillation neutrinos".

Les neutrinos ν_e proviennent du soleil et d'autres sources naturelles. La deuxième famille de neutrinos, les ν_μ , sont produits par exemple dans la désintégration des particules résultant de la collision de deux protons:



Ces collisions entre protons peuvent se produire aussi bien dans l'atmosphère terrestre (les protons font partie des rayons cosmiques) que dans les accélérateurs de particules. Les pions et les kaons produits sont des particules du groupe dit "mésons". Le pion est composé d'un quark u et d'un antiquark \bar{d} , le kaon contient lui aussi un quark u, accompagné d'un partenaire plus lourd, un antiquark \bar{s} .

Le premier faisceau de neutrinos au CERN a été construit au début des années 1960. En 1973, la chambre à bulles "Gargamelle" dans le faisceau de neutrinos au PS¹ a permis au CERN de faire l'une des plus importantes découvertes, appelée « l'interaction à courant neutre »: les neutrinos peuvent interagir avec une autre particule tout en restant des neutrinos.

A ce jour, toutes ces expériences de neutrinos étaient limitées au périmètre du site de Meyrin du CERN, donc à des distances relativement petites. Or, une découverte récente au Japon indique qu'une transformation du « caractère » des neutrinos - une oscillation entre deux types de neutrinos - pourrait se produire si on permettait à ces particules un temps de vol (donc une trajectoire) suffisamment long. Pour confirmer qu'il s'agit réellement d'une oscillation de neutrinos et approfondir les nouveaux résultats, il s'agit donc de relier, pour la première fois, un faisceau de particules (des neutrinos) du CERN à des détecteurs situés loin de ce dernier.

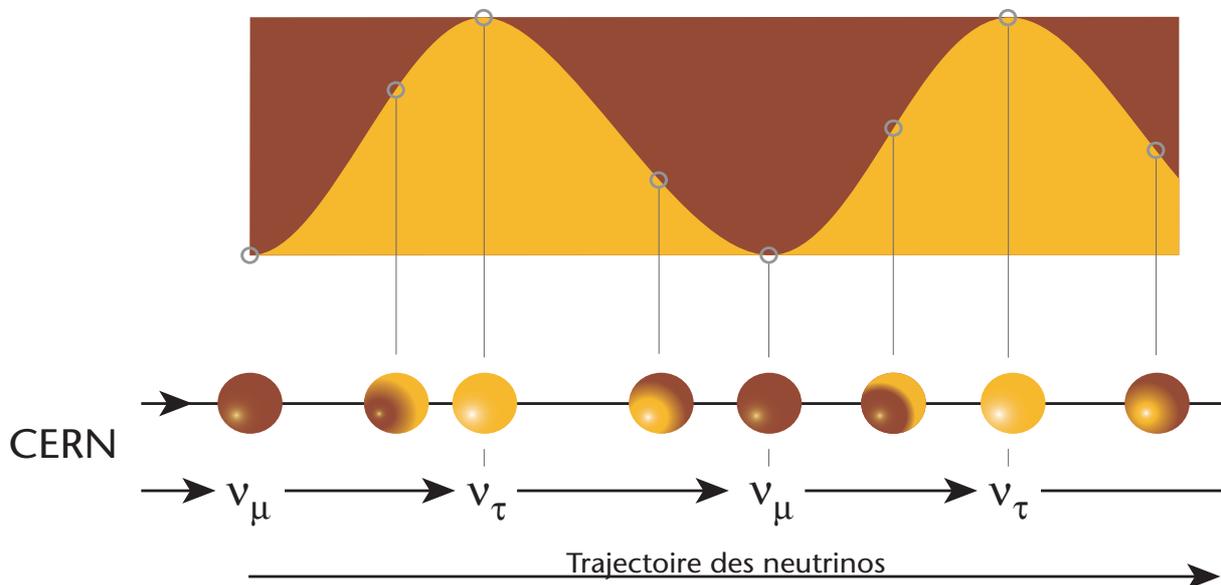


Figure 2: Illustration des oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (un faisceau pur de ν_μ est produit au CERN en direction du Gran Sasso)

1.2 Le laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie)

Construit au début des années 1980, le laboratoire souterrain du Gran Sasso (LNGS), situé à 120 kilomètres de Rome, fait partie des installations de l'INFN, l'institut italien pour la recherche en physique des particules et en physique nucléaire. Dans ce laboratoire, une série impressionnante d'expériences de physique fondamentale a déjà été effectuée. Les expériences avec des neutrinos ont déjà une place importante dans le programme de la recherche du LNGS: par exemple, les neutrinos produits par des rayons cosmiques dans l'atmosphère ont été étudiés (voir Figure 3). Protégées des muons liés aux rayons cosmiques par 1400 mètres de rocher, les trois grandes cavernes (voir Figure 4) de ce laboratoire se prêtent d'une manière idéale à des expériences cherchant des signaux faibles provenant du passage d'une particule rare. Dans la phase de conception du LNGS, en 1979 déjà, les cavernes ont été orientées vers Genève en vue d'une possible expérience avec un faisceau de

¹ PS, "synchrotron à protons", accélérateur construit au CERN en 1959, avec une énergie des protons de 28 GeV; c'était à l'époque l'accélérateur le plus puissant. Aujourd'hui encore, il sert de pré-accélérateur pour le SPS ("Super Proton Synchrotron").

neutrinos de longue portée. Aujourd'hui, une partie des trois halls souterrains du LNGS est prête pour recevoir des nouvelles expériences, conçues pour détecter et identifier les neutrinos produits au CERN en direction du LNGS, à une distance de 732 kilomètres.

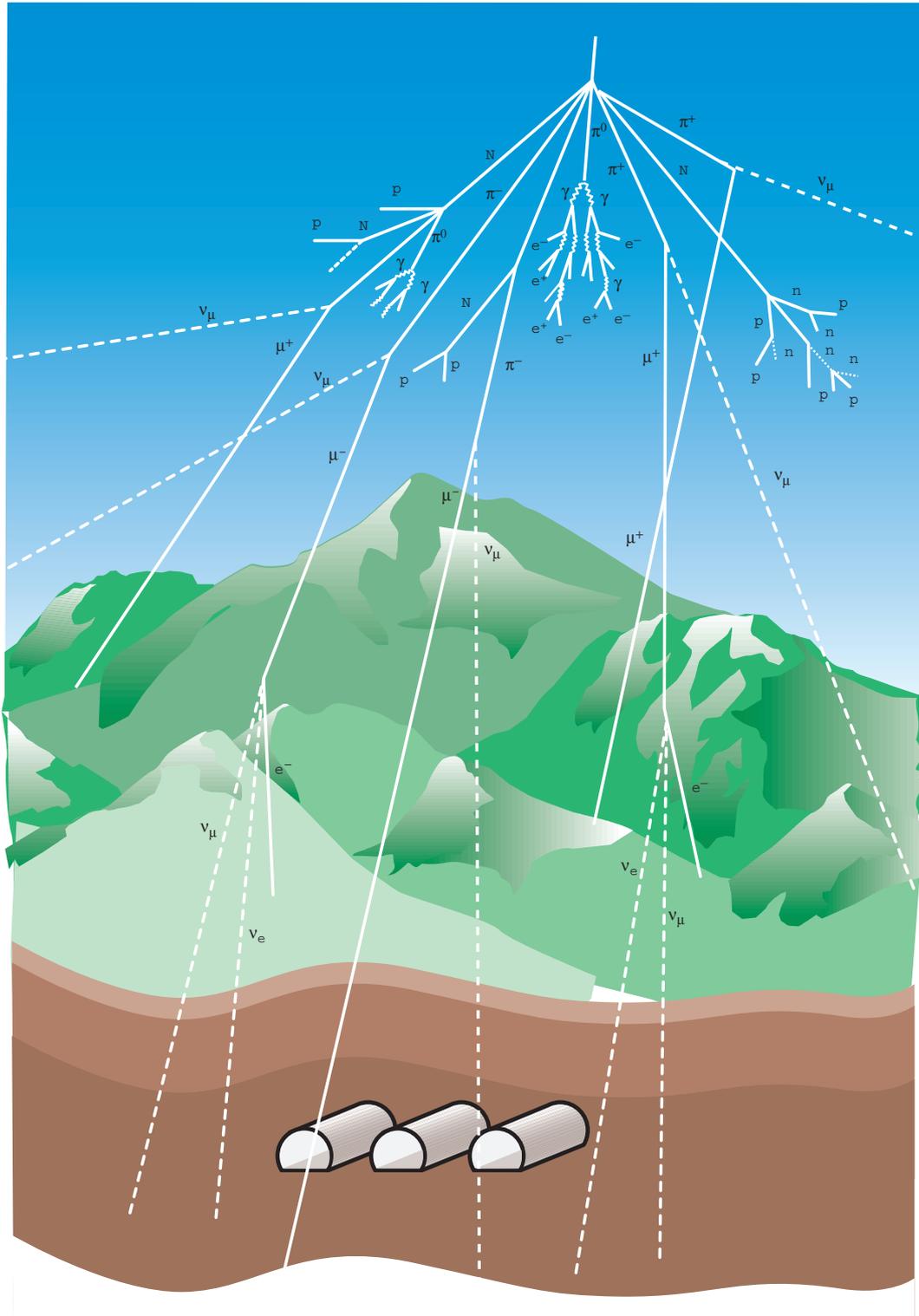


Figure 3: Vue schématique d'une interaction de rayons cosmiques donnant des neutrinos détectés au laboratoire souterrain du Gran Sasso



