

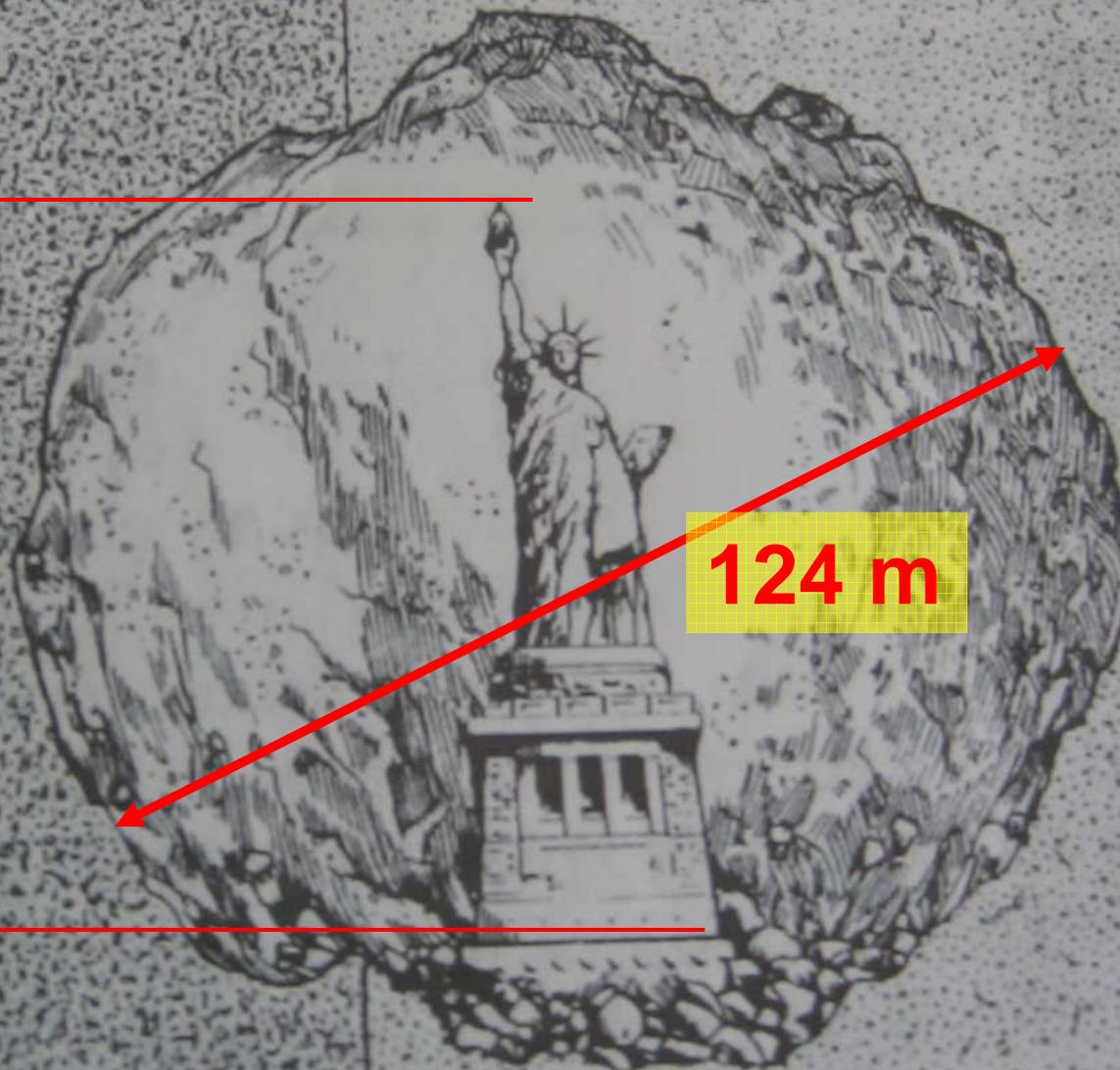
# Problèmes géomécaniques liés aux mégacavernes à neutrinos

Pierre Duffaut

# la Liberté, éclairant une caverne MEGATONNE

86 m

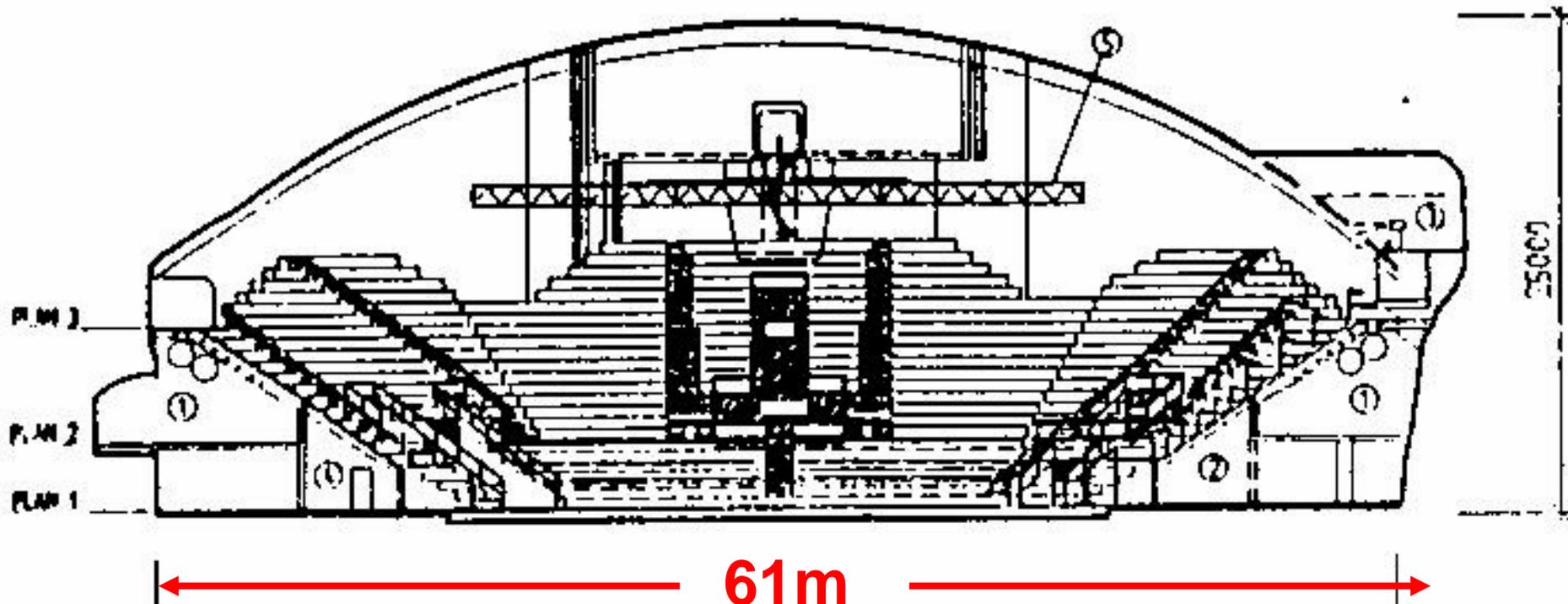
124 m

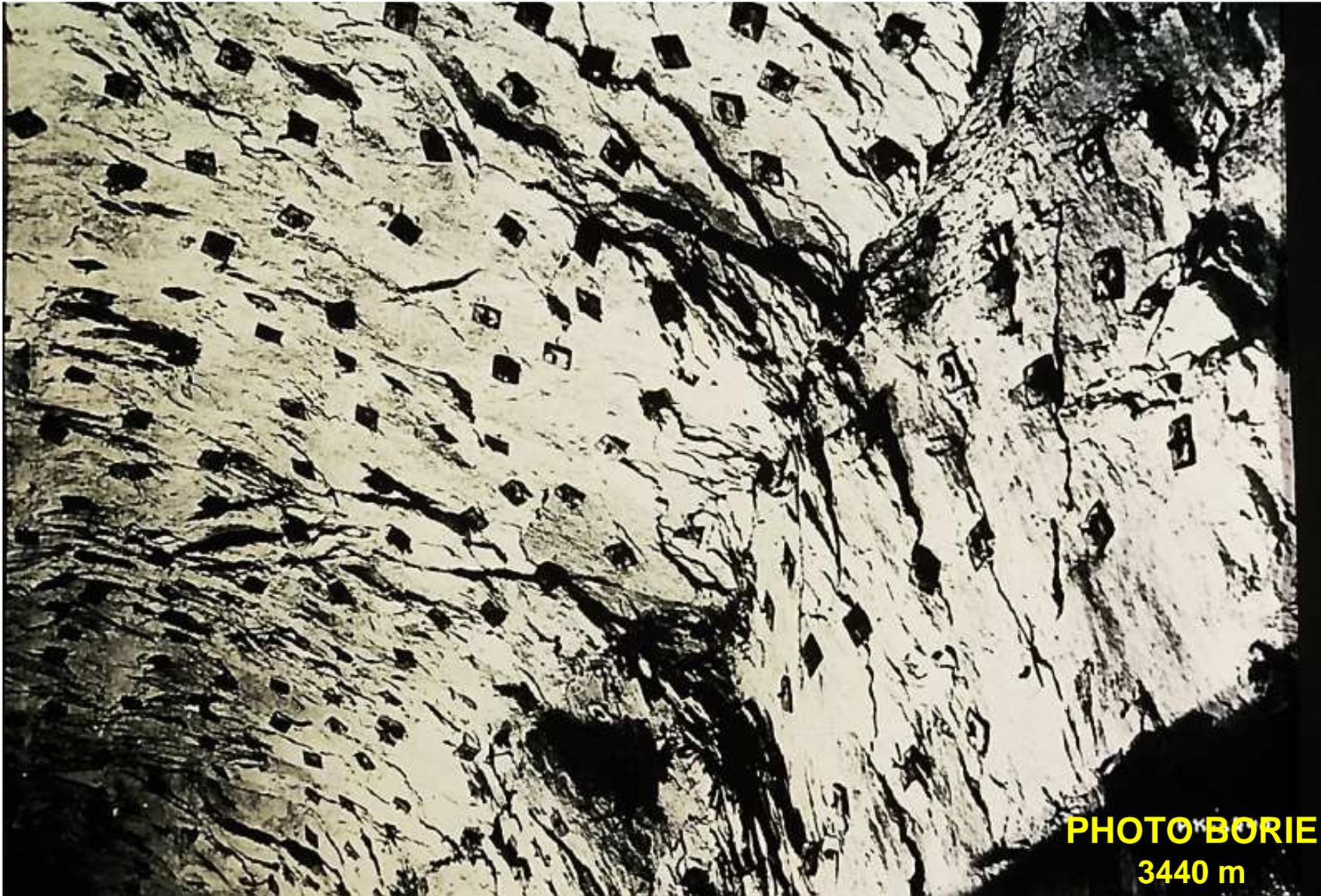


# Problèmes géomécaniques liés aux mégacavernes à neutrinos

- très grand **volume** ~ 1 hectomètre cube
- très grande **profondeur** ~ 2000 m
- mais portée et hauteur < 60 m
- d'où fractionnement probable **ou tore ?**

# Patinoire souterraine de GJØVIK JEUX OLYMPIQUES 1992 (Norvège)





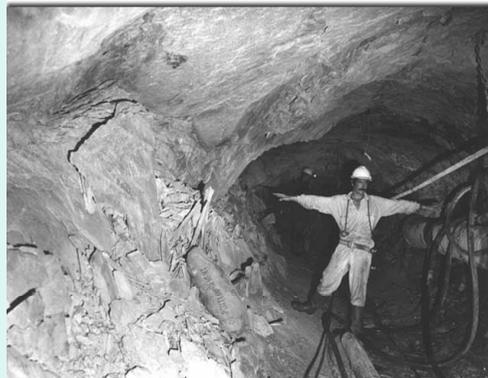
**PHOTO BORIE**  
**3440 m**

# **DÉCOMPRESSION au TUNNEL du MONT BLANC**

AFTES/CFMR 7:12:2006



Evolution d'une galerie  
à très grande profondeur



Afrique du Sud  
photo D. Ortlepp, CSIRO

# mines d'or d'AFRIQUE du SUD

évolution de la rupture  
autour de tunnels très  
profonds (~ 3000 m)

photos Daniel ORTLEPP CSIRO

R 7:12:2006 Manuel, tome 2, p 278 6

# INTRODUCTION

## Problèmes géomécaniques liés aux mégacavernes à neutrinos

- rappel sur la détection des neutrinos
- revue de quelques grandes cavernes
- maîtrise des contraintes
- conclusions

# Le projet américain DUSEL

## Deep Underground Science Engineering Laboratory

répond à l'augmentation extraordinaire de l'intérêt pour la profondeur, à la fois dans les sciences et dans la construction souterraine :

3 Questions fondamentales exigent un labo profond :

- de quoi est fait l'Univers ? Matière sombre, antimatière, etc. ?
- qu'enseignent les organismes qui vivent à grande profondeur ?  
quel est leur rôle dans le comportement des roches et des fractures ?
- quelles échelles de temps et d'espace pour la résistance du massif rocheux qui conditionne les glissements et les séismes ?

