

Cavernes artificielles pour l'énergie

Pierre Duffaut

homme des cavernes ???

Cavernes artificielles pour l'énergie

Pierre Duffaut

1954 : doc. interne EDF: « Réflexions sur les centrales souterraines »

2011: « Large Caverns, Design and Construction » URL workshop, Pekin

2014 : Dossier be 5358 chez Techniques de l'Ingénieur

Workshop on URL, Pekin ISRM Conference, 2011

Large caverns, design and construction

P. Duffaut

Expert in Geological Engineering, French Committee on Rock Mechanics. E-mail: pierre.duffaut@dbmail.com 

Keywords: Caverns, Geology, Rock Mechanics, Nuclear plants

ABSTRACT: Instead of any recent discoveries, the cases presented support ideas matured along sixty years familiarity with underground works: depending on the depth, the most important factor of success is to find the best fit between the shape and orientation of a cavern on one hand, the anisotropies of the rock mass, and the stress field on the other one. Joints and faults play the first role at rather shallow depth; the behaviour of the rock mass under stress gains more importance with increasing depth. Collection of geological data is indeed the major prerequisite for any cavern design. Means for coping with high stress are recalled. As distance between caverns plays more in situ than into models, groups of caverns may be far less stable than isolated ones. Underground siting of any hazardous depots and activities brings the highest safety level, including for nuclear power plants.

be8583

Cavernes artificielles pour l'énergie - Pourquoi et comment ?

Date de publication 10/04/2014

Par :

Pierre DUFFAUT

Ancien président du Comité français de Mécanique des roches, Ancien vice-président de l'Association française des Tunnels et de l'Espace souterrain

1. Modèles offerts par les cavernes naturelles : les grottes	BE 8 583 - 3
1.1 Types de terrains concernés	2
1.2 Formes et dimensions	
2. Modèles offerts par les mines et carrières	
2.1 Formes et dispositions des volumes hérités des mines	
2.2 Chambres et piliers en couches à faible pendage	
2.3 Cas particulier	
3. Usages modernes et procédés de construction	
3.1 Usines hydroélectriques dont usines réversibles	
3.2 Cavités de stockage	
3.3 Usages ferroviaires et assimilés (gares, triage)	
3.4 Autres cavités (abris, science, sports, culture)	
4. Demandes et recherches récentes	
4.1 Domaine « énergies d'avenir »	
4.2 Domaine astrophysique, neutrinos, matière	
4.3 Projets scientifiques multidisciplinaires (D)	
4.4 Cas particulier de l'énergie nucléaire	
5. Approches théoriques et technologiques	
5.1 Approche théorique	
5.2 Approche technologique	
6. Synthèse et perspectives	
6.1 Importance des structures géologiques	28
6.2 Forme des cavernes	29
6.3 Mégalocavernes et centrales nucléaires souterraines	
7. Conclusion	29
Pour en savoir plus	Doc. BE 8 583

les débuts : centrales d'EDF
 les voyages : autres pays
 les stockages d'hydrocarbures
 la physique des particules
(du CERN aux neutrinos)
 « les centrales nucléaires ... »