Figure 4: L'intérieur d'une salle souterraine au Gran Sasso

1.3 CNGS - un faisceau de neutrinos de longue portée

Le projet CNGS, qui a déjà été évoqué dans l'Etude d'Impact du LHC (page 57), consiste à produire au CERN un faisceau de neutrinos (essentiellement de type ν_μ) dirigé vers le laboratoire du Gran Sasso. Un tel faisceau est généré à partir de collisions de protons avec les protons et neutrons dans une cible de graphite, en focalisant les particules produites (surtout les pions et les kaons) dans la direction désirée. La désintégration de ces particules, dans un tunnel sous vide d'environ un kilomètre de long, donne lieu au faisceau de neutrinos. Du fait de leur très faible probabilité d'interaction, la plus grande partie de ces neutrinos traversera la terre sans autre pour arriver au Gran Sasso.

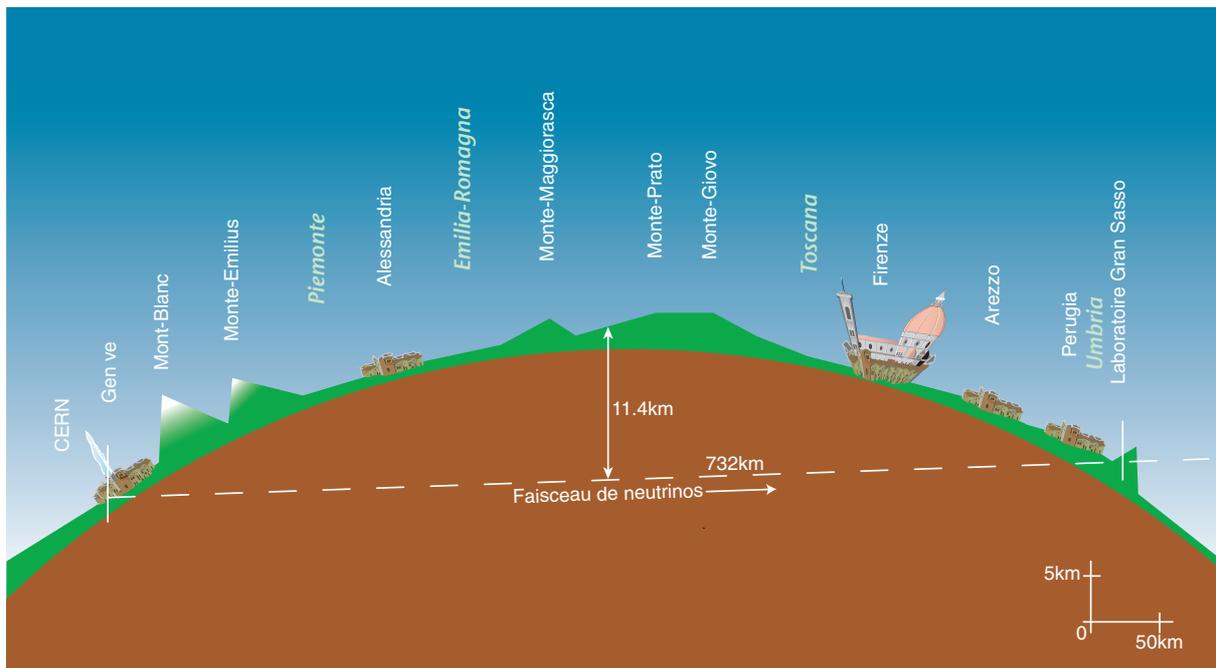


Figure 5: Parcours des neutrinos à travers la croûte terrestre entre le CERN et le laboratoire du Gran Sasso

Les pions et les kaons, comme les muons, sont des particules d'une durée de vie très courte, contrairement aux protons et aux électrons qui sont des constituants stables de la matière qui nous entoure. La désintégration en vol des pions et des kaons a lieu à des énergies élevées. Les produits de cette désintégration, muons et neutrinos, continuent de manière générale leur voyage dans la même direction que leurs "parents", pions ou kaons. Pour diriger les neutrinos dans la direction du Gran Sasso, il suffit donc de focaliser les pions et les kaons dans cette direction. La figure 6 montre l'implantation du projet.

Les calculs montrent qu'au Gran Sasso, à 732 km du CERN, le faisceau de neutrinos a un diamètre de deux kilomètres environ.

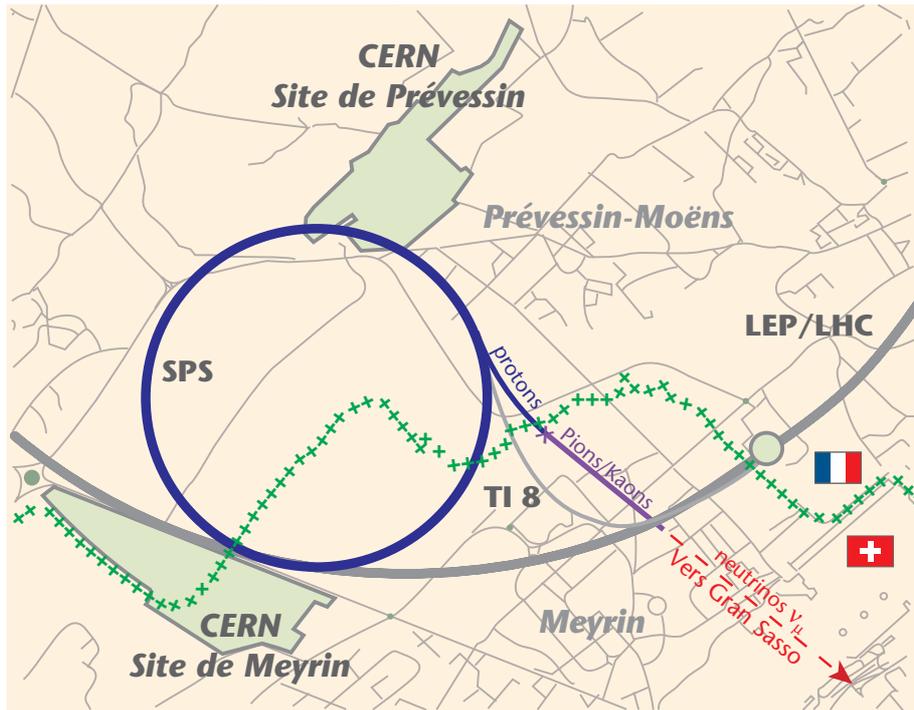


Figure 6: Implantation du projet CNGS au CERN

Il est proposé d'installer deux grands détecteurs² au Gran Sasso. Pour augmenter la probabilité d'intercepter un neutrino, la masse de ces détecteurs sera aussi grande que possible, soit plusieurs milliers de tonnes pour chacun. En utilisant des technologies très différentes, les chercheurs des deux collaborations internationales espèrent pouvoir signaler l'arrivée d'un neutrino du type ν_τ , produit d'une oscillation tant recherchée, ce qui indiquerait que les neutrinos ont une petite masse.

² Les détecteurs au laboratoire du Gran Sasso, aussi indispensables qu'ils soient pour la découverte des oscillations des neutrinos, ne font pas partie du projet CNGS au CERN - ils ne sont donc pas décrits en détail dans ce document.