pour les ingénieurs, il faut explorer les  
**couplages** à grande échelle

de la mécanique des roches avec l'eau, la chaleur, la chimie, la biologie



**latest paper about DUSEL from National Science Foundation**

AFTES/CFMR 7:12:2006

**PRINCIPAL INVESTIGATORS:**

*Astrophysics*

Bernard Sadoulet  
University of California at Berkeley

*Physics*

Eugene Beier  
University of Pennsylvania

*Civil Engineering/Rock Mechanics*

Charles Fairhurst  
University of Minnesota

*Geomicrobiology*

T.C. Onstott  
Arlington University

*Physics*

R.C. Hamish Robertson  
University of Washington

*Microbiology*

James Tiedje  
Michigan State University

**PRODUCTION EDITOR**

Judith Jackson  
FarmJob

**CONTRIBUTING EDITORS:**

Elizabeth Ancoett  
University of California at Berkeley

Hiroshi Munyama  
University of California at Berkeley

## 6 Principal investigators

ASTROPHYSICS, Bernard Sadoulet

PHYSICS, Eugene Beier

## CIVIL ENGINEERING / ROCK MECHANICS

Charles Fairhurst

University of Minnesota

GEOMICROBIOLOGY, T.C. Onstott

PHYSICS, Hamish Robertson

MICROBIOLOGY, James Tiedje,

## + 14 Working groups

## Applications

François Heuzé, LLNL

Jean-Claude Roegiers, University of Oklahoma

# 1. rappel sur la détection des neutrinos



# le neutrino, comment le détecter ?

- postulé par Pauli en 1936
- identifié en 1953-56
- dépourvu de charge électrique
- masse très faible
- vitesse très proche de celle de la lumière
- très faible diamètre
- toute matière lui est transparente

# le neutrino, comment le détecter ?

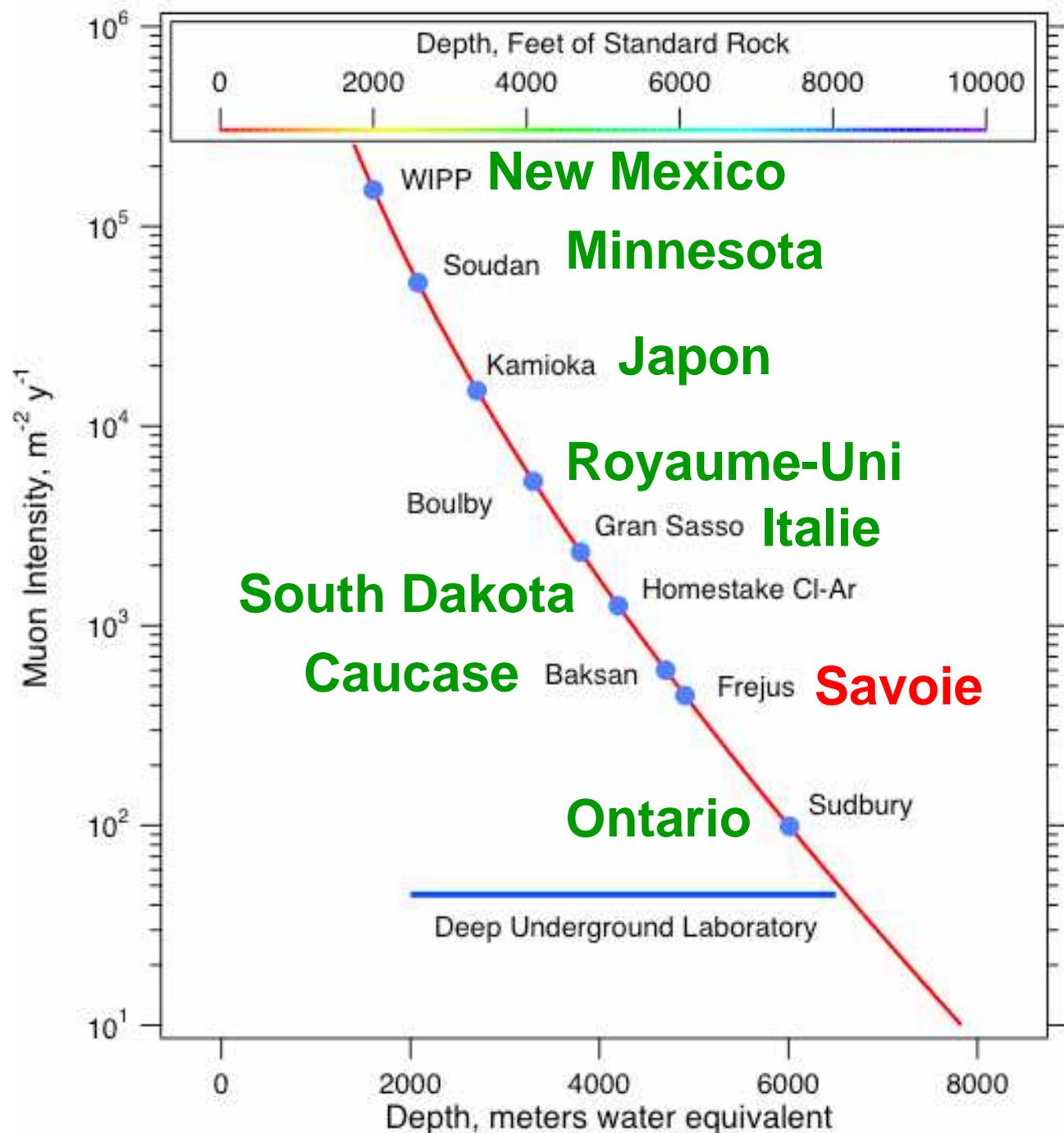
- émis par le bang initial,
- les étoiles (la plus proche étant le soleil),
- l'explosion des supernovae,
- la bombe atomique,
- les accélérateurs de particules,
- les réacteurs nucléaires,
- et des « usines à neutrinos » (au CERN)

# le neutrino, comment le détecter ?

- sa détection repose sur l'effet Cherenkov car dans un liquide transparent, eau pure, eau lourde, argon liquide, ***chaque collision émet un bang lumineux***
- ils est très rare (15 par jour avec 30 000 m<sup>3</sup>)
- il est noyé dans le rayonnement cosmique, qui est arrêté par la croûte terrestre
- d'où l'exigence de **volume** et de **profondeur**

# principaux labos de physique des particules dans le monde

atténuation des  
rayons cosmiques  
en fonction de la  
profondeur  
exprimée en pieds  
de terrain (en haut)  
ou d'eau (en bas)



# le neutrino, comment le détecter ?

- le bang est capté par des photodétecteurs qui tapissent le réservoir afin de déterminer la localisation et les conséquences du choc
- la sensibilité de ces appareils est limitée à environ 60 m
- leur résistance à la pression du liquide limite la profondeur à 60 m (d'eau « légère »)
- d'où les limites de portée et de hauteur



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

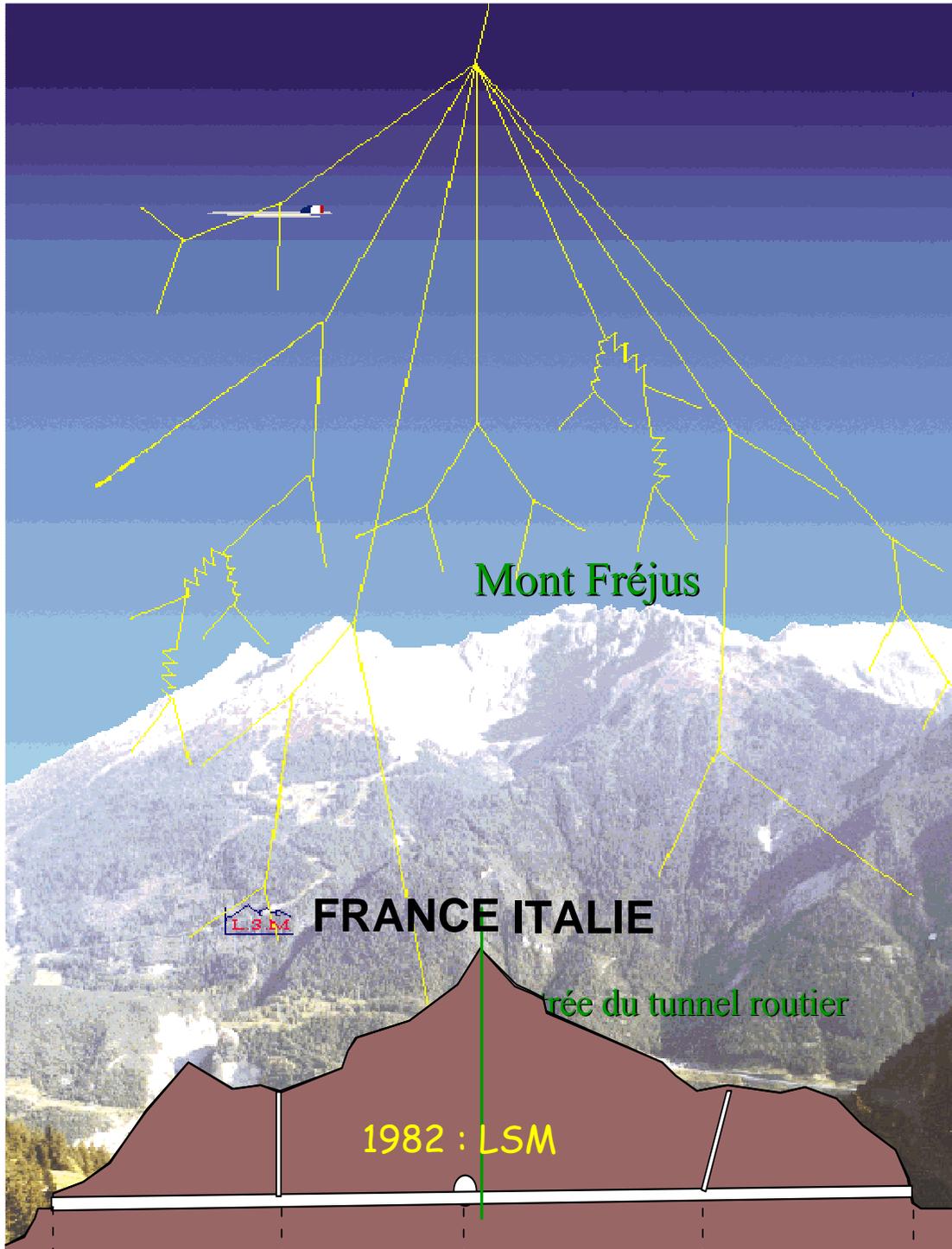
**DSM**

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

# Laboratoire de MODANE



INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE  
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES



Mont Fréjus

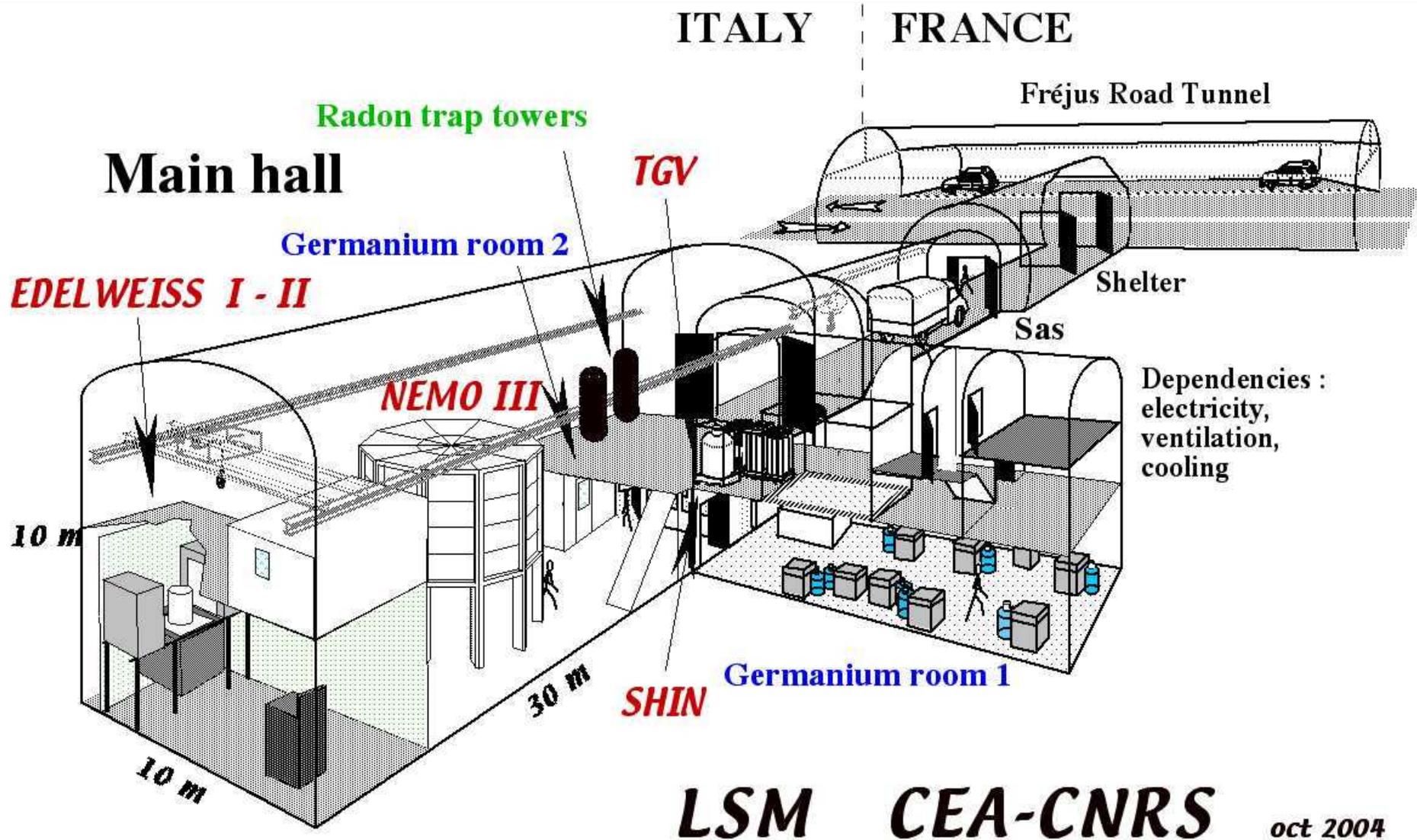


FRANCE ITALIE

entrée du tunnel routier

1982 : LSM

2006



- couverture 1750 m
  - 4800 mwe
  - chaud et sec 32°C
  - 4 muons /m<sup>2</sup>/jour
- AFTES
- neutrons rapides provenant de la radioactivité du rocher et du béton : 1,6 10<sup>-6</sup> /cm<sup>2</sup>.s
  - renouvellement de l'air : 1.5 vol/heure
  - très basse teneur en Rn : 5-15 Bq/m<sup>3</sup>