La Verna, Pyrénées Atlantiques,
découverte par Haroun Tazieff
Montage ATM3B



Mégalocavernes et centrales nucléaires souterraines

les débuts : centrales d'EDF

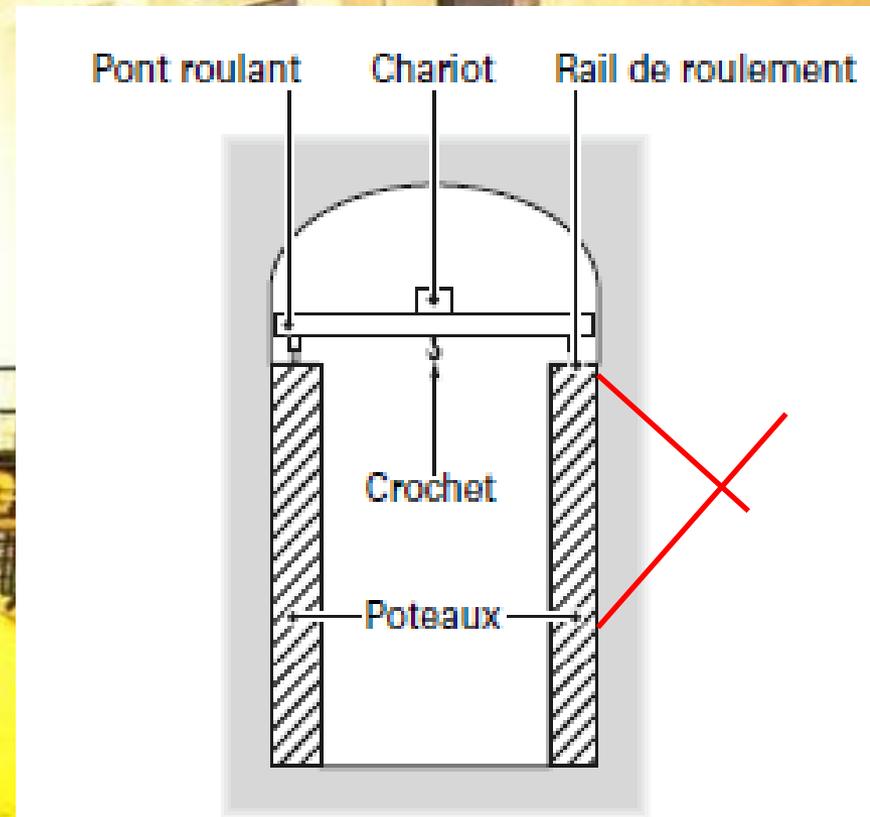
les voyages : autres pays

les stockages d'hydrocarbures

la physique des particules (*du CERN aux neutrinos*)

les centrales nucléaires ...

Montpezat (Ardèche) chute 635 m en creusement en 1949 dans du granite



Ⓐ sur poteaux de béton
à Montpezat, Ardèche 1960

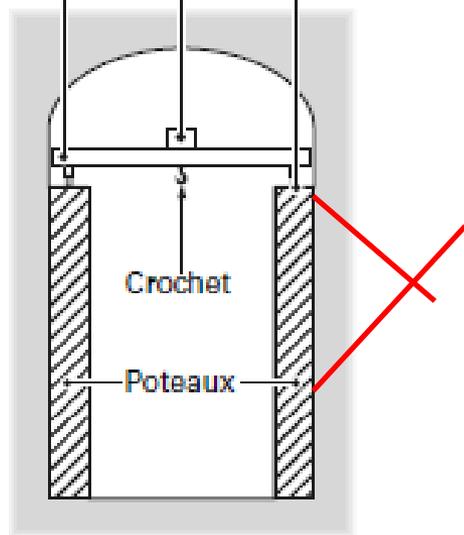
Centrales souterraines d'EDF

- J'ai été fasciné par **l'inconscience** du projeteur, qui croit pouvoir dessiner n'importe quoi, et de l'entrepreneur, qui croit pouvoir le réaliser n'importe comment !
- Puis par **la trouille** qui les saisit au premier éboulement (la rupture de ce piédroit), au point de placer un **tabou** durable sur les grandes portées !
- Ma note de réflexions en 1954 contient un **conseil** :
- évitons de matraquer le rocher autour de la cavité, puisqu'il en constitue l'enveloppe ;
- et une **question implicite** :

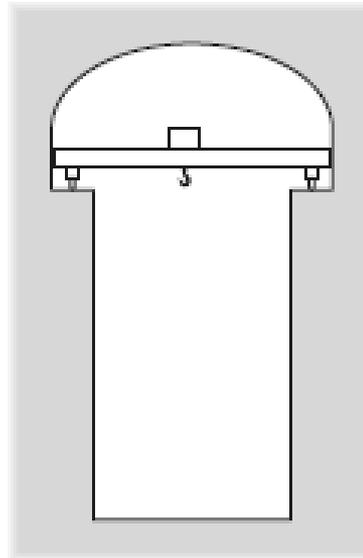
Contre quoi calculer un revêtement en béton ?