2. Description du projet CNGS

2.1 Les données de base du projet CNGS

Le but du projet CNGS est de fournir un faisceau intense de neutrinos dans la direction du laboratoire du Gran Sasso, en utilisant au maximum l'infrastructure existante du CERN. Pour prouver l'existence d'une oscillation de neutrinos, il est important que le faisceau produit au CERN ne contienne que des neutrinos d'un seul type, dans le cas du projet CNGS du type ν_μ . L'énergie des neutrinos produits est choisie de sorte que la détection au Gran Sasso des neutrinos "transformés" par oscillation en ν_τ soit possible dans les meilleures conditions. Actuellement, il est prévu de fournir des neutrinos ν_μ d'une énergie comprise entre 5 et 30 GeV³.

La méthode la plus courante pour produire des faisceaux de neutrinos ν_μ comporte six étapes principales (voir Figure 7):

- produire des protons de haute énergie;
- transporter ces protons vers une cible;
- faire entrer en collision des protons avec les noyaux atomiques de la cible, production du faisceau secondaire, entre autres des pions et kaons;
- guider les pions et les kaons par un système de cornes magnétiques en direction des expériences (dans le cas du CNGS, en direction du Gran Sasso);
- permettre la désintégration naturelle des pions et kaons en vol dans un tank à vide; les produits sont, dans la plupart des cas, un muon et un neutrino ν_μ , et la direction du trajet des neutrinos est très proche de celle des particules parents, les pions et kaons;
- amener le faisceau vers un bloc arrêt de faisceau, qui permet d'absorber toutes les particules sauf les neutrinos et une partie des muons. Les neutrinos étant les uniques particules présentant une probabilité très faible d'interaction, ils continueront seuls leur trajet vers le Gran Sasso. Le reste des muons sera complètement absorbé après un kilomètre par la croûte terrestre.

Toutes les installations pour la production du faisceau de neutrinos se situent dans des tunnels et galeries techniques souterrains qui sont décrits au chapitre 3. Aucun bâtiment de surface n'est nécessaire pour la réalisation du projet CNGS. Une présentation technique détaillée du projet est donnée dans le rapport de conception technique ("The CERN Neutrino Beam to Gran Sasso, Conceptual Technical Design", ref. CERN 98-02 - INFN/AE-98/05) et son Addendum (ref. CERN-SL/99-034(DI) – INFN/AE-99/05).

2.2. Les principaux éléments du projet CNGS

2.2.1. Le faisceau de protons

Tous les accélérateurs de protons existants du CERN jouent un rôle dans la production du faisceau CNGS (voir Figure 8): le Linac fournit des protons de 50 MeV

³ L'énergie des particules est souvent exprimée en électronvolts (eV). Un électronvolt équivaut à l'énergie acquise par un électron accéléré sous une tension de un volt. 1 GeV signifie un giga-électronvolt, donc un milliard d'électronvolts.

au Booster, celui-ci les accélère à 1,4 GeV avant leur transfert au PS. Dans le PS, les protons atteignent l'énergie de 14 GeV, puis sont éjectés et transférés au SPS⁴. Dans le SPS (super-proton-synchrotron), les protons sont accélérés à leur énergie finale de 400 GeV, éjectés et transportés dans une ligne de transfert (TN4, à construire) vers la cible CNGS. Le point d'éjection des protons du SPS est situé dans la molasse, à 60 mètres sous les bâtiments existants de la zone BA4; toutes les installations du projet CNGS restent souterraines à partir de là.

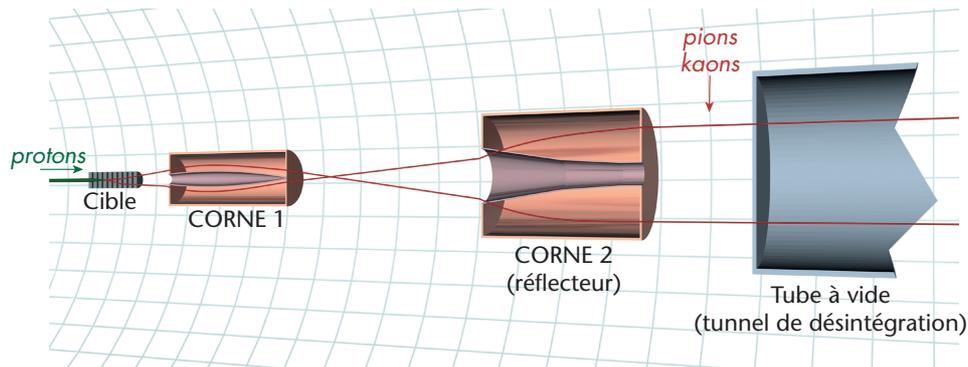


Figure 7: La production de pions et kaons (parents des neutrinos), focalisés dans la direction du Gran Sasso par deux cornes magnétiques

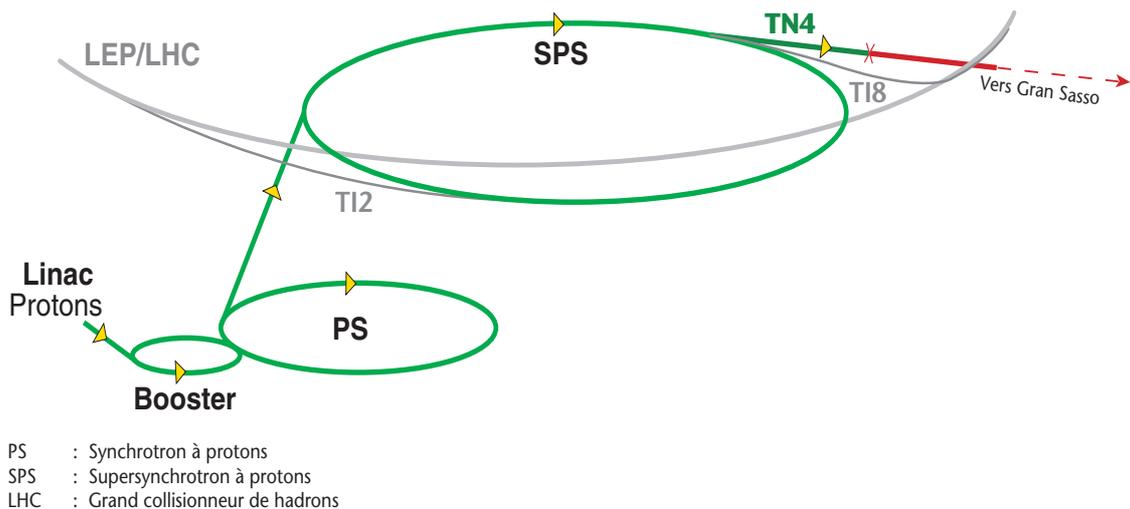


Figure 8: Les accélérateurs de protons du CERN utilisés pour le CNGS

⁴ La même chaîne d'accélérateurs sert d'injecteur de protons pour le futur collisionneur LHC, en construction dans le tunnel du LEP au CERN.



Figure 9: Dipôles (rouges) et quadrupôles (bleus) dans le tunnel du SPS

La ligne de transfert TN4 sert à modifier l'orientation du faisceau de protons afin qu'avant son arrivée sur la cible, il vise déjà le Gran Sasso. Ceci implique de dévier les protons de 33 degrés dans le plan horizontal et de 3,2 degrés dans le plan vertical. La longueur totale du faisceau de protons est de 825 mètres.

Pour équiper la ligne TN4, il faut 73 dipôles (aimants de déflexion) et 28 quadrupôles (aimants de focalisation), tous des aimants du même type que ceux utilisés au SPS (voir Figure 9). Ces éléments ne sont activés que pendant un temps très court, au moment du transfert des protons vers la cible CNGS, soit toutes les six secondes ou plus ; leur consommation électrique est donc faible. Le système d'alimentation électrique de la ligne TN4 est le même que celui de la ligne de transfert TI8, actuellement en construction, qui reliera le SPS au LHC.

2.2.2 La cible et le faisceau secondaire

La cible du projet CNGS consiste en une série de petits cylindres en graphite. Les dimensions de la cible ont été choisies pour donner un taux maximal de particules secondaires. De plus, les cylindres en graphite doivent absorber la chaleur élevée et le choc thermomécanique dus au dépôt d'énergie par le faisceau de protons. La cible doit donc être refroidie avec un jet de gaz hélium à haute pression en circuit fermé (l'hélium est un gaz inerte de faible densité).

Les particules produites dans la cible entrent ensuite dans un système de "cornes" magnétiques (voir Figure 7). Ce système focalise les particules positives d'une énergie moyenne de 35 GeV et défocalise les particules négatives.