- 

## **2. revue de quelques grandes cavernes**

-

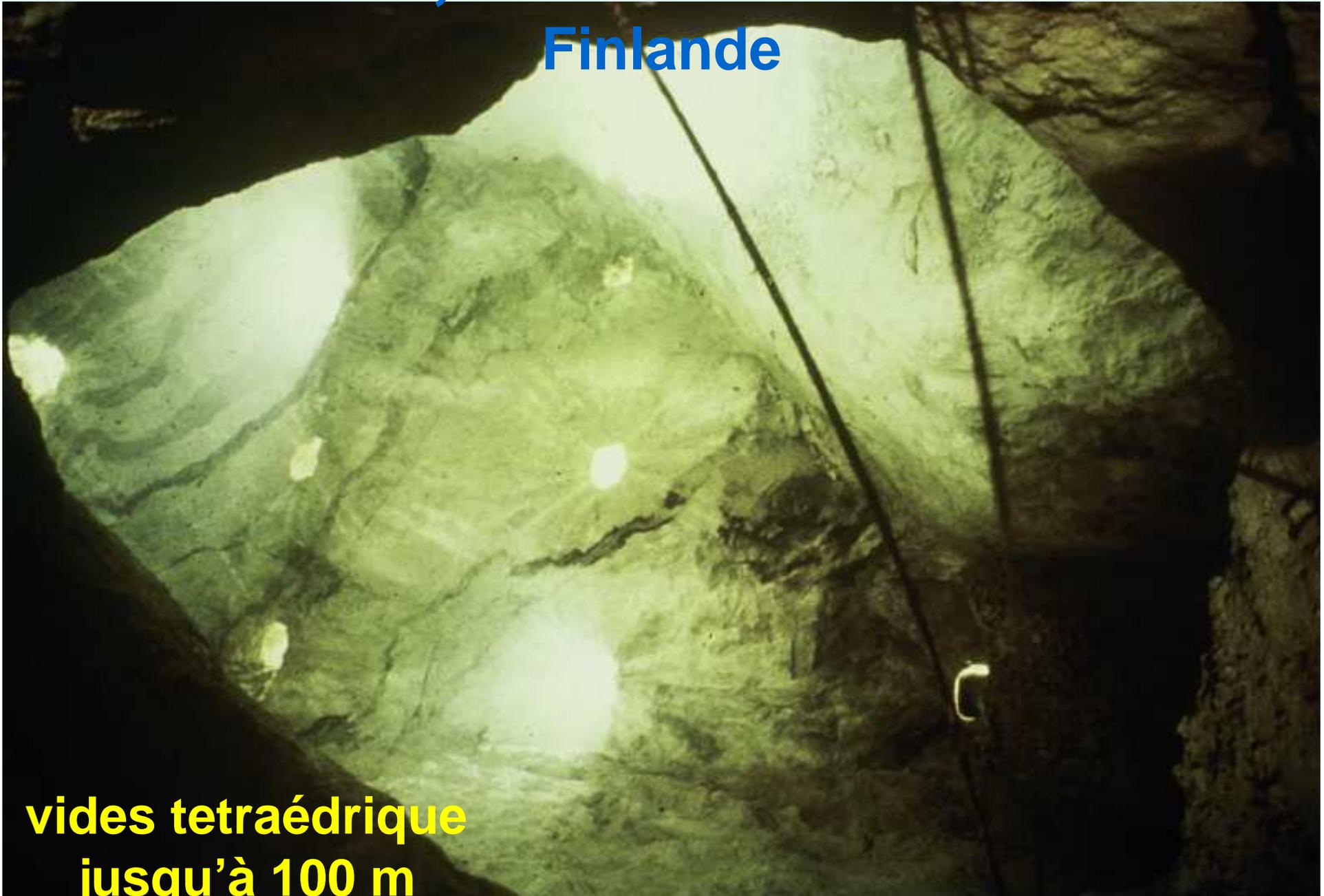
# Grotte de CHORANCHE, Vercors (Isère)



about 60 m wide

# TYTYRY, carrière de calcaire

Finlande



**vides tétraédrique  
jusqu'à 100 m**

**plus grande caverne  
existante Japon, Mine  
TOCHIBORA,**

**volume**

**300 000**

**m<sup>3</sup>**

**width 80 m**

**length 50 m**

**height 75 m**

**profondeur 330**

**m**



**MITSUMI  
KINZOKU**

**Chambre d'exploitation de minerai de zinc par chambres  
soutirées**

# les plus grandes cavernes anthropiques

- sont celles lessivées dans le sel gemme pour stocker des hydrocarbures
- seules elles atteignent ou dépassent le million de mètres cubes

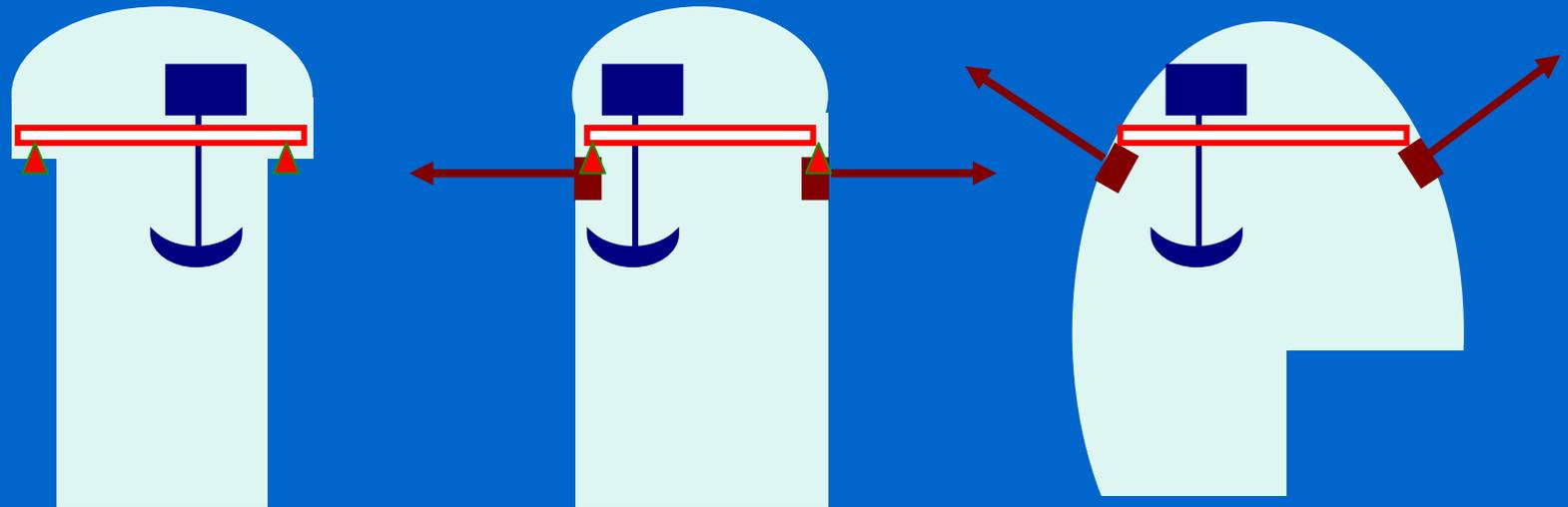
dans des dimensions plus modestes, les usines de production d'électricité et les cavernes de stockage sont très nombreuses, les gares de lignes ferroviaires et les autres utilisations le sont moins, mais sont des exemples significatifs

# formes des usines souterraines

1 «champignon»

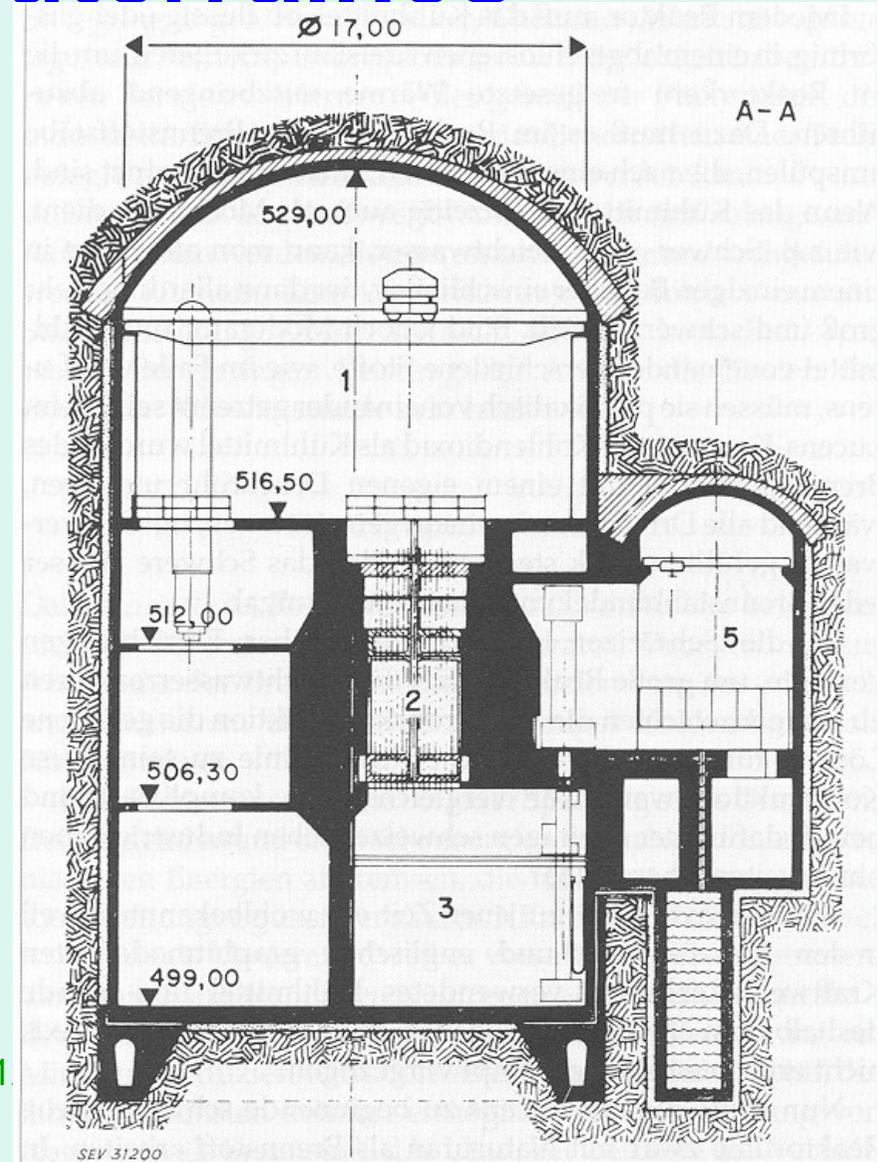
2 ancrage des rails du pont roulant

3 ovoïde



# une des premières usines nucléaires souterraines

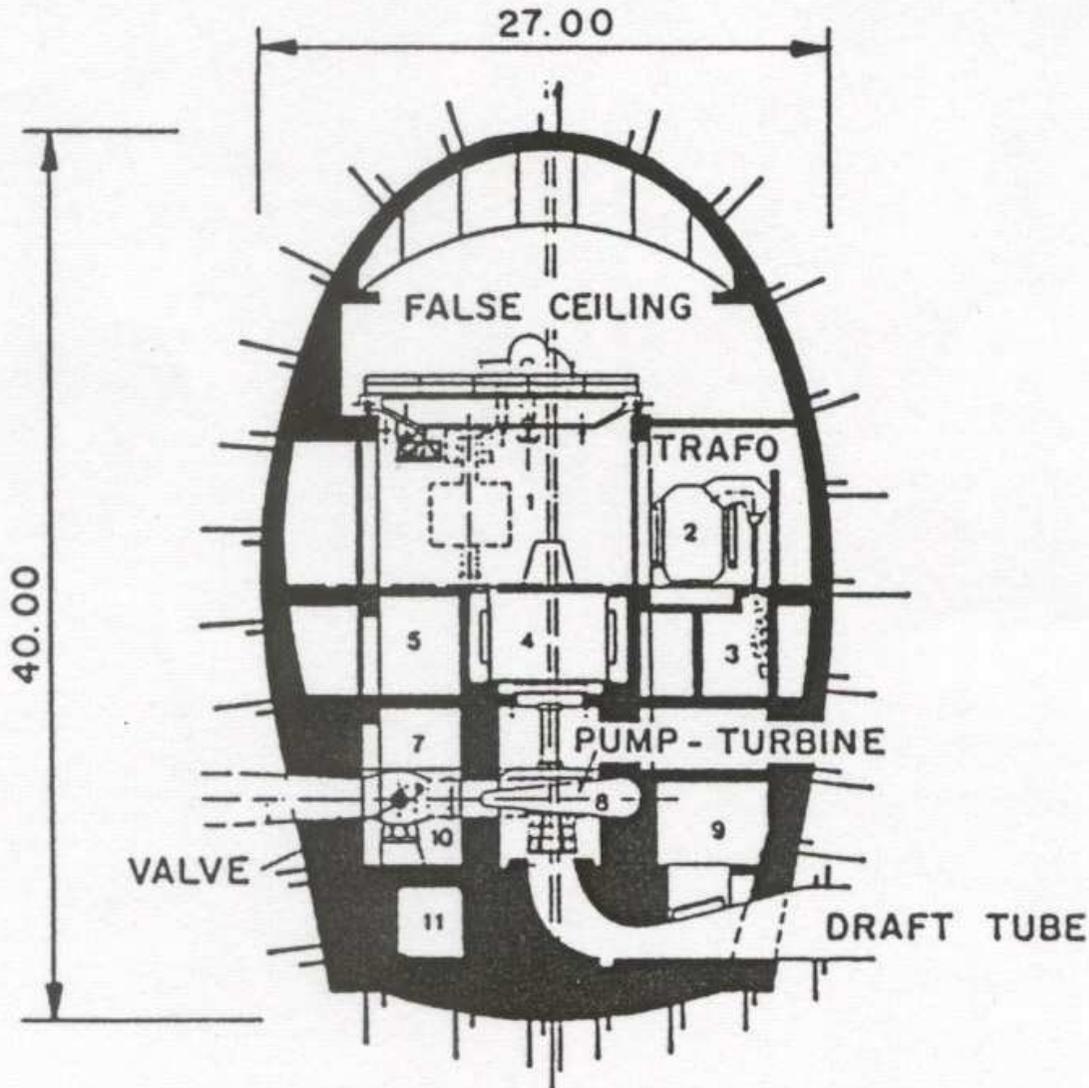
- Lucens, Suisse, 1967
- fermée après fusion du cœur