Pour une même largeur utile, deux portées de voûte différentes

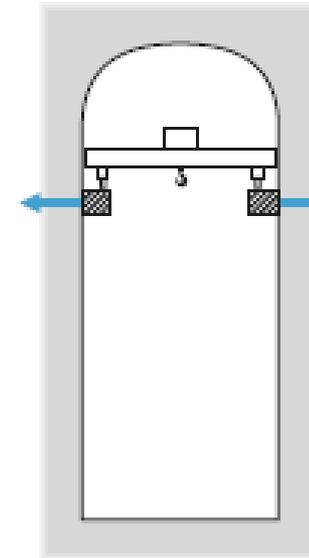
Pont roulant Chariot Rail de roulement



(a) sur poteaux de béton à Montpezat, Ardèche 1960



(b) sous voûte « champignon »



(c) sur poutres ancrées aux parois

b appelle des tirants pour renforcer le haut des murs verticaux
c autant les charger de fixer les poutres de roulement du pont

Centrales souterraines d'EDF

- Dessins en **ovoïdes** et fonds de chaudières : pour éviter les parois planes, il faut les arquer
- Essais pour modérer l'effet arrière de l'explosif, du « tir calme » au **prédécoupage**
- Modèles pour étudier les piliers entre cavernes
- Comment calculer un revêtement en béton ?
(pression intérieure, extérieure, séisme ?)



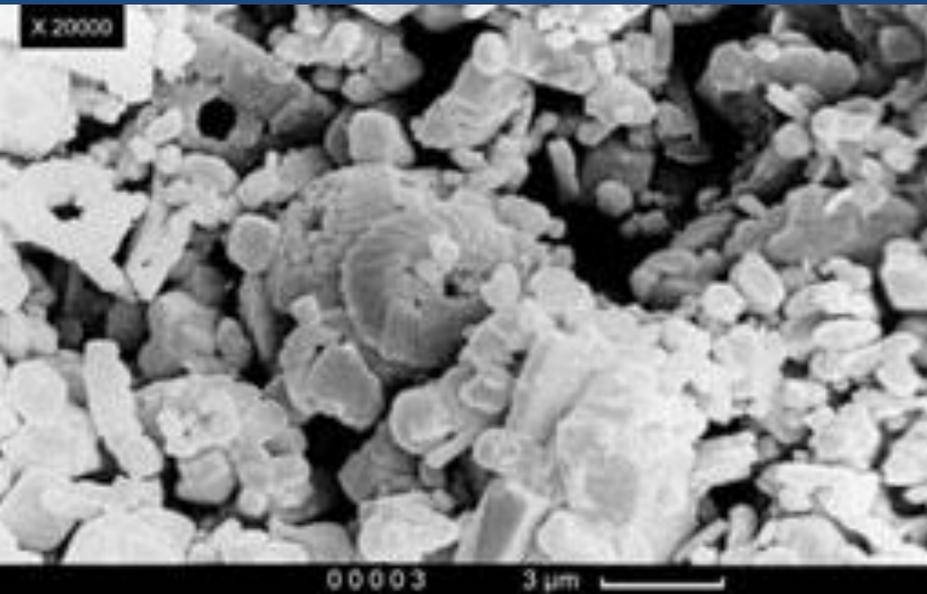
DURANCE
Centrale de ORAISON
Poudingue de Valensole
Site des Mées

Centrale de Sisteron
Calcaire marneux
sensible à l'hygrométrie
Essais de conservation à
diverses ambiances