Pour le projet CNGS, l'intérêt est de focaliser le mieux possible les pions et kaons, parents des neutrinos. La première corne a pour effet de trop dévier des particules d'une énergie inférieure à 35 GeV, mais aussi de ne pas dévier suffisamment celles d'une énergie supérieure à 35 GeV. Pour corriger ceci, une deuxième corne, dite réflecteur, est installée à quelque 40 mètres de la première. L'effet combiné de focalisation des deux lentilles permet d'optimiser le taux de neutrinos vers le Gran Sasso.

2.2.3 Le tunnel de désintégration

Les pions et kaons, par nature, ne sont pas des particules stables. Par exemple, tous les 300 mètres, quelque 15 % des pions de 35 GeV se désintègrent. Plus l'énergie des pions est élevée, plus la distance moyenne de désintégration est longue. Dans plus de 99 % des cas, la désintégration des pions produit un neutrino ν_μ et un muon.

Pour éliminer toute perte de pions et de kaons par interaction avec des molécules d'air, un tunnel de désintégration sous vide est prévu dans le projet CNGS. Ce tunnel contient un tube en acier, semblable à une grosse conduite d'eau ou à un oléoduc. Le tube, d'une longueur d'un kilomètre et un diamètre de 2,45 mètres, est scellé dans la roche. Ces dimensions résultent d'un compromis entre le coût du tunnel et le taux de neutrinos présents dans le faisceau CNGS. Une simple pompe à vide permet, en une semaine, d'extraire plus de 99% de l'air de ce tube.

2.2.4 Le système d'arrêt de faisceau

Situé à la sortie du tunnel de désintégration, l'arrêt de faisceau a pour but de stopper toutes les particules non absorbées dans la cible et autres matériaux du CNGS ainsi que tous les pions et kaons qui ne se sont pas désintégrés avant d'arriver jusque là.

La quantité et l'énergie des particules à absorber étant relativement élevée, la construction de cet arrêt de faisceau (3 mètres de graphite d'abord, 15 mètres de fer ensuite) doit permettre une bonne répartition de la chaleur. De plus, un système de refroidissement à eau en circuit fermé est prévu.

Outre les neutrinos, un autre groupe de particules - les muons - est difficilement absorbé dans un arrêt de faisceau: ce sont des particules qui ne subissent pas l'interaction nucléaire forte et ne réagissent que rarement avec les noyaux atomiques. Ces muons seront donc absorbés plus loin, dans la molasse (rocher) en aval de l'arrêt de faisceau proprement dit. Au bout d'un kilomètre, tous les muons se seront transformés en électrons et en neutrinos.

2.2.5 Les stations de détection des muons

Ces muons étant des produits "frères" des neutrinos ayant les mêmes « parents » (pions et kaons), la manière la plus pratique de contrôler la position, l'angle et l'intensité du faisceau de neutrinos est de mesurer la trajectoire des muons. Pour ceci, deux stations de détection sont prévues dans le projet CNGS: une première directement après l'arrêt du faisceau, une deuxième, séparée de la première par

67 mètres de molasse. Cet ensemble de détecteurs permet de mesurer les paramètres importants du faisceau de muons donc indirectement aussi du faisceau de neutrinos vers le Gran Sasso.

2.3 Coût et planning

2.3.1 Coût du projet

L'estimation du coût du projet CNGS est basée sur l'expérience des ingénieurs du CERN dans le domaine du génie civil souterrains, dans le domaine des accélérateurs et des lignes de faisceaux et, plus particulièrement, dans la construction des équipements nécessaires pour un faisceau de neutrinos performant.

Traditionnellement, la construction d'un nouveau faisceau comme celui du projet CNGS était entièrement à la charge du CERN. Les contraintes budgétaires du CERN dues au grand projet de collisionneur, le LHC, sont telles que la réalisation du projet CNGS n'est devenue possible que grâce aux contributions spéciales de plusieurs Etats membres du CERN. L'Italie, en premier lieu, a toujours été favorable car ce nouveau projet lie le laboratoire du Gran Sasso de façon unique à un laboratoire d'accélérateurs, le CERN. Ce pays a donc proposé de contribuer à hauteur de 48,6 MCHF au projet CNGS. La France, l'Allemagne, la Belgique et l'Espagne contribuent aussi au projet CNGS.

	MCHF	MF
Génie civil (conception, ouvrages, tube en acier, consultants):		
• en France	15	62
• en Suisse	26.6	108
Equipements (faisceau protons, cible, faisceau secondaire, arrêt de faisceau, détecteurs de muons)	19.6	80
Infrastructure (refroidissement, ventilation, électricité, système de sécurité, etc.)	9.8	40
Total	71.0	290

2.3.2 Planning général prévisionnel

Du point de vue du planning, le projet CNGS est étroitement lié au projet LHC. Il utilise en effet la même extraction de protons du SPS et donc les mêmes premiers 100 mètres environ de la ligne de transfert de protons; les mêmes puits d'accès au SPS et au LHC seront également utilisés pendant l'installation des équipements. Le planning présenté ci-dessous est susceptible de subir des modifications à cause, entre autres, d'éventuelles interférences avec celui du Projet LHC.

Le planning général consiste en trois phases principales: (1) le génie civil, (2) l'installation de l'arrêt de faisceau et du tube à vide ainsi que des services généraux, et (3) l'installation des équipements pour le faisceau de protons, la cible et les cornes magnétiques.

Au moment de la rédaction du présent document, les préparatifs pour l'appel d'offres des travaux de génie civil sont pratiquement terminés. Le CERN espère pouvoir commencer ces travaux au cours de l'été 2000 à côté du point BA4 du SPS. Les travaux de génie civil devraient durer environ 32 mois.

L'installation des équipements de l'arrêt de faisceau est prévue pour le premier semestre de l'an 2003. L'installation du tube à vide dans le tunnel de désintégration durera jusqu'au début 2004. Les services généraux d'infrastructure devraient suivre durant le premier semestre 2004. L'installation des équipements dans le tunnel de transfert des protons pourra se faire en parallèle avec l'installation des équipements dans la zone cible/cornes. La mise en route du faisceau est prévue pour le printemps 2005. Le premier faisceau de neutrinos devrait être envoyé vers les détecteurs du Gran Sasso peu après.

3. Ouvrages à réaliser

Le projet CNGS ne comporte que des ouvrages souterrains. Sur l'ensemble des ouvrages à construire, 1000 m de tunnels et le puits d'accès temporaire sont réalisés en territoire français, le reste des ouvrages est situé sous le territoire Suisse (voir Figure 10 et Figure 11):

Ouvrages	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume excavé (m ³)	Volume de béton à couler (m ³)
Puits d'accès temporaire	8.0		57.0	3400	450
Galerie d'accès	769.0	3.1		8100	2250
Tunnel du faisceau de protons	590.0	3.1		6300	2300
Chambre des cibles et ses annexes					
<i>Chambre des cibles</i>	115.0	6.5		5500	2060
<i>Galerie de services</i>	148.0	3.4		2100	900
<i>Structures annexes</i>				2700	1100
Tunnel de désintégration	992.0	3.1		11150	1550
Chambre d'arrêt des hadrons	26.0	6.0		1100	250
Galerie de connexion avec le tunnel LEP/LHC	355.0	3.1		3950	1250
Deuxième chambre de détection des muons	3.5	6.0		200	90
Total				44500	12200

3.1 Le puits d'accès temporaire

Ce puits est nécessaire pour pouvoir effectuer les travaux de génie civil sans interférer avec ceux du LHC. Le puits d'accès à l'ensemble des ouvrages du projet, d'un diamètre de 8 m et d'une profondeur de 57 m, est situé à 130 m de la caverne existante ECA 4. Il s'agit d'un ouvrage à usage provisoire. Ses parois seront seulement protégées par du béton projeté. Une fois le projet terminé, ce puits sera obturé en surface par une dalle en béton armé recouverte de terre végétale de façon à rétablir l'environnement dans son état initial.

3.2 La galerie d'accès

Ce tunnel relie la caverne existante ECA4 à la chambre des cibles. Elle permet d'acheminer matériel et personnel depuis les installations du point BA4 de l'accélérateur SPS. Sa longueur est de 769 m et son diamètre intérieur de 3,10 m. Les parois et les voûtes seront réalisées en béton projeté. La pente générale de l'ouvrage est de 2,20 %.