AFTES/CFMR 7:1

# PORĄBKA JAR

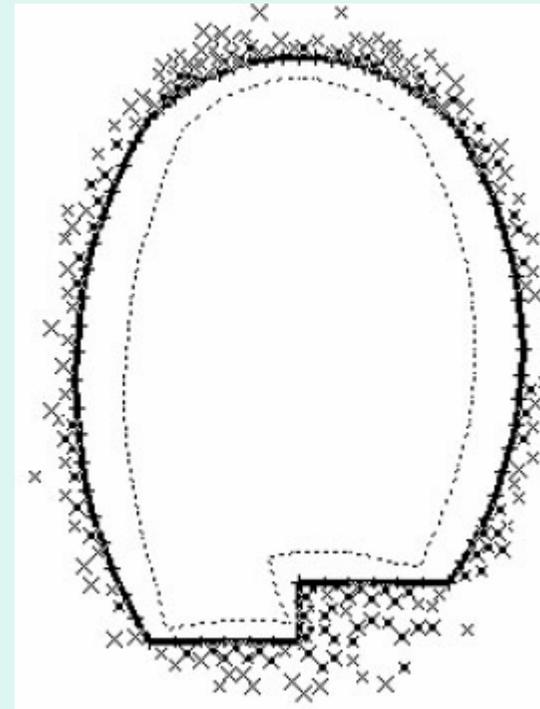
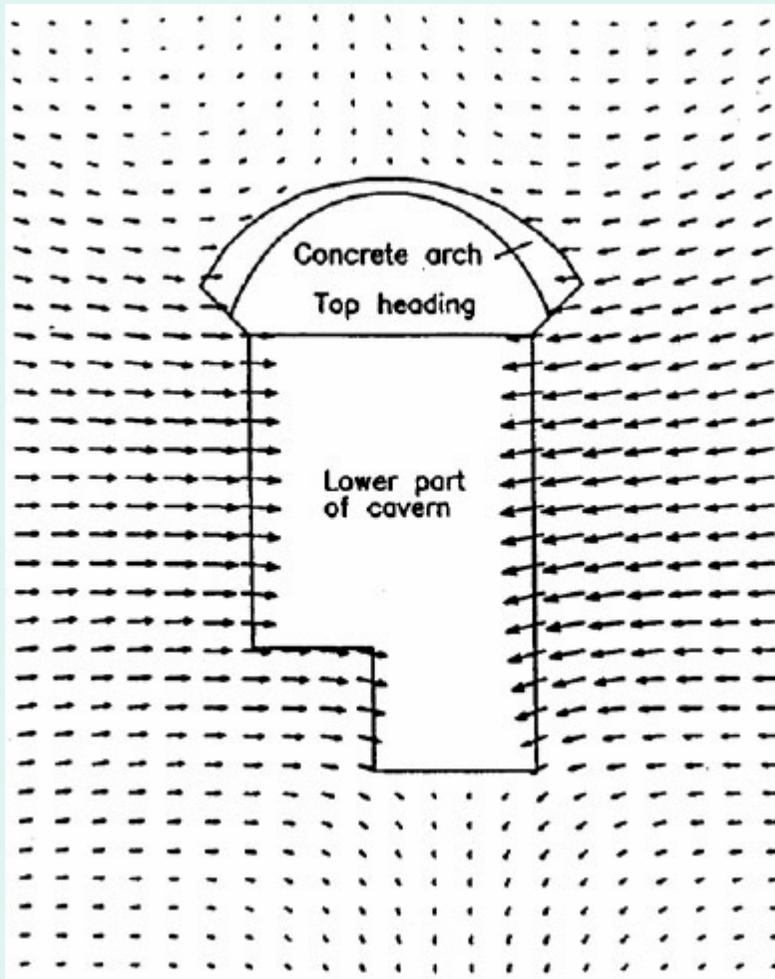
usine hydro-électrique souterraine (Pologne)



section ovoïde

soutènement  
par boulons

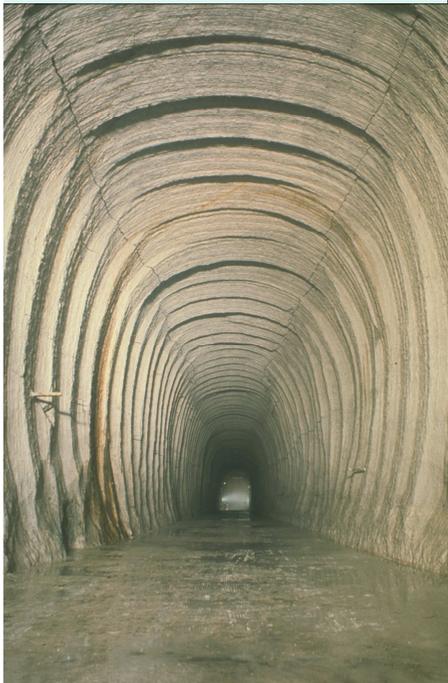
# Traité de Evert HOEK (Internet)