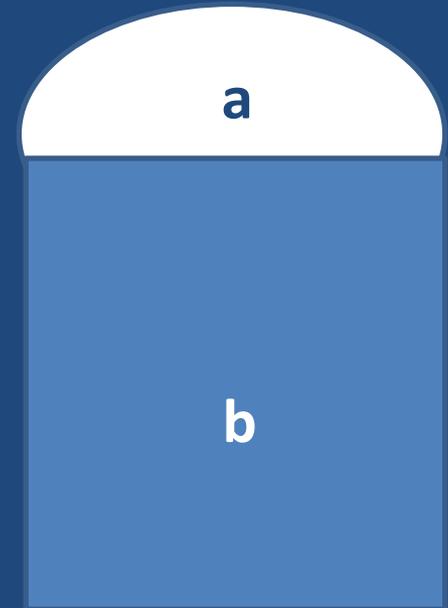


Venteuil-Tincourt dans la craie nous mène à Petit-Couronne



I. Photo de la craie au microscope électronique

Après observation d'une rupture de la voûte en béton à TUMUT, Australie



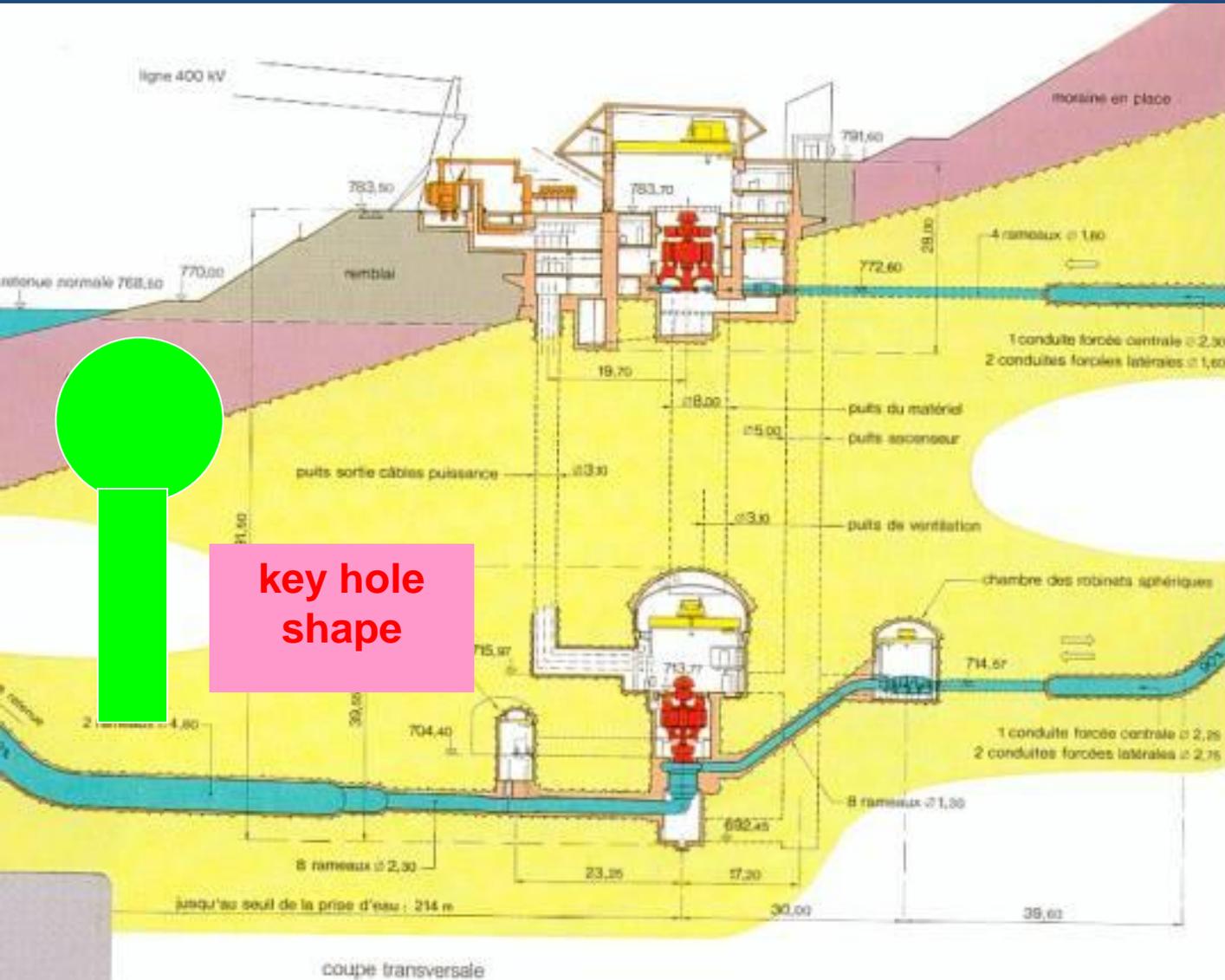
2. Modèle réduit pour l'étude de la déformation de la voûte lorsque la section change, passant de a à b