3.3 Le tunnel du faisceau de protons

Ce tunnel relie la caverne existante TJ8 au tunnel de jonction : premier ouvrage de la chambre des cibles. Sa longueur est de 590 m et son diamètre intérieur de 3,10 m. Les parois et les voûtes seront réalisées en béton coffré. La pente générale est de 3,5%.



Figure 10: Plan de situation des ouvrages du projet CNGS

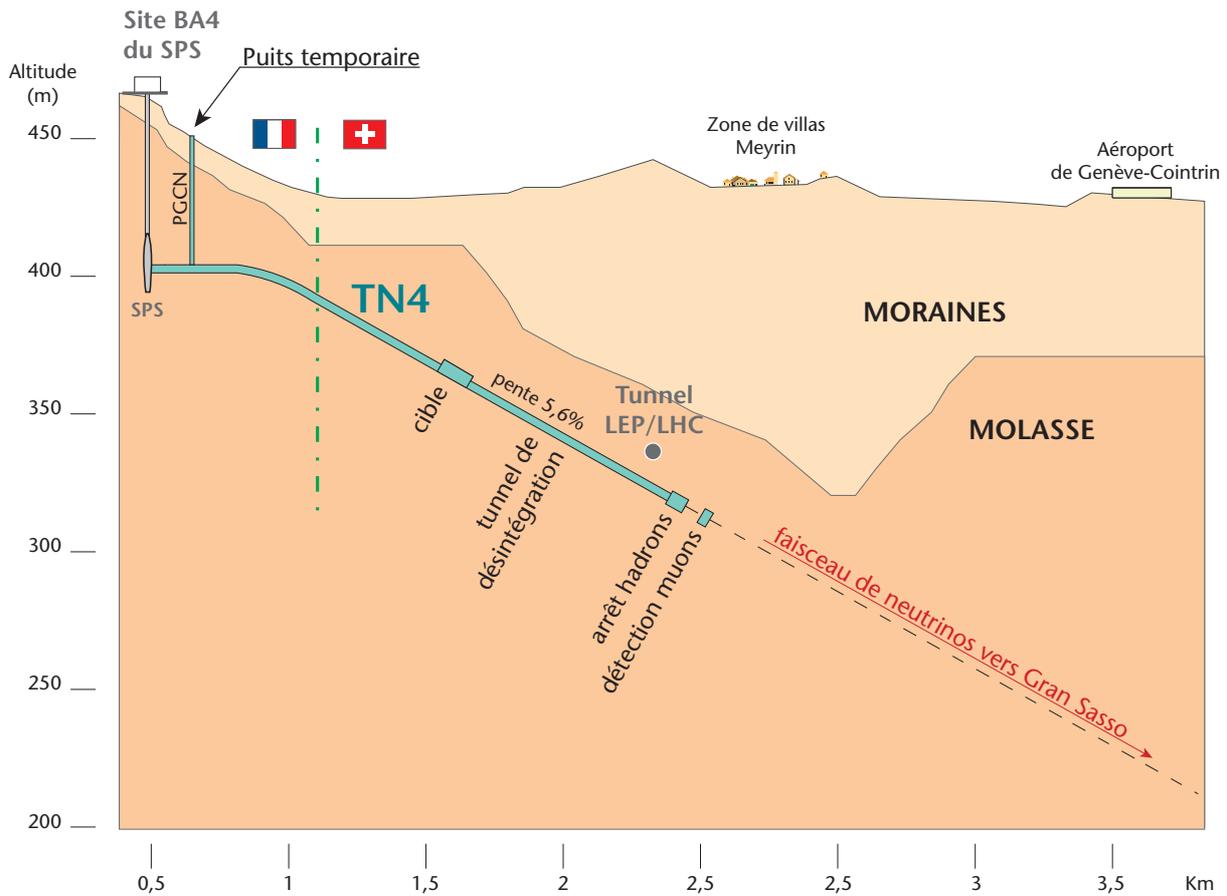


Figure 11: Coupe verticale des ouvrages du projet CNGS

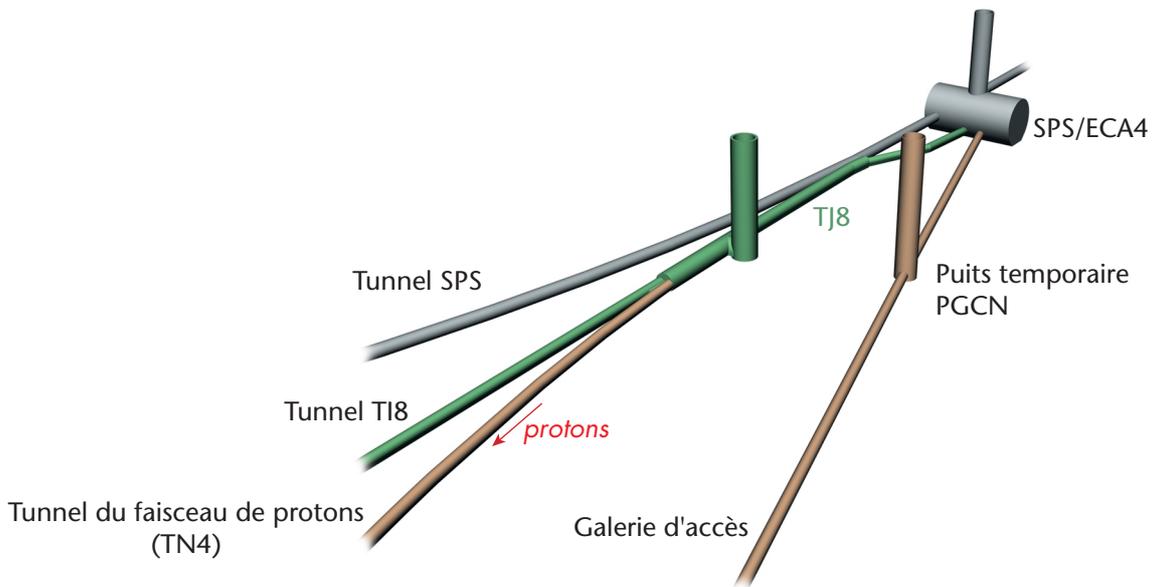


Figure 12: Vue virtuelle des ouvrages souterrains près du point BA4 du SPS. Le tunnel TI8, en construction connecte le SPS au LHC.

3.4 La chambre des cibles et ses annexes

La chambre des cibles est un ouvrage cylindrique d'une longueur de 115 m pour un diamètre de 6,50 m. Elle est élargie à un diamètre de 8,50 m, sur une longueur de 15 m, et reliée au tunnel du faisceau de protons par un tunnel de jonction de 8 m de long et de 9 m de diamètre. Le raccordement de la galerie d'accès au tunnel du faisceau de protons utilise le même ouvrage.

Parallèlement à la chambre des cibles, une galerie de service d'une longueur totale de 148 m pour un diamètre de 3,40 m a été prévue. La chambre et la galerie de service sont reliées entre elles par six galeries transversales de 1,80 m de diamètre pour permettre le passage des personnes et des dispositifs d'alimentation.

Les parois et voûtes de ces ouvrages sont réalisées en béton coffré à l'exception de celles de la galerie de service qui sont en béton projeté.