# stockage souterrain d'hydrocarbures

**INCHEON KOREA**

**GARGENVILLE  
FRANCE**



*les 2 grâce à GEOSTOCK*

**8 x 12 chalk**

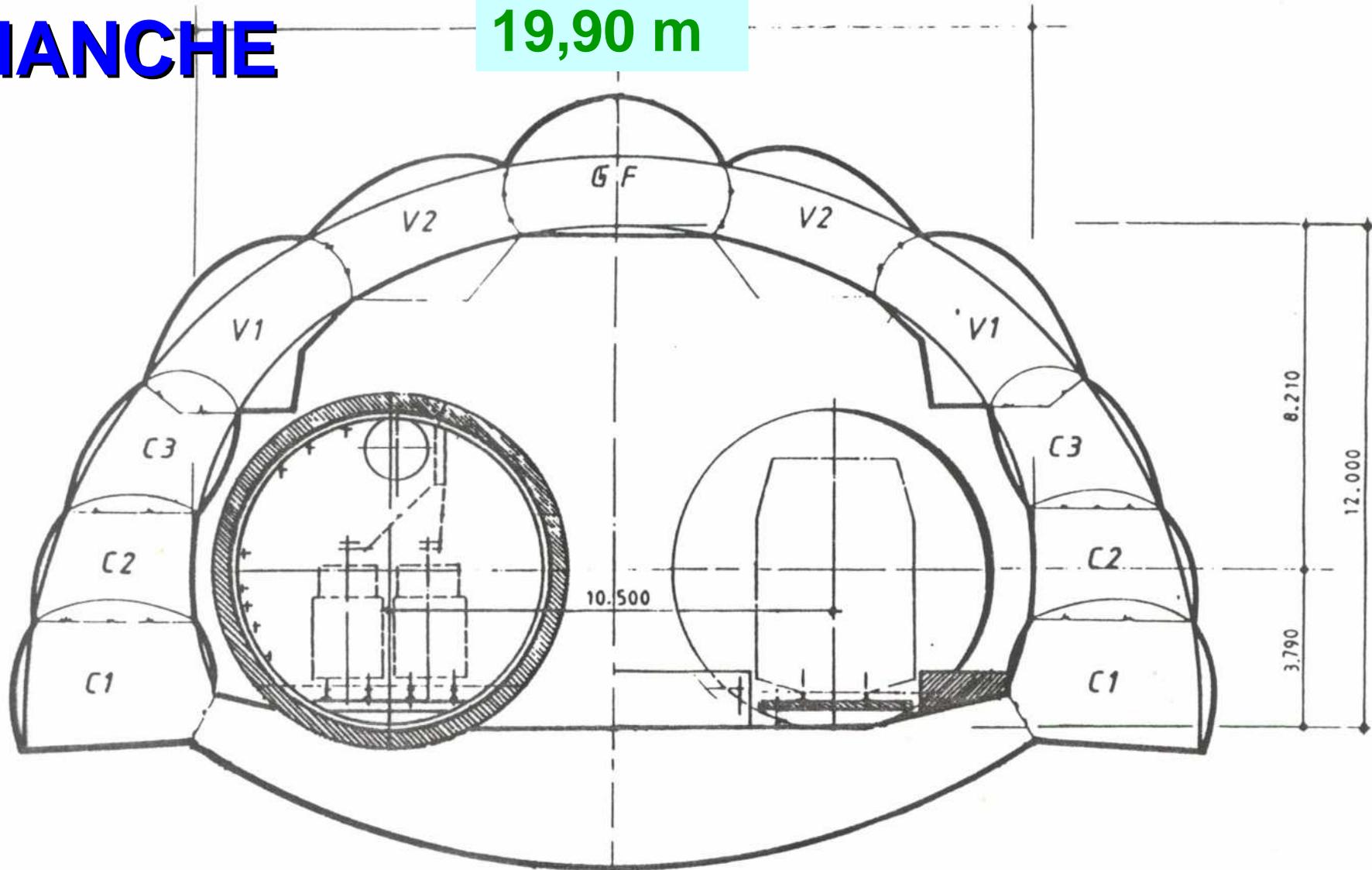
**16 x 26 granite**

# TUNNEL

sous la  
MANCHE

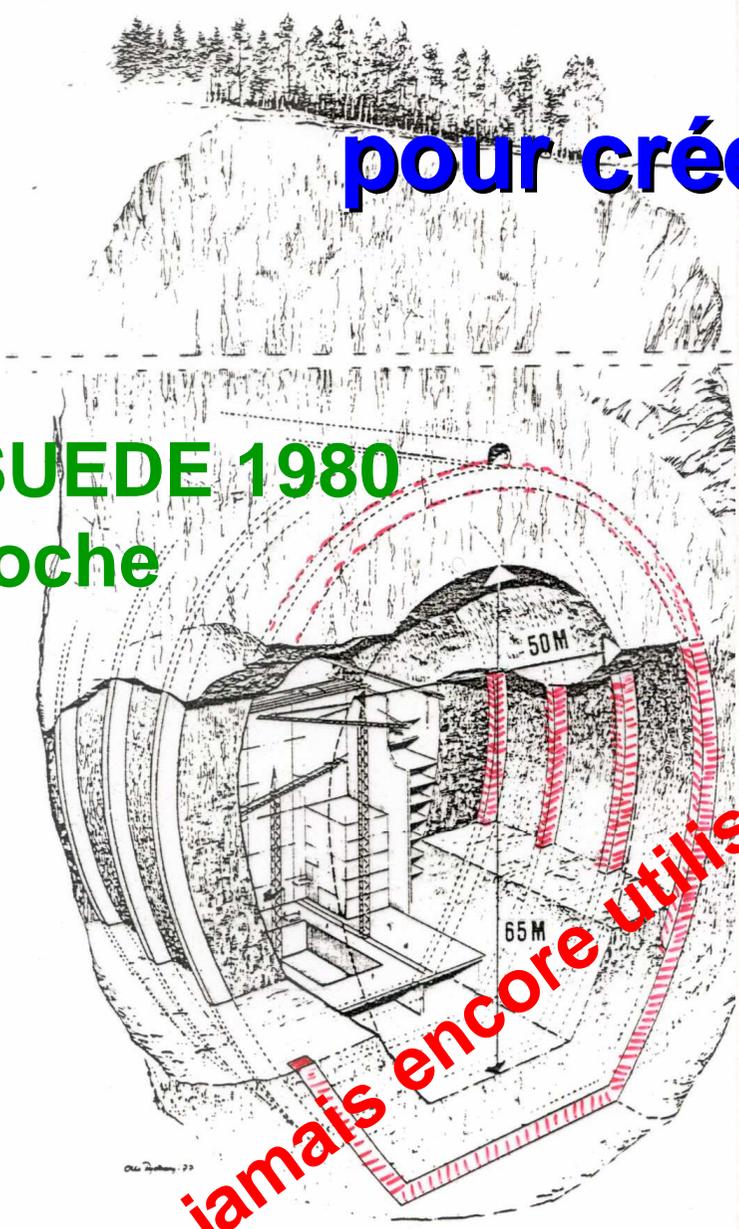
France side crossover

19,90 m

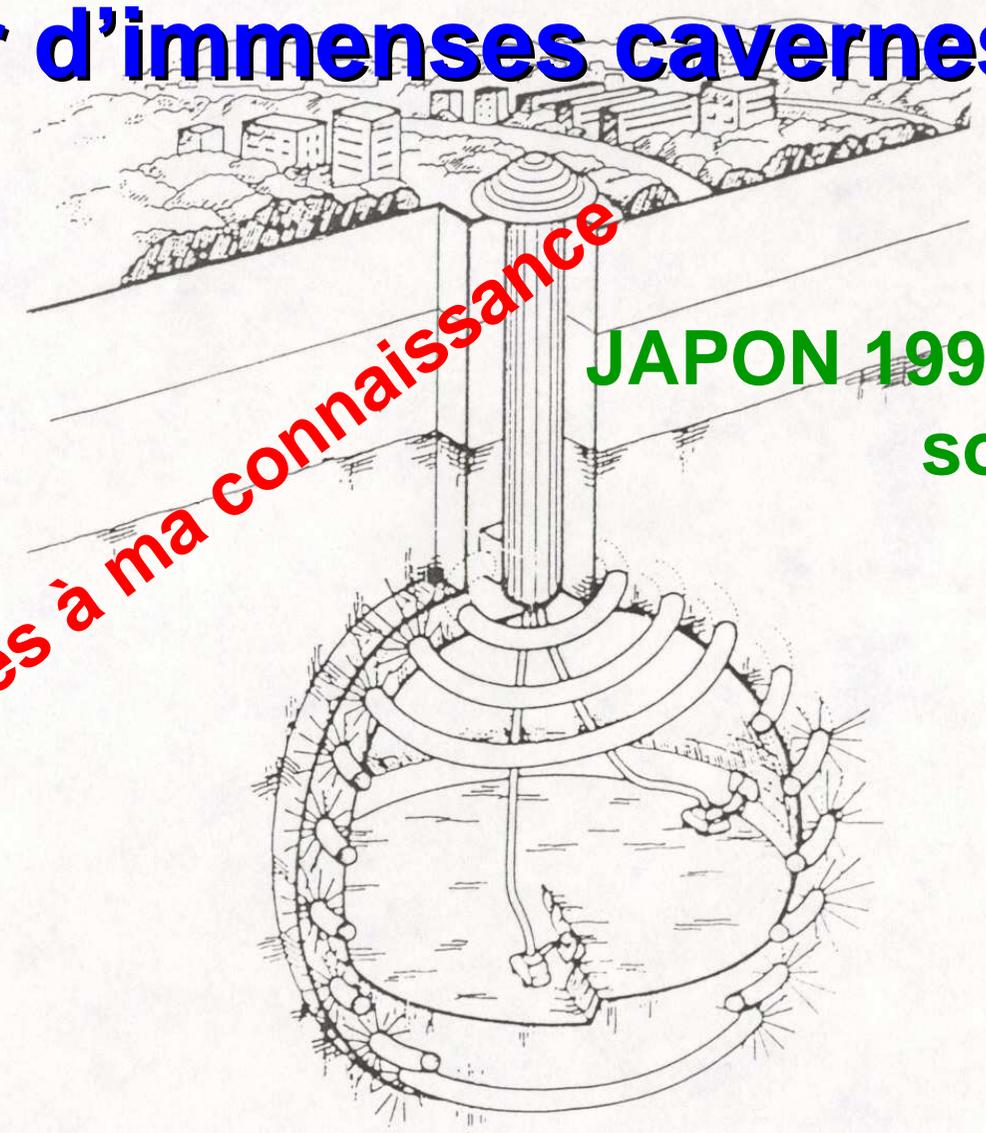


# méthodes proposées pour créer d'immenses cavernes

SUEDE 1980  
roche



JAPON 1994  
sol



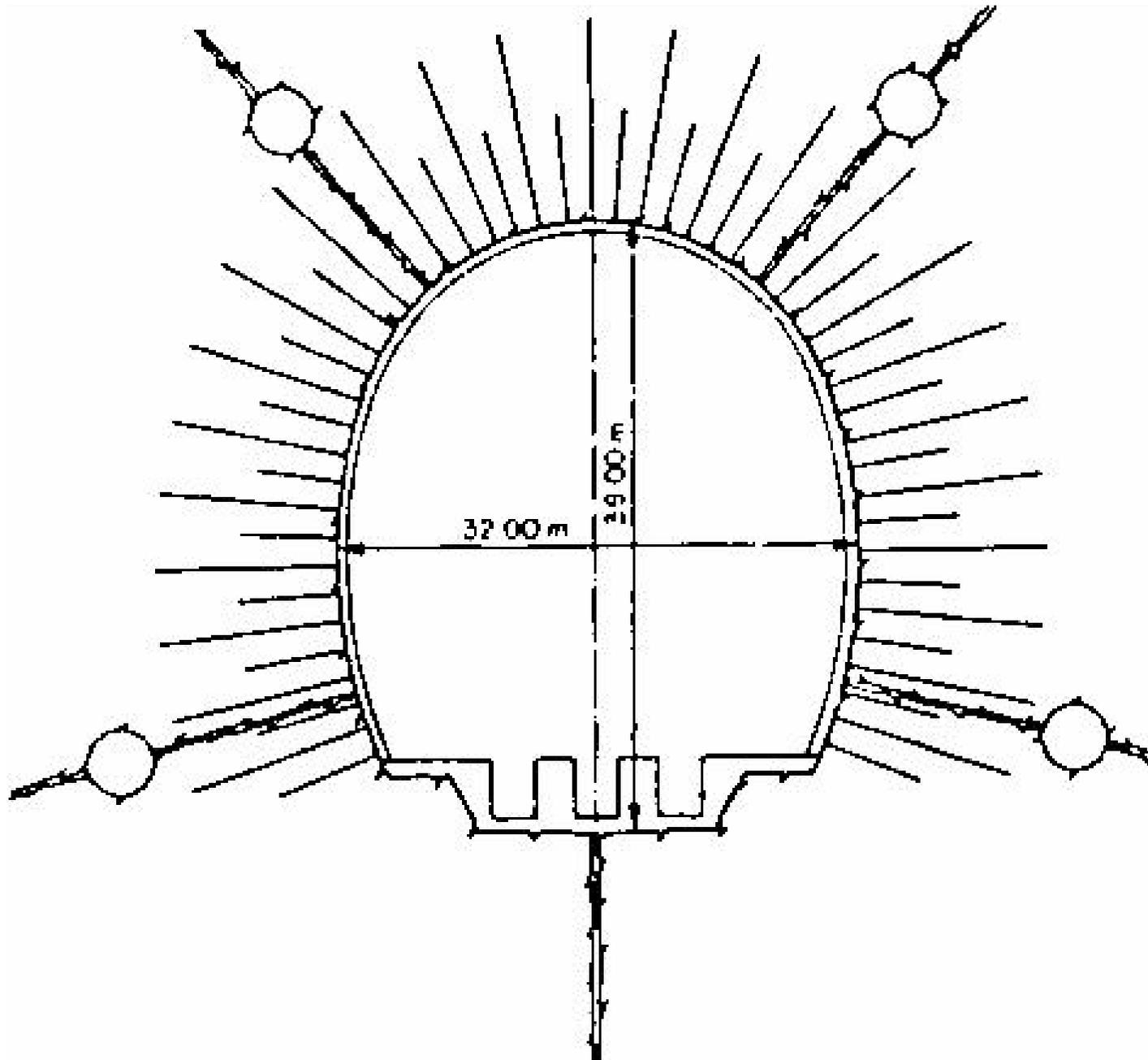
*jamais encore utilisées à ma connaissance*

portée 50 m  
hauteur 65 m

AFTES/CFMR 7:12:2006

diamètre 50 m

30



**CAVERNE**  
dessinée par  
**G. LOMBARDI**  
pour le  
laboratoire  
à neutrinos du  
Gran Sasso  
**(ITALIE)**

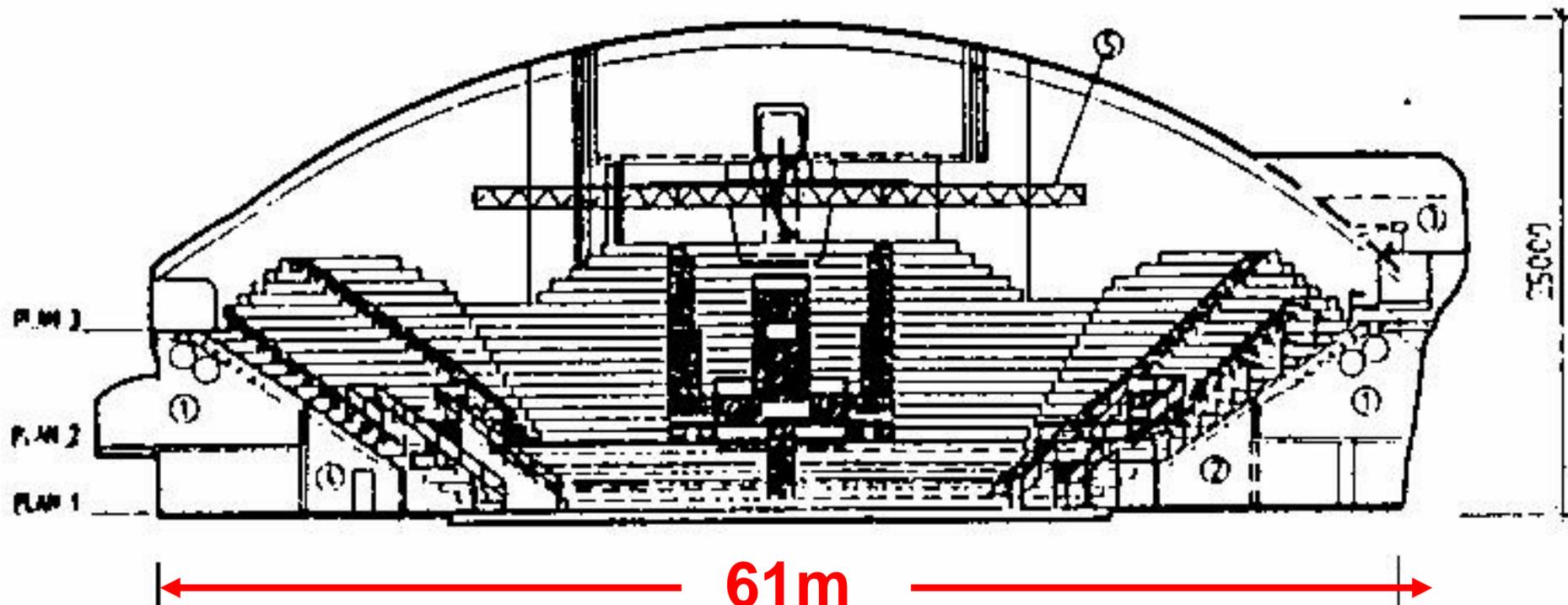
**32 x 39 m**

**symposium  
international  
de Florence  
1986**

**(pas réalisé)**

# CAVERNE de GJØVIK, NORVEGE

## JEUX OLYMPIQUES d'HIVER 1992



# Gjøvik : « Olympic Mountain Hall »



61 m

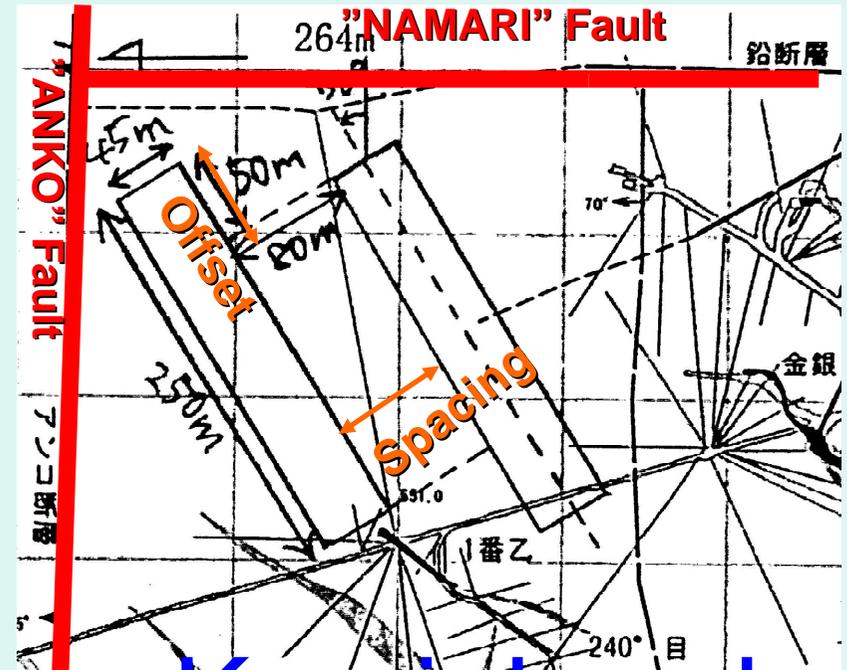
plus grande portée en génie civil sous 30 m granite



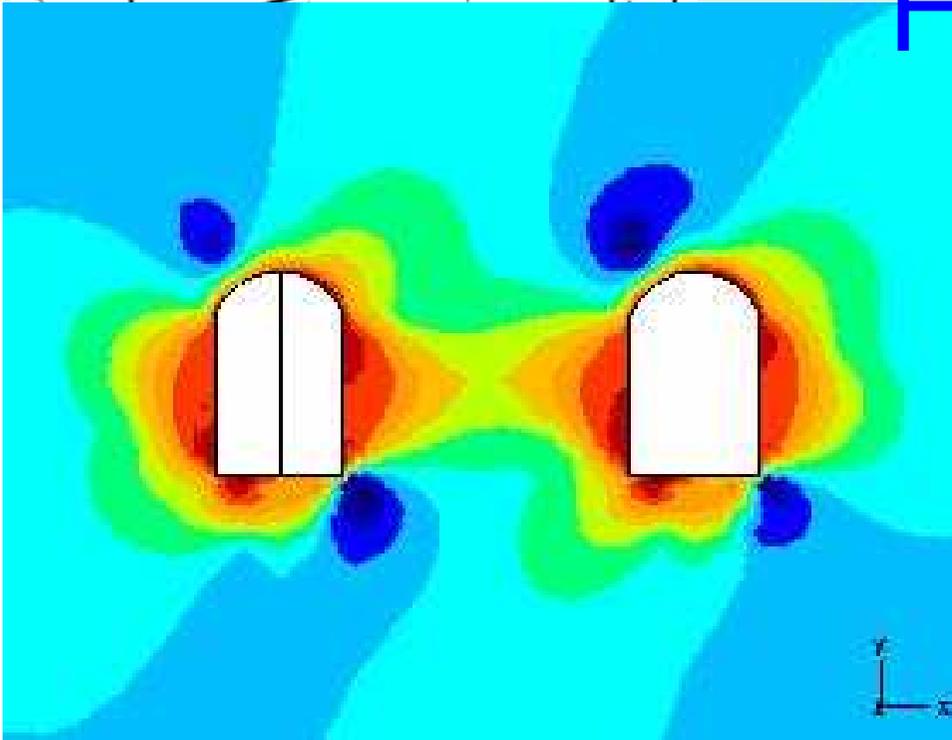
# Superkamiokande 30 000 m<sup>3</sup>

la plus grande caverne  
jamais mise en service  
pour les neutrinos,  
mine Kamioka, Japon