GRAND'MAISON underground power plant 1800 MW

(Isère)

surface plant
6 Pelton
runners

main plant
4 Francis
runners



les débuts : centrales d'EDF

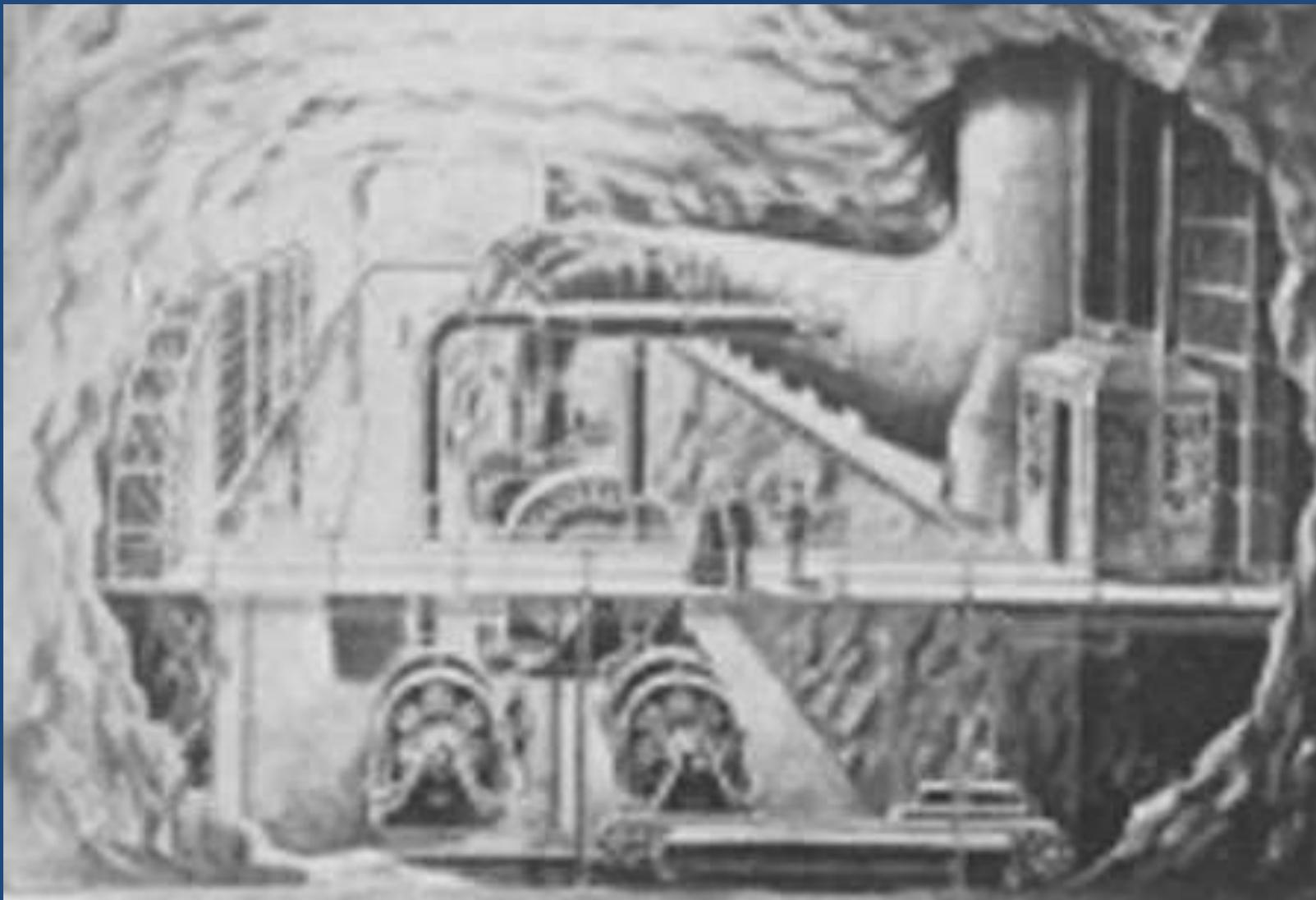
les voyages : autres pays

les stockages d'hydrocarbures

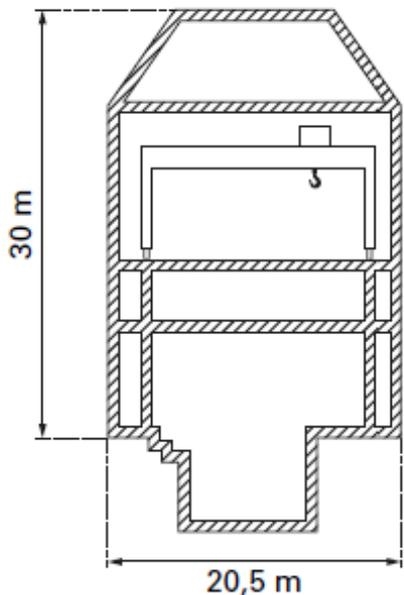
La physique des particules (*du CERN aux neutrinos*)