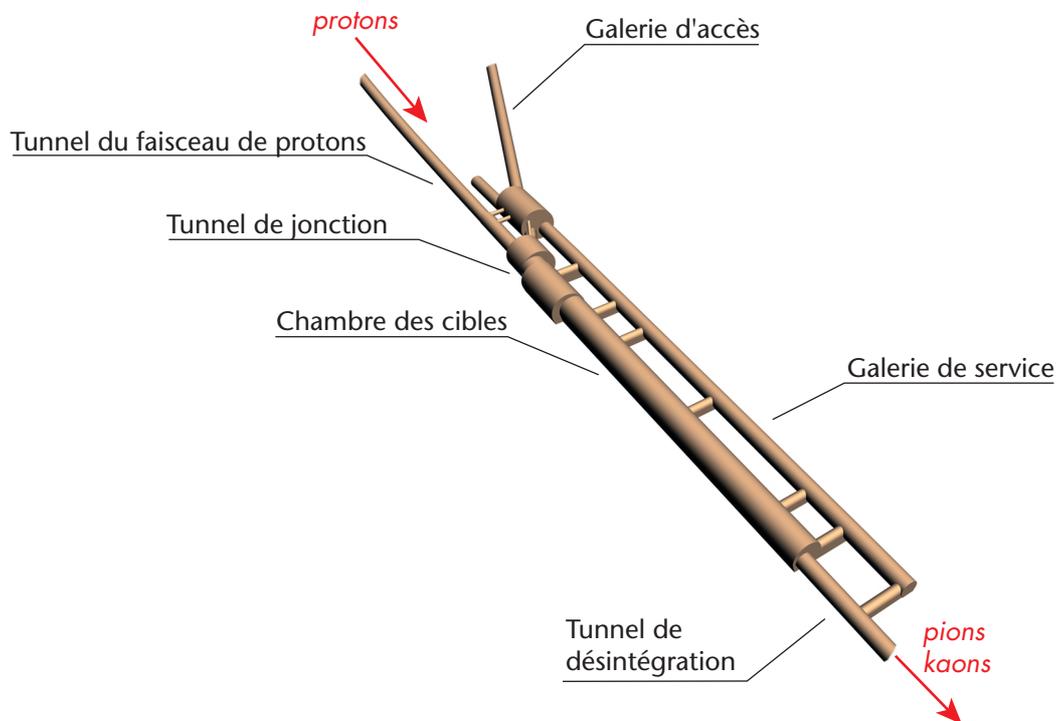


Figure 13: La chambre des cibles et ses annexes

3.5 Le tunnel de désintégration

Le tunnel de désintégration est rectiligne et se situe entre l'extrémité aval de la chambre des cibles et celle amont de l'arrêt des hadrons. Sa longueur est de 992 m pour un diamètre intérieur de 3,10 m. Un tube en acier d'un diamètre intérieur de 2,45 m y sera logé. Réalisé à partir d'éléments de 6 m de long soudés sur place, il sera mis sous vide par un système de pompage. L'espace entre le tube en acier et le tunnel sera rempli de béton. Cette structure ne permet pas le passage des personnes et des équipements entre la chambre des cibles et la chambre d'arrêt des hadrons.

3.6 La chambre d'arrêt des hadrons et ses galeries de connexion avec le LEP/LHC

La longueur totale de la chambre d'arrêt des hadrons est de 26 m pour un diamètre de 6 m. Les parois de cette chambre seront recouvertes de béton coffré. Sur le côté Sud de la chambre se trouve un tronçon de galerie perpendiculaire de 20 m de long et 3,10 m de diamètre. A l'extrémité de celui-ci se trouve une chambre de raccordement de 10 m de long sur 4 m de diamètre. Cette chambre est elle-même reliée à l'extrémité de l'alvéole RE 88 existante du tunnel LEP/LHC par une galerie de 224 m de longueur et 3,10 m de diamètre. Cette liaison souterraine est indispensable car la chambre d'arrêt des hadrons n'est pas accessible depuis les ouvrages en amont et le CERN a voulu éviter la construction d'un puits supplémentaire. Cette galerie, qui passe à 7 m sous le tunnel LHC, se compose d'une partie rectiligne et d'une partie courbe.

Les parois et les voûtes de toutes les galeries de liaison et des chambres de raccordement sont réalisées en béton projeté.

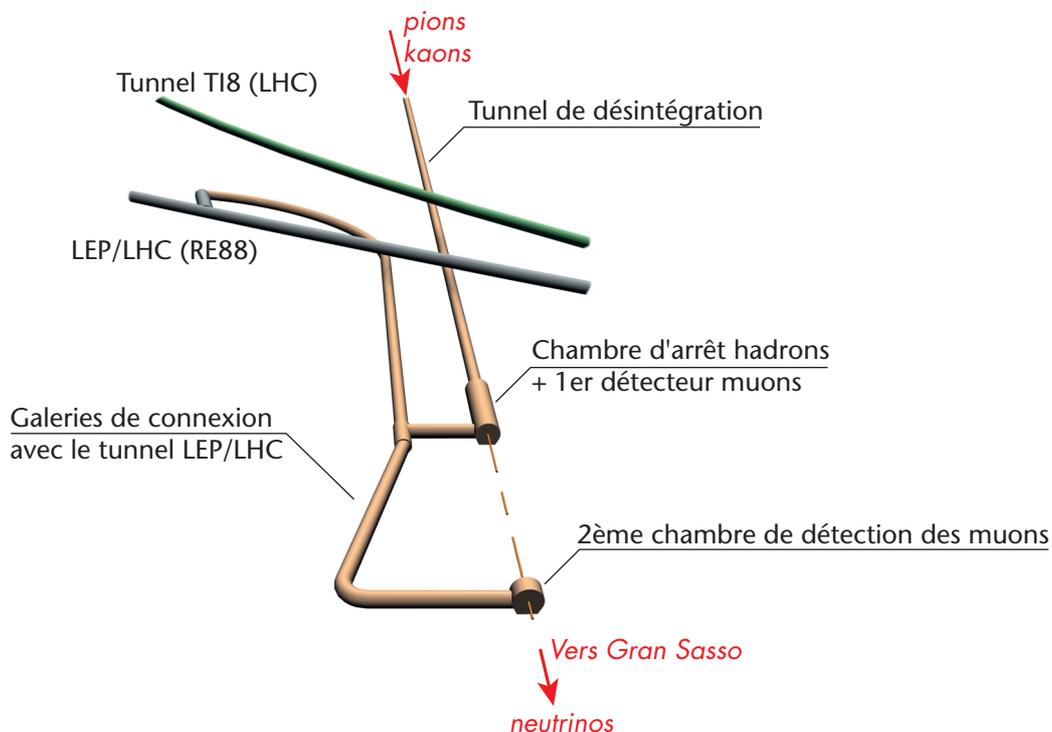


Figure 14: Les chambres d'arrêt des hadrons et de détection des muons et leur connexion avec le tunnel du LHC

3.7 La deuxième chambre de détection de muons

Cette deuxième chambre de 6 m de diamètre et 3,50 m de long est située à 67 m de la première dans l'axe du faisceau. Ses parois seront réalisées en béton coffré. Elle est reliée à la chambre de raccordement déjà mentionnée par une galerie de 3,10 m de diamètre (voir Figure 14). Les parois et les voûtes de toutes les galeries de liaison et des chambres de raccordement sont réalisées en béton projeté.

4. La conduite des travaux de génie civil

4.1 Généralités

La totalité des ouvrages du projet CNGS est située en sous-sol. S'appuyant sur son expérience dans la construction des accélérateurs SPS, LEP et LHC, le CERN prend, pour le projet CNGS, non seulement les précautions et les mesures imposées par la législation en vigueur, mais y intègre également les enseignements tirés de la conduite des projets antérieurs. L'objectif prioritaire du CERN est la réduction significative de l'impact d'un tel projet sur le voisinage et l'environnement.

4.2 Coordination de la sécurité

Les marchés d'études et de réalisation font au préalable l'objet d'appels d'offres internationaux. Les conditions et limites des prestations, les spécifications techniques et obligations de tous ordres des contractants sont très clairement définies. En particulier, les entreprises sont tenues de respecter strictement, comme c'est le cas actuellement pour le LHC, l'ensemble des réglementations des États-hôtes selon la zone d'implantation des travaux.

Dans cet esprit, CERN conclut avec une société de contrôle technique un contrat pour l'exécution d'une mission de coordination de sécurité et de protection de la santé des travailleurs intervenant sur le chantier du CNGS, en accord avec la directive européenne 92/57/CEE du 24 juin 1992 relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé à mettre en œuvre sur le chantier.

Dans le cadre de son contrat, cette société participe à toute la phase conception, étude et élaboration du projet. Pendant la phase travaux, elle est chargée de veiller à l'application du Plan Général de Sécurité.

4.3 Horaires de travail

Les horaires de travail respectent la législation applicable. En général, pour des travaux souterrains, le travail est exécuté par des équipes travaillant 24 heures par jour, 5 jours par semaine, avec possibilité de travail exceptionnel le samedi pour des raisons de délais, de sécurité ou de contraintes techniques.

En dehors des horaires réglementaires de travail, les activités en surface sont réduites et respectent la législation en vigueur en matière de lutte contre le bruit. Le transport des déblais en surface est interdit pendant la nuit.

4.4 Contraintes géologiques

Les travaux sont réalisés entièrement dans la molasse du bassin lémanique. Cette roche est composée de strates d'épaisseur métrique et de qualité variables qui vont de marnes relativement tendres à des grès très durs avec les termes intermédiaires regroupés sous le nom de marnes gréseuses. Il s'agit d'une roche tendre,

pratiquement étanche, peu fracturée et peu abrasive. Elle présente cependant des inconvénients liés à la faible résistance et à l'altérabilité des marnes, source d'instabilités locales ou de gonflements, et parfois à la présence, surtout dans les grès, d'hydrocarbures liquides ou gazeux.