(photo ICRR, U-Tokyo)



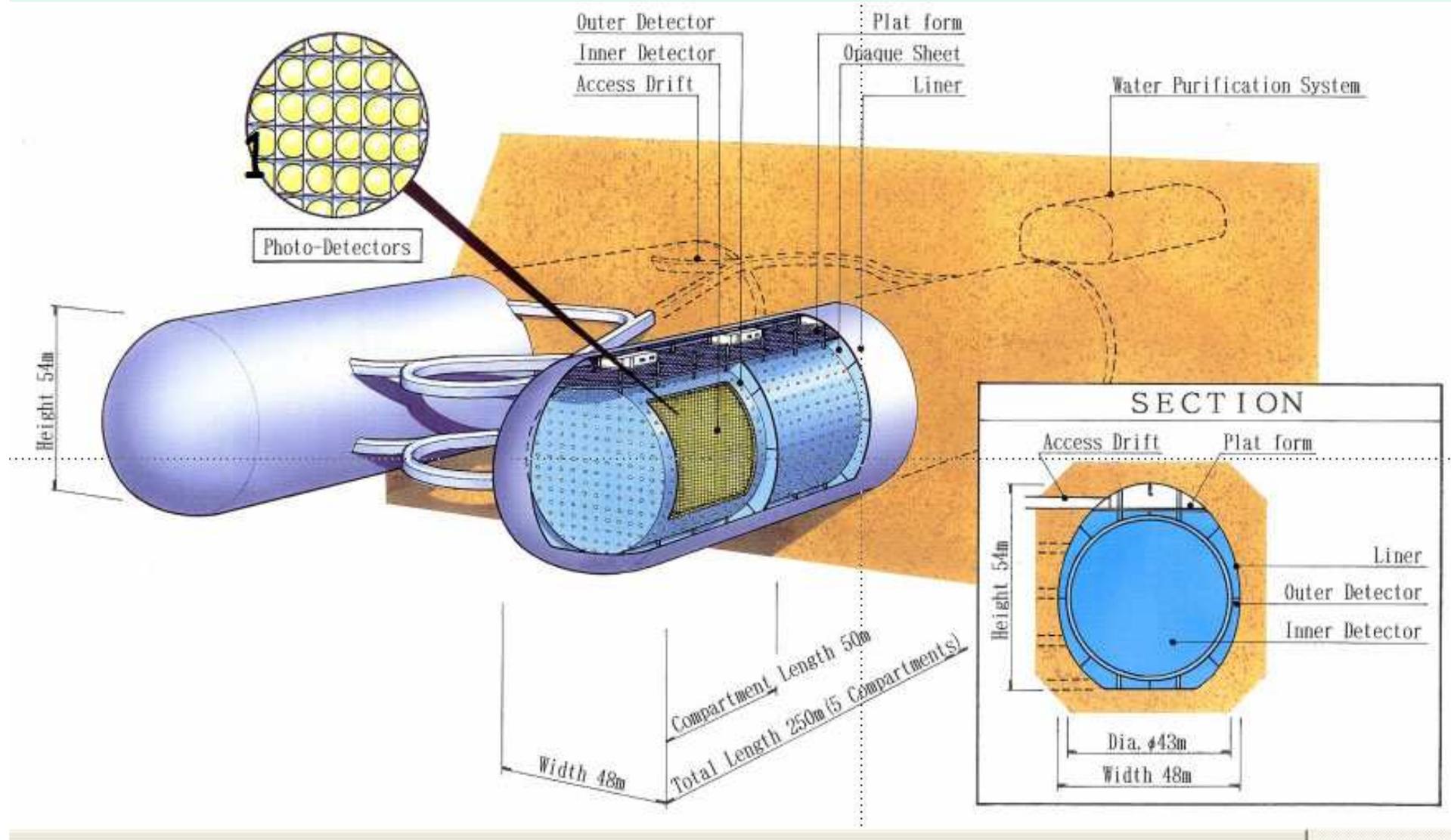
# Hyper Kamiokande



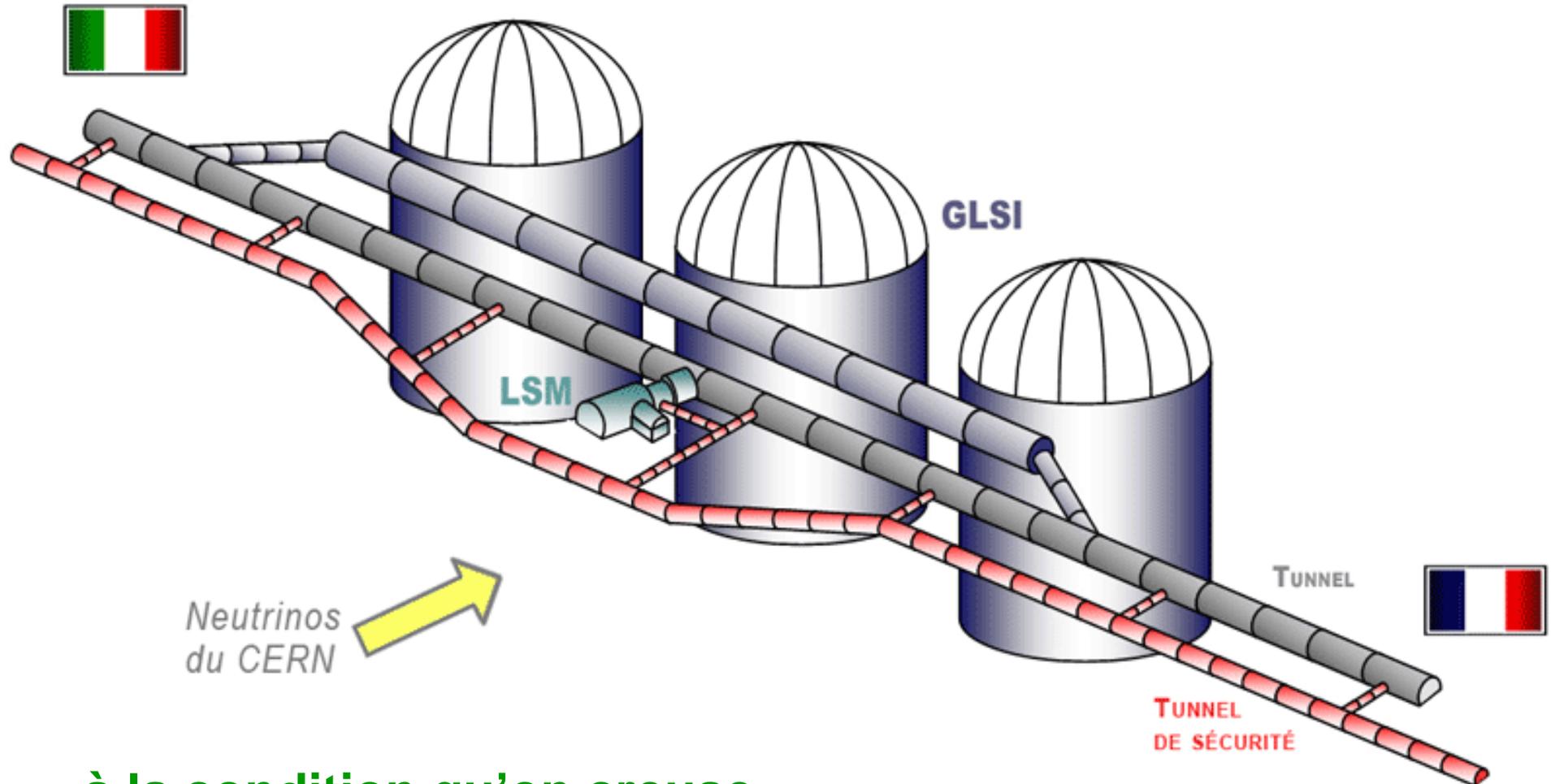
**espacement 100m  
décalage 100 mm**

**au vu des failles reconnues aux  
environs immédiats, espacement  
80m décalage 50 m**

# Projet Hyper Kamiokande, Japon



# Projet Fréjus



à la condition qu'on creuse  
au Fréjus une deuxième galerie, AFTES/CFMR 7:12:2006 de circulation ou de sécurité 37

## **3. maîtrise des contraintes**





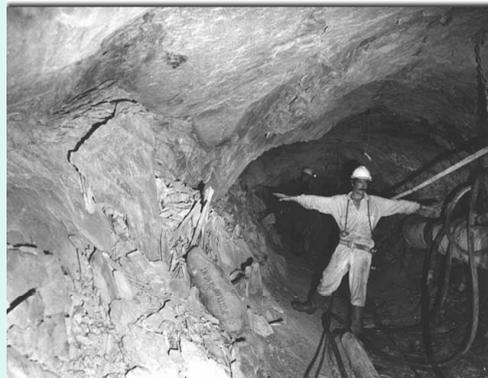
PHOTO BORIE  
3440 m from France

# DECOMPRESSION au TUNNEL du MONT BLANC

AFTES/CFMR 7:12:2006



Evolution d'une galerie  
à très grande profondeur



Afrique du Sud  
photo D. Ortlepp, CSIRO

# mines d'or d'AFRIQUE du SUD

évolution de la rupture  
autour de tunnels très  
profonds (~ 3000 m)

photos Daniel ORTLEPP  
CSIRO

# Tunnel du Lötschberg, 2005



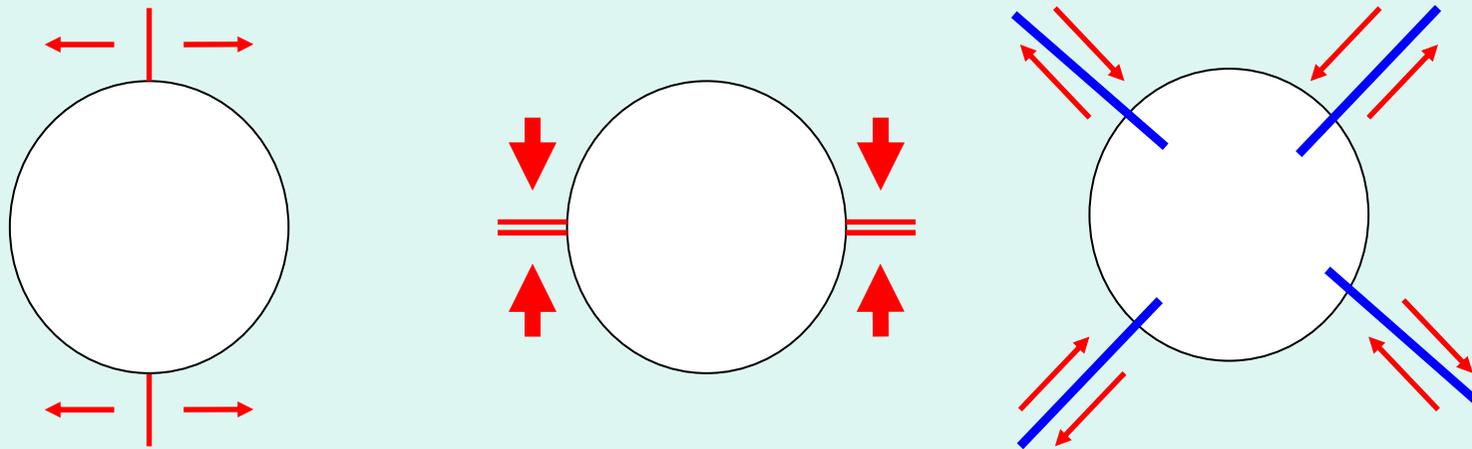
courtoisie Bonnard et Gardel

# Tunnel du Lötschberg, 2005

courtoisie Bonnard et Gardel



# 3 mécanismes d'auto-adaptation à tout excès de contrainte



ouverture de joints/ expulsion d'argile/ glissement sur joints

ces défauts jouent le rôle de  
soupapes de sécurité

# au tout début du CFMR

**le toit**

**Édouard Tincelin**

nous a montré l'écaillage  
des angles entre toit et pilier,  
et sa prévention par une rangée  
de forages de détente dont les  
cloisons vont s'écraser



**le pilier**

éliminant l'excès local de compression par une « saignée »  
le mot même du médecin de Molière, contre l'hypertension