les centrales nucléaires ...

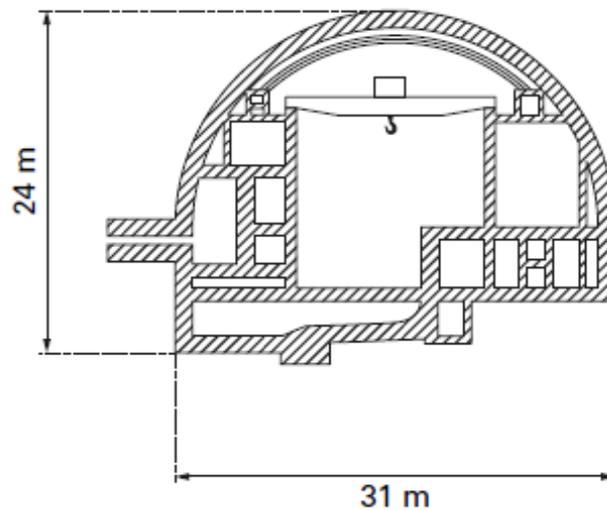
La première centrale hydroélectrique : Snoqualmie, WA, EUA, 1898



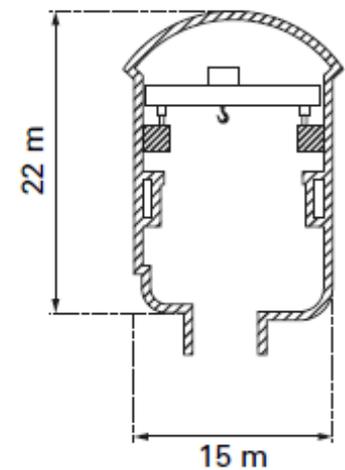
Trois cas de plafond



(a) trapèze à Poatina, Australie



(b) demi-cercle à Huinco, Pérou



(c) arc de cercle à Ritom, Suisse (suréquipement)