4.5 Emploi des explosifs

L'emploi des explosifs est strictement réglementé aussi bien en Suisse qu'en France. Comme pour les travaux du LEP exécutés dans la plaine, le CERN limite au strict minimum l'emploi d'explosifs. Exclure totalement les explosifs est cependant impossible car certains travaux ne peuvent être exécutés autrement. Ce n'est donc qu'en cas de nécessité que le CERN autorise leur emploi sur le projet CNGS. Dans cette éventualité, les plans de tir à établir par les entreprises sont soumis à un laboratoire agréé pour approbation.

4.6 Techniques de réalisation

4.6.1 Le puits d'accès temporaire

Ce puits, de 8 m de diamètre, est réalisé au brise-roche hydraulique ou à l'explosif si absolument nécessaire. La paroi du puits est maintenue et protégée par un soutènement composé d'ancrages et de béton projeté. Elle ne reçoit pas de revêtement définitif. En fin de travaux, le puits sera obturé en surface par une dalle en béton de manière à en garantir la sécurité et l'intégration dans son environnement immédiat.

4.6.2 Tunnels

Ces ouvrages peuvent être exécutés soit par des haveuses à tête mobile, soit par des machines à forer pleine section (tunnelier). Le choix est laissé à l'entreprise chargée de l'exécution des travaux. Les tunnels font l'objet, au fur et à mesure de leur excavation, d'un soutènement provisoire qui associe des boulons, dont le rôle est d'armer le massif rocheux et de solidariser les blocs disjoints, à du béton projeté armé avec un treillis soudé ou des fibres. Pour le tunnel du faisceau de protons, la phase de soutènement provisoire est suivie de la réalisation de la voûte intérieure coulée sur place avec interposition d'une étanchéité. Comme le tunnel de désintégration doit par la suite recevoir un tube d'acier, seul le soutènement provisoire est mis en place. Enfin, pour le reste des galeries, la phase de soutènement est suivie de l'application d'une couche de béton projeté.

4.6.3 Chambres

Elles assurent les liaisons entre les divers ouvrages souterrains ou bien sont utilisées pour l'implantation des équipements techniques. Elles sont excavées par des machines à attaque ponctuelle (haveuses). Au fur et à mesure de l'avancement des excavations, la protection du poste de travail et la consolidation des parois à l'aide d'ancrages, de treillis métalliques, de béton projeté ou d'autres techniques appropriées, sont assurées. Le revêtement final se fait selon les méthodes classiques, à l'aide de coffrages amenés sur place depuis la surface.



Figure 15: Excavation par une haveuse à tête mobile

4.7 Installations de chantier

4.7.1 Généralités

Le CERN fait valoir auprès de ses contractants un certain nombre d'exigences en matière d'installations de chantier :

- les bungalows des directions de travaux sont livrés en très bon état et entretenus de façon à le rester pendant toute la durée du chantier;
- la zone de chantier doit demeurer propre et ordonnée,
- les clôtures sont de type plein en acier prélaqué de couleur neutre ou en bois,
- l'accès à la zone de chantier est équipé d'un portail fermant à clef.

4.7.2 Emplacement du chantier

Le chantier du puits de génie civil PGCN est voisin de la zone du chantier du TI8 exécuté actuellement dans le cadre du projet LHC. Cette zone est située près du point d'accès BA4 du SPS à Prévessin-Moëns, à proximité du lotissement du "Clos de Charmais", sur un terrain de l'Etat français mis à la disposition du CERN lors de la construction du SPS. L'accès à la route RD35 se fait par l'entrée du site existant.

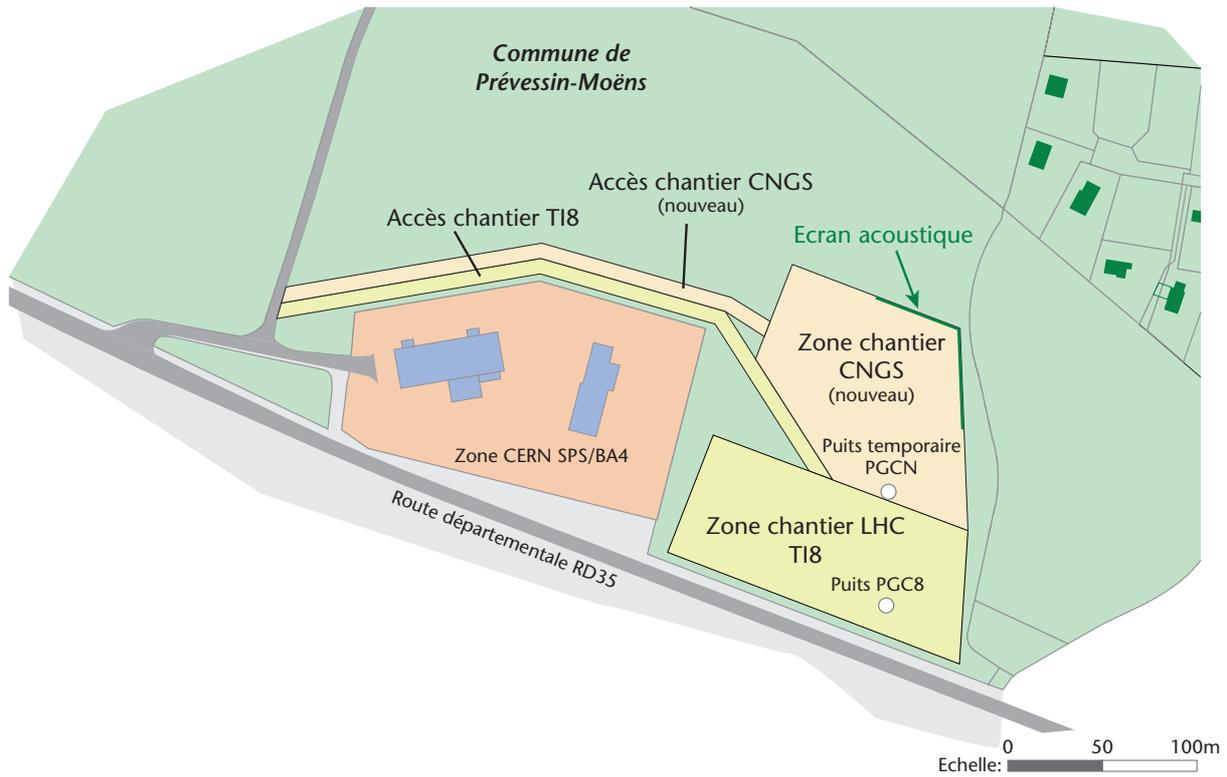


Figure 16: La zone du chantier CNGS près du point BA4 du SPS



Figure 17: Le chantier du tunnel T18 à côté de la zone SPS/BA4

5. Le CNGS et l'environnement

Si, par essence, les ouvrages souterrains n'ont que peu d'impact sur l'environnement, leur réalisation nécessite cependant des précautions pour réduire ou éviter les éventuelles nuisances liées à l'évacuation des déblais, aux rejets d'eau en surface, aux ébranlements et aux bruits issus du chantier.

Les ouvrages souterrains, une fois achevés, ne sont plus sources de nuisances. Le bruit émis par les installations est imperceptible en surface.

5.1 Déblais

5.1.1 Généralités

Le chantier du CNGS va produire d'une part des déblais naturels, d'autre part des déchets liés à la démolition d'ouvrages existants, ainsi qu'à l'activité des chantiers eux-mêmes. Trois types de déblais naturels sont produits : de la terre végétale qui sera stockée et réutilisée, des moraines et principalement de la molasse. Ces deux derniers déblais sont mis en dépôt.

Le raccordement aux ouvrages souterrains existants va également donner lieu à la démolition de structures en béton. Ceux-ci sont traités par une procédure respectueuse de l'environnement.

5.1.2 Les déblais

Le projet CNGS va produire un volume excavé foisonné de 700 m³ de moraine et de 66 000 m³ de molasse en supposant un coefficient de foisonnement égal à 1,50.

Le dépôt des déblais se fera selon les principes appliqués pour ceux du LHC, à savoir éviter la traversée d'agglomérations. Des discussions sont en cours avec la Commune de Prévessin-Moëns afin d'augmenter la capacité du dépôt du Bois des Serves mis en place pour les besoins du LHC.