**les cavernes de stockage de Gargenville dans la craie ont montré cet écaillage à l'angle piedroit-radier**

**GEOVEXIN photo Géostock**

# le chantier qui m'a appris le comportement du terrain autour des tunnels profonds



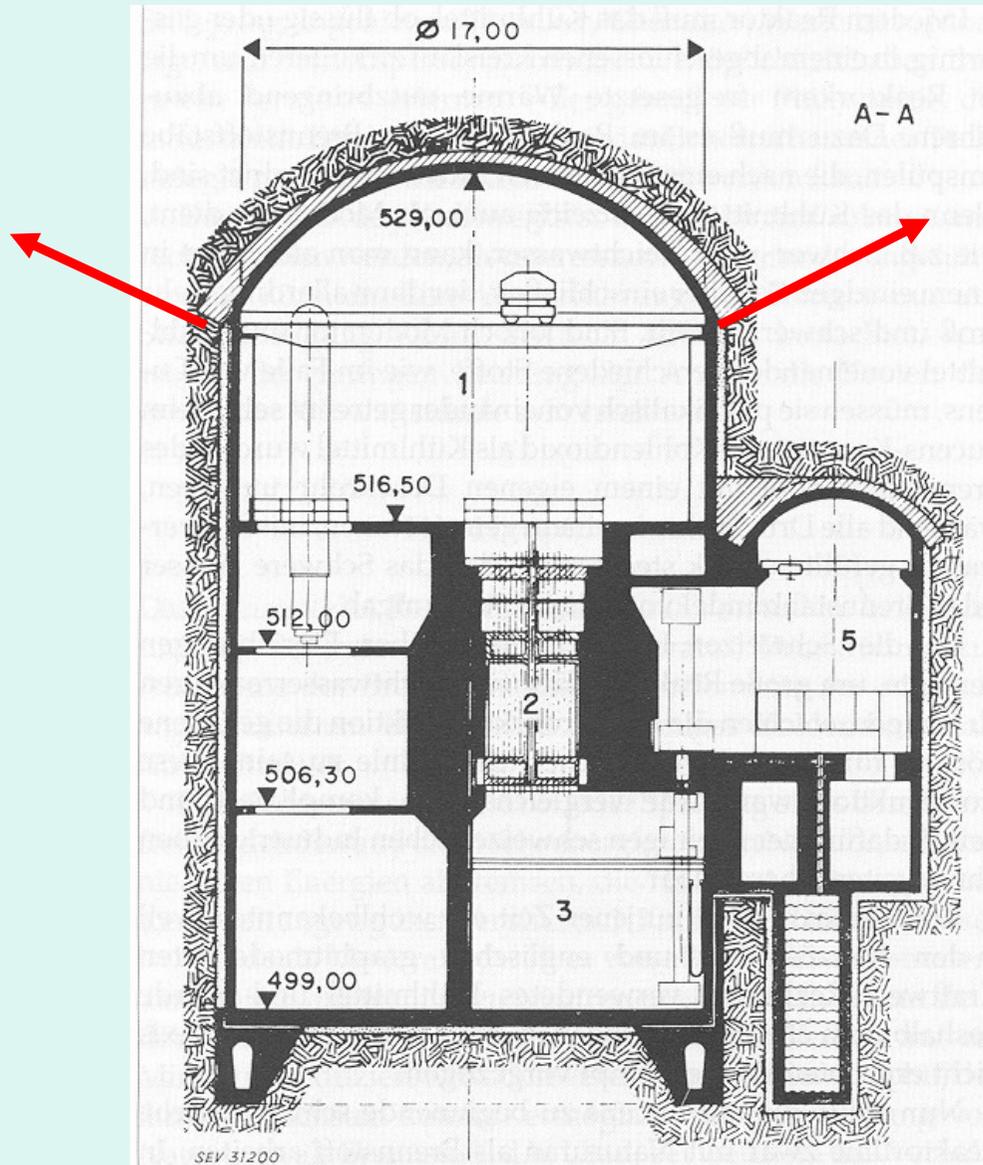
**comportement des schistes du LANOUX**

# le cas des schistes du LANOUX

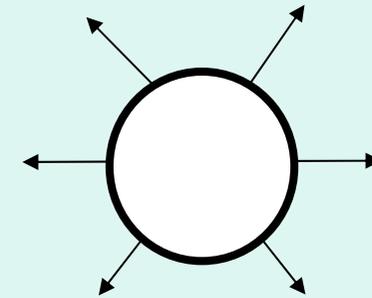
1958-59

- galerie presque parallèle à la schistosité
- aucun problème jusqu'à 300 m de profondeur
- puis un **flambement** apparaît, contenu par des boulons (fréquemment cassés) et des cintres (souvent très déformés)
- le gabarit du coffrage étant engagé, il va falloir réaléser, une opération hautement inquiétante
- aucun éboulement n'a lieu, à la surprise de tous
- **le terrain avait épuisé son besoin de déformation, la déformation des schistes avait ramené la contrainte tangentielle à un niveau supportable**

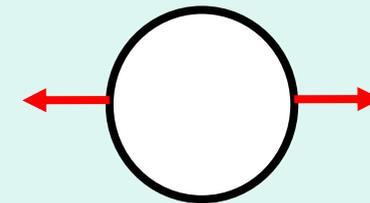
## saignées autour d'une caverne



## saignées autour d'un tunnel



réduites à deux  
si l'anisotropie  
est importante



# Usines souterraines

- 1959 : en Australie, Tumut 1 (à 366 m de profondeur) inaugure l'usage des saignées en génie civil
- 1965 : à la Réunion, Takamaka donne des soucis, je suggère à J. Talobre les saignées de Tumut, et ça marche (pour une salle d'usine nettement plus petite)

# Usines souterraines et tunnels

- 1958 : la galerie EDF « Ariège-Carol » sous le col de Puymorens traverse des roches écrasées qui s'extrudent entre les cintres métalliques, puis qui écrasent une maçonnerie en blocs de béton jusqu'à ce qu'un ancien mineur de charbon propose de **séparer les blocs par des planchettes de bois :**

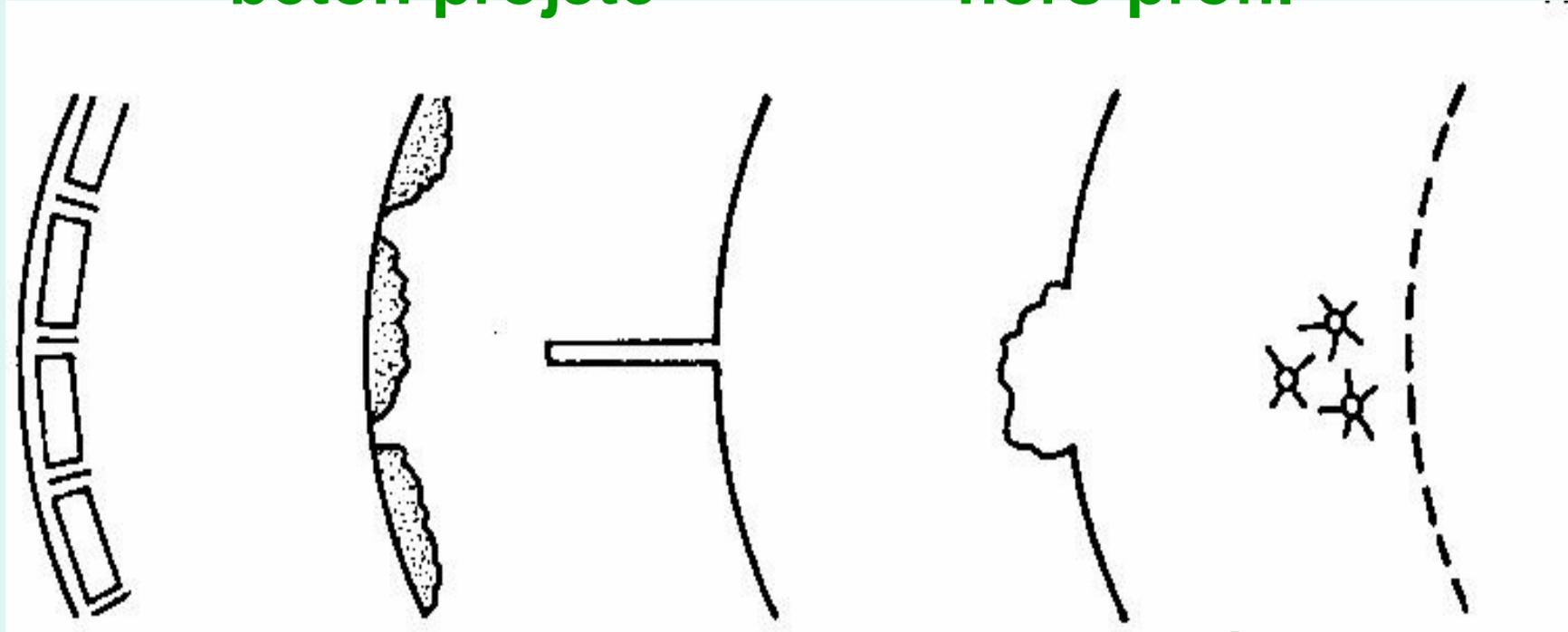
***en s'écrasant, elles éliminent l'excès de contrainte***

- 1965 : au Tauern routier, Léopold Müller combat la rupture du béton projeté en laissant des génératrices nues sur lesquelles la déformation se concentre, et s'arrête (ainsi que le flambement des cintres)

# comparaison de 5 artifices

béton projeté

hors-profil



planchettes

saignée

tirs en avant  
du front

*La géotechnique et le creusement mécanisé des tunnels*

DUFFAUT et al., 1974, Ann. ITBTP, n°322

# comparaison de 5 artifices

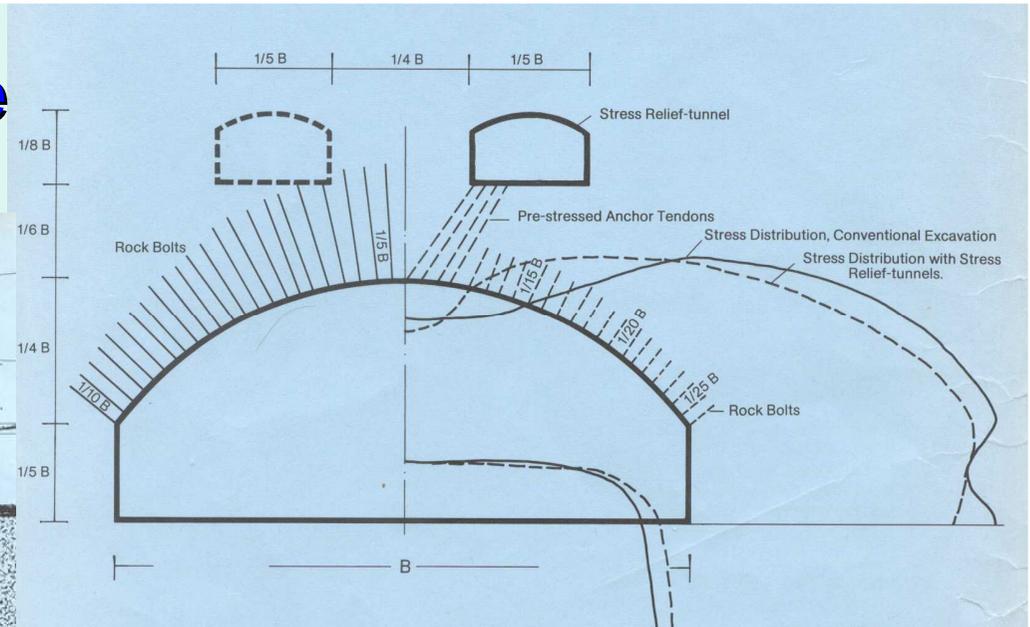
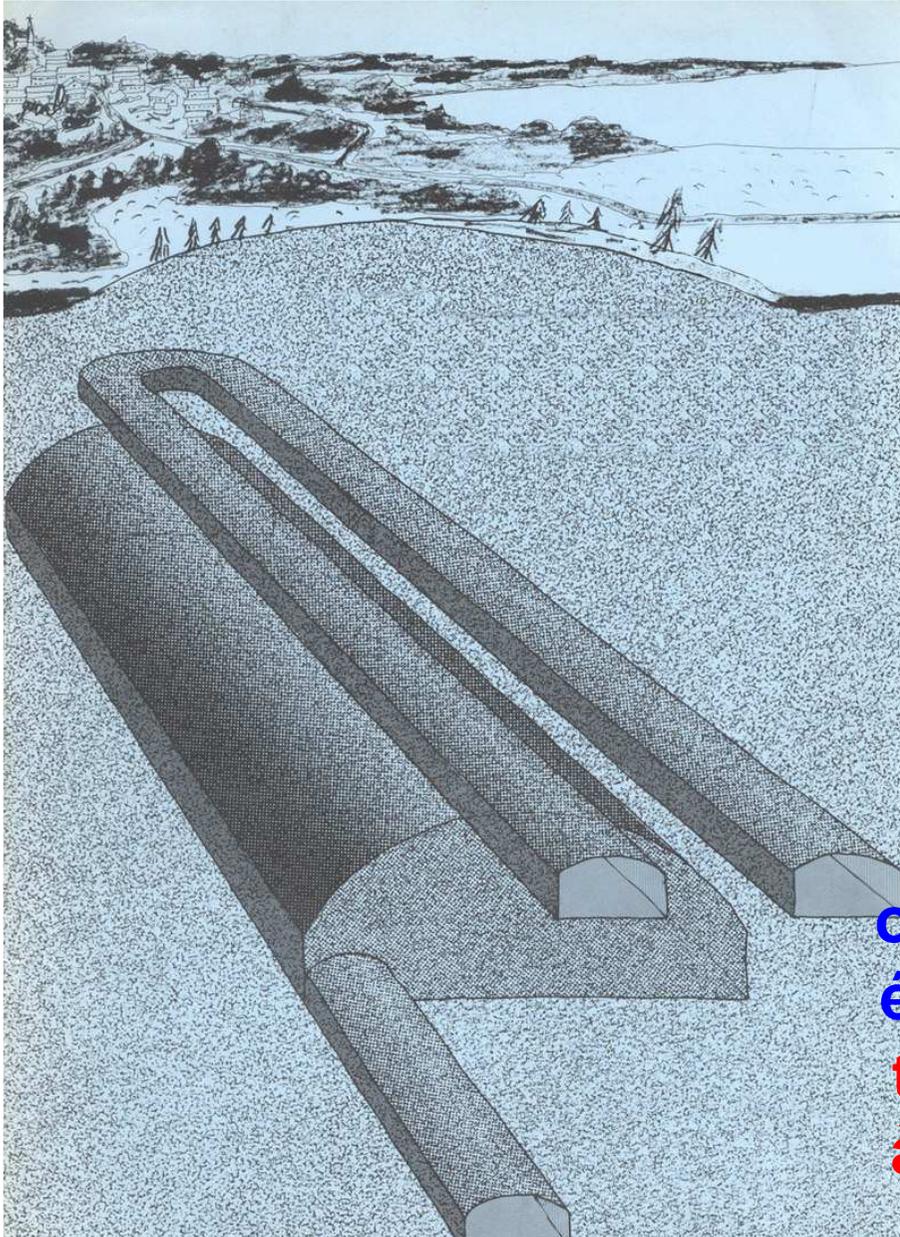
pour « *donner du mou* » ou « *prévoir des soupapes* »