**Trapèze en
sédimentaire
horizontal**

**Le demi cercle n'a
aucune justification
particulière**

**Arc de cercle
ellipse aplatie ?
ellipse élancée ?**

Évolution de l'élancement des sections

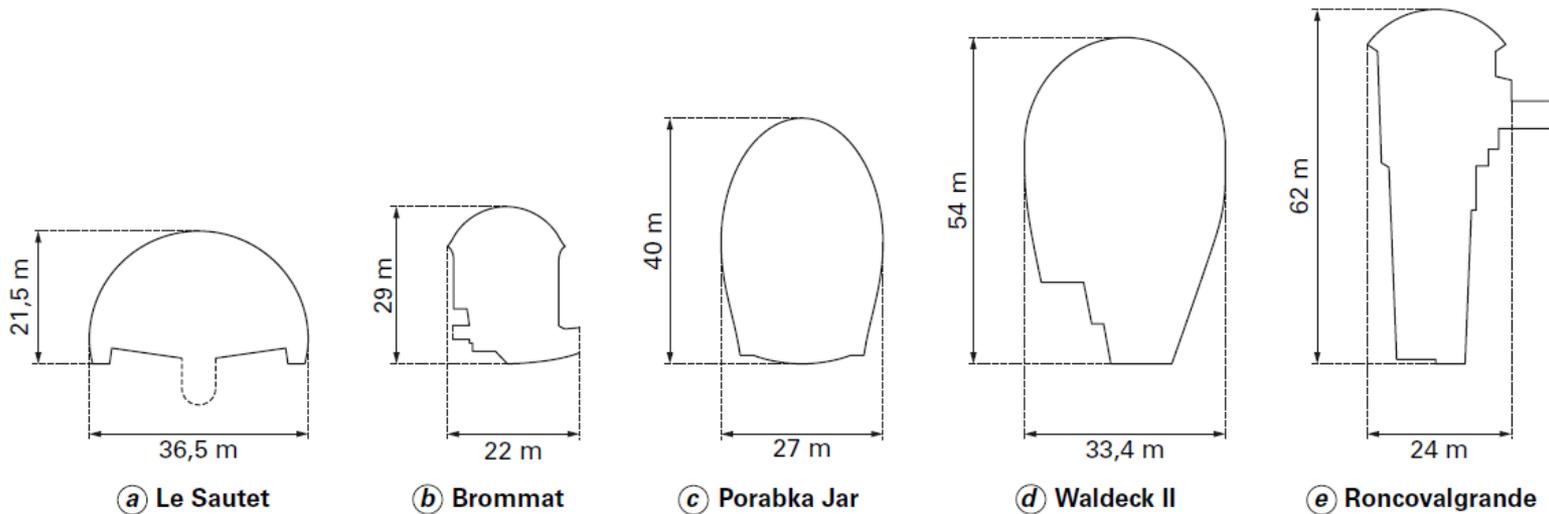


Figure 12 - I

France

France

Pologne