5.2 Déchets

5.2.1 Les bétons

Pour les bétons issus des démolitions, il est prévu de les concasser et de les séparer de leurs éléments métalliques afin d'obtenir un matériau réutilisable. Le volume des démolitions du projet CNGS se limite à 18 m³ qui proviennent des liaisons avec les ouvrages existants.

5.2.2 Autres déchets du chantier

Une déchetterie de chantier est implantée sur la zone de chantier. Elle est sélective; le tri et la récupération se font par catégorie (huile de vidange, matières plastiques, emballages, métaux...) et sont traités par les filières appropriées.

5.3 Effets sur les ressources en eau

5.3.1 Consommation d'eau industrielle

De l'eau industrielle déminéralisée dérivée du SPS est utilisée pour le refroidissement des aimants du faisceau de protons. Cette eau circule dans un circuit fermé. Son refroidissement est assuré par les aéroréfrigérants du SPS par le biais d'un échangeur de chaleur.

L'eau de refroidissement du SPS provient du Lac Léman par une conduite spéciale. La consommation due au CNGS ne représentera qu'environ 1 % de celle du SPS.

5.3.2 Effets sur les nappes aquifères

Tous les ouvrages souterrains du CNGS sont réalisés dans la molasse qui est en principe un matériau étanche à l'eau. Aucun ouvrage ne se trouve situé à l'intérieur d'un périmètre, même éloigné, de protection des captages.

Etant donné que le puits d'accès pour l'ouvrage CNGS ne traverse pas de nappes aquifères, il n'y a pas de risque de pollution pour l'alimentation en eau de la population ni durant la construction, ni durant l'exploitation du CNGS.

5.3.3 Rejets d'eau

Les éventuelles eaux de drainage sont recueillies dans quatre réservoirs souterrains. L'un est situé dans la chambre de ventilation, l'autre à la fin de la galerie de service, le suivant dans la chambre d'arrêt des hadrons et le quatrième dans la deuxième chambre de détection des muons. Une vérification permanente de la qualité des eaux est prévue avant leur rejet dans les réseaux du SPS et du LHC respectivement.

5.4 Le bruit et les ébranlements liés aux chantiers

Il s'agit d'une gêne momentanée qu'il convient toutefois de prendre en considération. Les différentes sources de bruits possibles pendant la période de réalisation des ouvrages sont les suivantes :

- les mouvements des engins et matériels de chantier: le transport des déblais est interdit pendant la nuit;
- l'emploi éventuel d'explosifs du fait d'impératifs techniques. S'il était nécessaire, il serait limité au strict minimum. Dans ce cas, toutes les précautions requises seraient prises par le CERN et les tirs n'auraient lieu que de jour;
- l'accroissement de la circulation routière, particulièrement le trafic lié au transport des déblais.

Etant donné la présence simultanée des chantiers du CNGS et du TI8, le CERN compte installer un écran acoustique protégeant les habitations voisines.

5.5 Transport, circulation et voirie

Le volume de déblais du CNGS produit par les travaux s'élève à 67'000 m³ foisonnés. Les travaux d'excavation dureront environ deux ans; ce sont donc environ 15 transports par jour en moyenne qui seront nécessaires.

En ce qui concerne le béton à couler, dont le volume total pour le projet CNGS est de 12'200 m³, le chantier est supposé être alimenté depuis les centrales à béton proches de Thoiry ou de Crozet. Le bétonnage durera environ 18 mois, c'est un trafic moyen de six transports par jour qui en résultera sur la route RD35a, puis sur la route RD35.

L'installation des composants du projet CNGS se fait par le point BA4 du SPS et par la galerie d'accès. En ce qui concerne les 500 blocs de fer pour l'arrêt du faisceau, il peuvent être transportés par lots de cinq. Les 100 aimants de la ligne de protons doivent être transportés un par un. Les blocs de fer seront acheminés depuis le site de Meyrin du CERN par la route VC5, au rythme de deux camions par jour pendant la période d'installation, qui durera deux mois environ. Les aimants viendront du site de Prévessin du CERN, voisin au point BA4 du SPS.

En phase d'exploitation, le faisceau CNGS est commandé depuis la salle de contrôle SPS-LHC sur le site de Prévessin - aucun trafic n'est donc induit pendant les sept mois d'exploitation annuelle. Pendant les arrêts, seuls des transports occasionnels d'un équipement défectueux à remplacer sont à prévoir.

5.6 Aspects fonciers

Pour les différents projets antérieurs du CERN, l'Etat français a acquis et mis à la disposition de l'Organisation, les terrains nécessaires. Pour le SPS, 412 ha ont été acquis au cours des années soixante-dix. Le point BA4 du SPS est situé sur un de ces terrains. En France, les ouvrages souterrains du Projet CNGS sont tous situés sous des terrains mis à la disposition du CERN. En Suisse, la profondeur des ouvrages est telle qu'ils sont situés au-delà de la profondeur utile. Les ouvrages du projet CNGS sont, en France, construits dans des tunnels. Il n'y a donc aucun impact foncier de la part du projet CNGS, ni en France, ni en Suisse.

5.7 Aspects radiologiques

Bien que les neutrinos n'aient pas d'effet sur la matière ni sur les organismes vivants, leur production par un faisceau de protons crée de la radioactivité qui reste cependant confinée au niveau du tunnel. Les calculs des spécialistes de radioprotection mettent en évidence qu'aucun rayonnement ionisant direct n'arrivera en surface et que les éventuels rejets radioactifs liés à l'air et à l'eau seront nettement inférieurs au niveau naturel de la radioactivité dans la région.

En tout état de cause, le projet CNGS sera traité de manière formelle avec les autorités françaises et suisses. Ce projet fera en effet partie de la Convention INB (Installation Nucléaire de Base) relative au LHC et au SPS passée entre le CERN et le Gouvernement français. Avant d'obtenir les autorisations nécessaires pour l'exploitation, le CERN soumettra préalablement le projet et ses dispositifs de sécurité à la DSIN (Direction de la Sécurité des Installations Nucléaires) qui gère les INB et à l'Office Fédéral de la Santé Publique en Suisse.

5.8 Sécurité

Comme le LEP et le LHC, le CNGS sera soumis aux dispositions que régissent les installations nucléaires de base (INB). La procédure INB prévoit notamment dans sa phase initiale une étude de danger qui identifie les risques éventuels et énonce les principes de prévention.

5.9 Aspects socio-économiques

Le poids économique actuel du CERN a été documenté lors de la présentation du projet LHC. Le projet CNGS est beaucoup moins important que le LHC en main d'oeuvre et en coût de matériel. Il n'est pas directement créateur d'un nombre significatif d'emplois. Par contre, le CNGS s'ajoute aux autres projets scientifiques qui font du CERN un des grands centres d'excellence en physique de particules. Ce nouveau projet assure la continuation de la physique des neutrinos en Europe. Il renforcera l'image scientifique et technologique du CERN et il attirera des chercheurs du monde entier, contribuant ainsi au rayonnement de la région.

Liste des illustrations

	Page
Figure 1	Le modèle standard 6
Figure 2	Illustration des oscillations $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 7
Figure 3	Vue schématique d'une interaction de rayons cosmiques donnant des neutrinos détectés au laboratoire souterrain du Gran Sasso..... 8
Figure 4	L'intérieur d'une salle souterraine au Gran Sasso..... 9
Figure 5	Parcours des neutrinos à travers la croûte terrestre entre le CERN et le laboratoire du Gran Sasso 10
Figure 6	Implantation du projet CNGS au CERN..... 11
Figure 7	La production de pions et kaons (parents des neutrinos), focalisés dans la direction du Gran Sasso par deux cornes magnétiques..... 14
Figure 8	Les accélérateurs de protons du CERN utilisés pour le CNGS 14
Figure 9	Dipôles et quadripôles dans le tunnel du SPS..... 15
Figure 10	Plan de situation des ouvrages du projet CNGS..... 20
Figure 11	Coupe verticale des ouvrages du projet CNGS..... 21
Figure 12	Vue virtuelle des ouvrages souterrains près du point BA4 du SPS..... 21
Figure 13	La chambre des cibles et ses annexes 22
Figure 14	Les chambres d'arrêt des hadrons et de détection des muons et leur connexion avec le tunnel du LHC..... 23
Figure 15	Excavation par une haveuse à tête mobile 27
Figure 16	La zone du chantier CNGS près du point BA4 du SPS..... 28
Figure 17	Le chantier du tunnel TI8 à côté de la zone SPS/BA4 28