- cintres coulissants (classique en mines)
- écrasement de planchettes (connu en mines)
- interruptions dans le béton projeté (Tauern)
- saignées
- hors-profils volontaires (Müller)
- fracturation à l'explosif en avant du front

# comment appeler ces artifices ?

- maîtrise des contraintes
- stress-control (ou strain-control)
- pour celui qui démonte une arme à feu, il s'agit d'enlever le ressort de la détente avant que l'appareil vous saute à la figure
- c'est de la **précontrainte à l'envers** (la création de tunnels et de cavernes étant bien déjà une construction à l'envers)

# brevet SELMER, Norvège



deux galeries préalables encaissent l'excès de contrainte en clé de voûte et « font de l'ombre » à la caverne

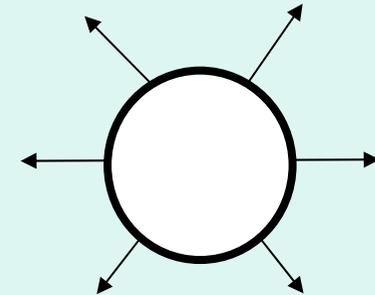
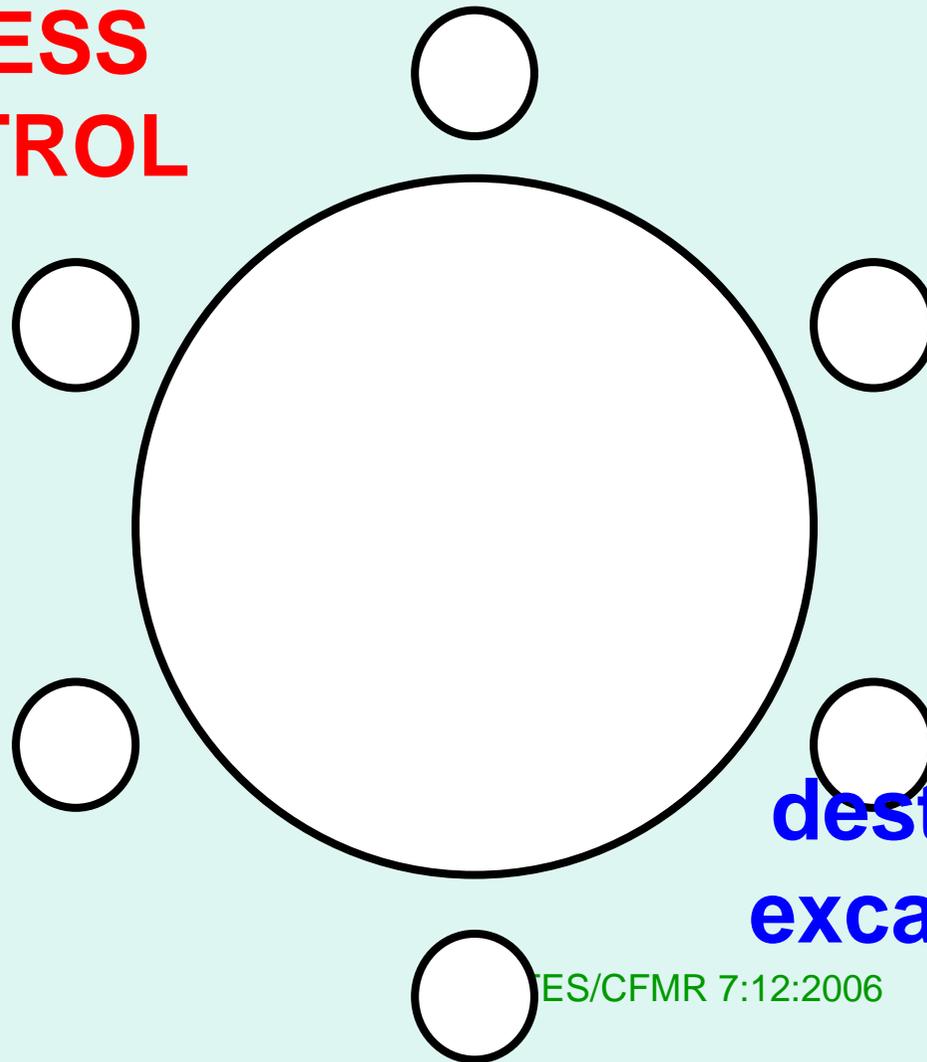
cf. arcs de décharge au-dessus des fenêtres dans un mur en maçonnerie

on ignore toujours si ce procédé a été utilisé ; la caverne de **GJØVIK**, très superficielle, doit sa stabilité à une forte contrainte horizontale

# changement d'échelle

destressing cuts  
from the tunnel

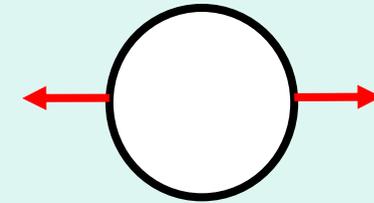
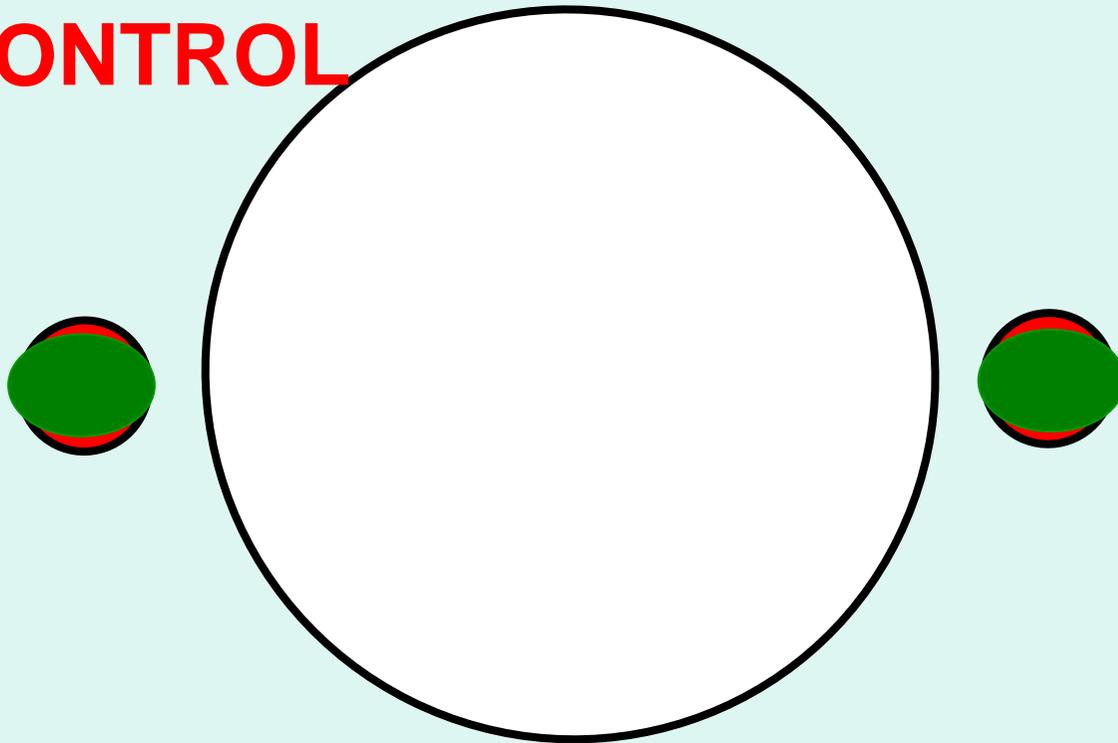
**STRESS  
CONTROL**



destressing tunnels  
excavated before the  
main one

# changement d'échelle

**STRESS  
CONTROL**

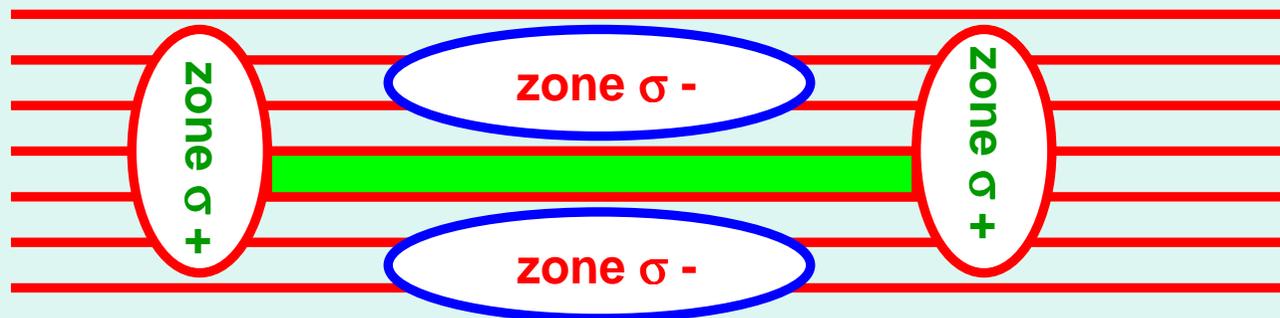


**the less brittle the rock,  
the more easily the stress be controlled**

fortunately, any  
**anisotropy**,  
of rock or of stress,  
will decrease the  
number of cuts or  
tunnels from five or  
six to one pair

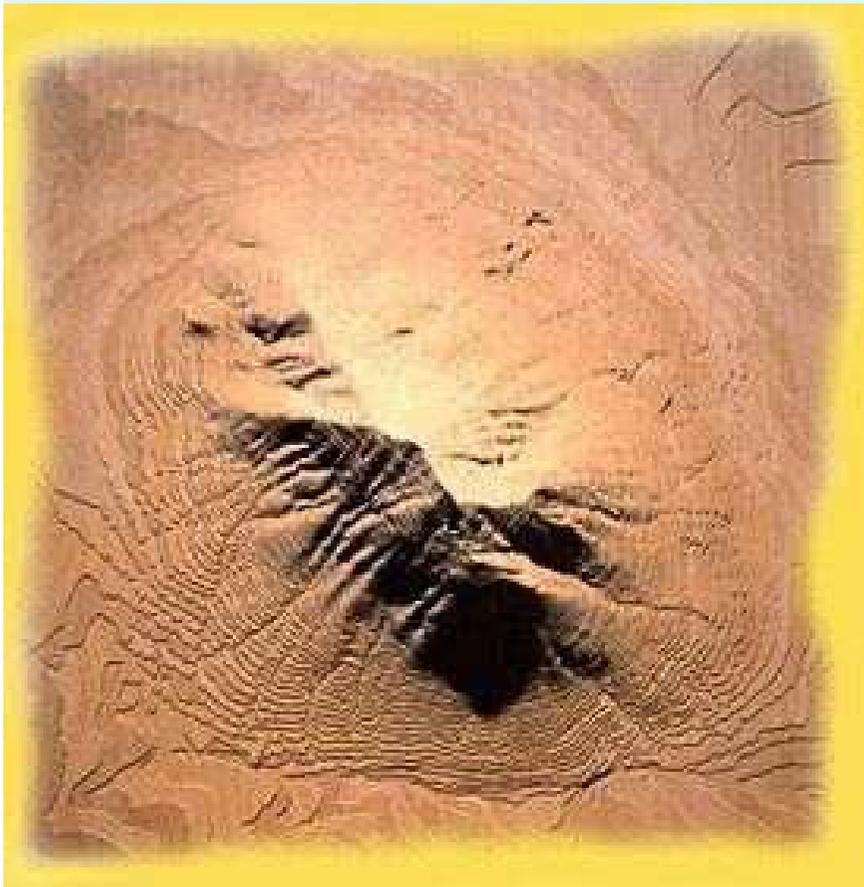
# en mine, c'est bien connu :

- en face d'un panneau exploité, les couches de part et d'autre sont déchargées
- mais autour de son périmètre, règne au contraire une zone de surcontraintes



## 5. conclusions

AFTES/CFMR 7:12:2006



**E. CHILLIDA SCULPTEUR**

**PRESQUE un CUBE 45-50-60 m**

• une GALERIE d'ACCÈS, vers l'horizon  
• deux Puits (vers le soleil et la lune)

**PROJET ARUP, prévu pour 2007**

**TINDAYA**

**FUERTEVENTURA**

**CANARIES, ESPAGNE**



# restons raisonnables

- des cavernes multiples exigeraient un grand espacement
- même avec un grand espacement, la stabilité des premières sera menacée par le creusement des suivantes
- beaucoup pensent que les granites sont les meilleurs candidats
- la déformation des roches schisteuses, comme au Fréjus, devrait faciliter la précontrainte négative avant l'excavation
- le sel gemme serait meilleur encore !
- la caverne mégatonne reste un **défi extraordinaire... à relever ?**

**JOYEUX NOËL et BONNE ANNEE**

**SINAÏ : LEVER de SOLEIL sur le Mont MOÏSE**