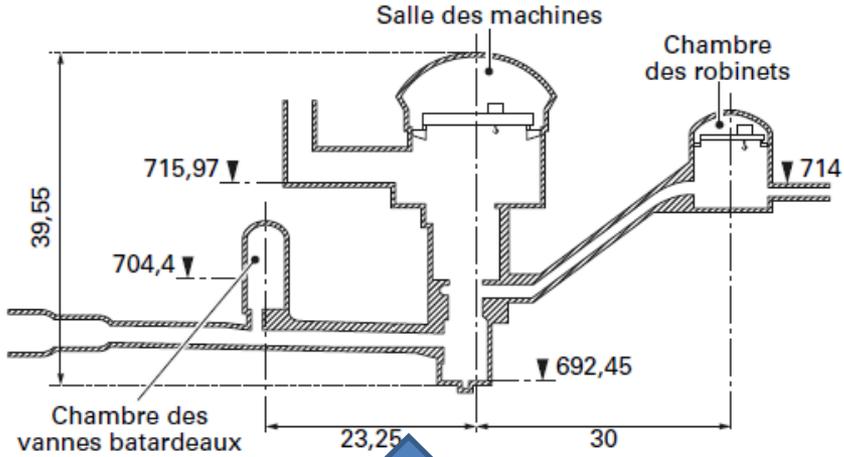
Allemagne

Italie

Petits
groupes à axe
horizontal

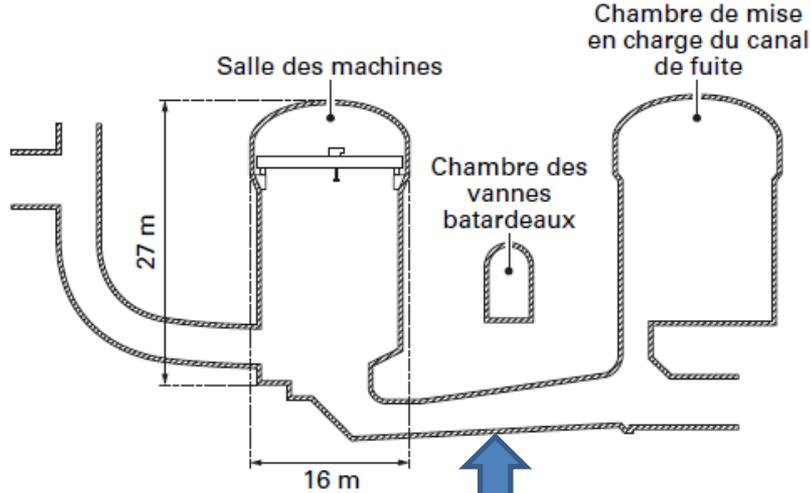
Groupes ternaires
lac inférieur
à niveau variable

Cavernes multiples



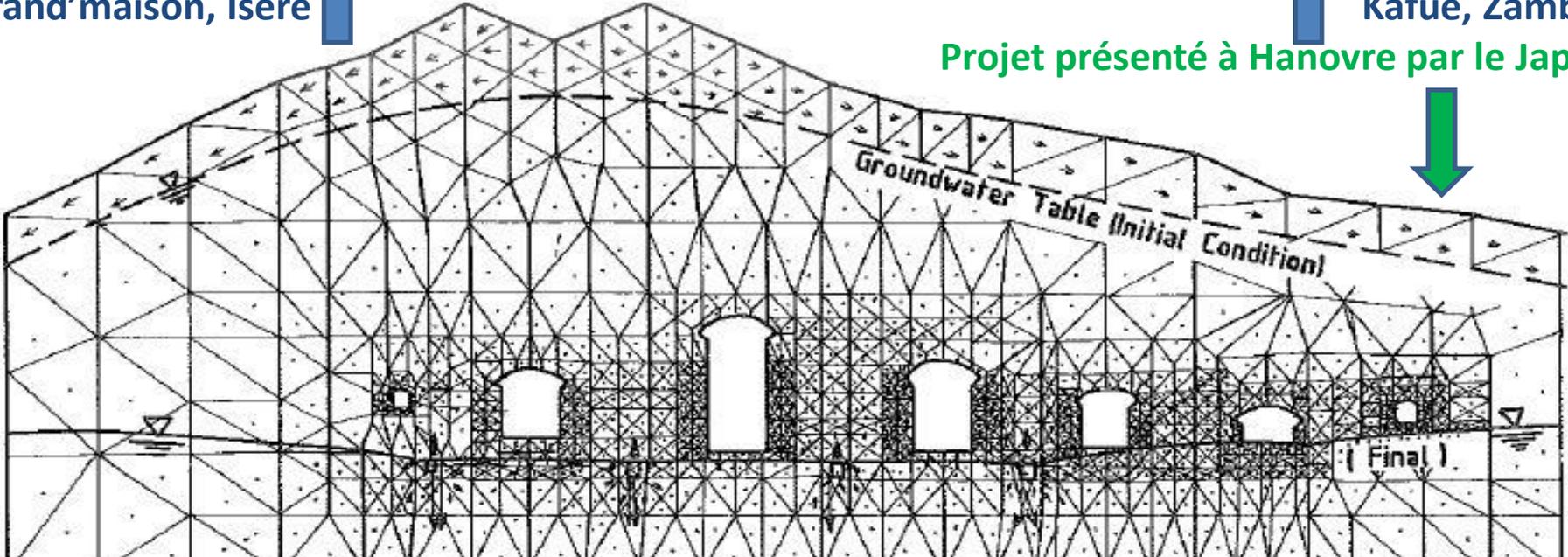
Cotes et altitudes en mètres

Grand'maison, Isère

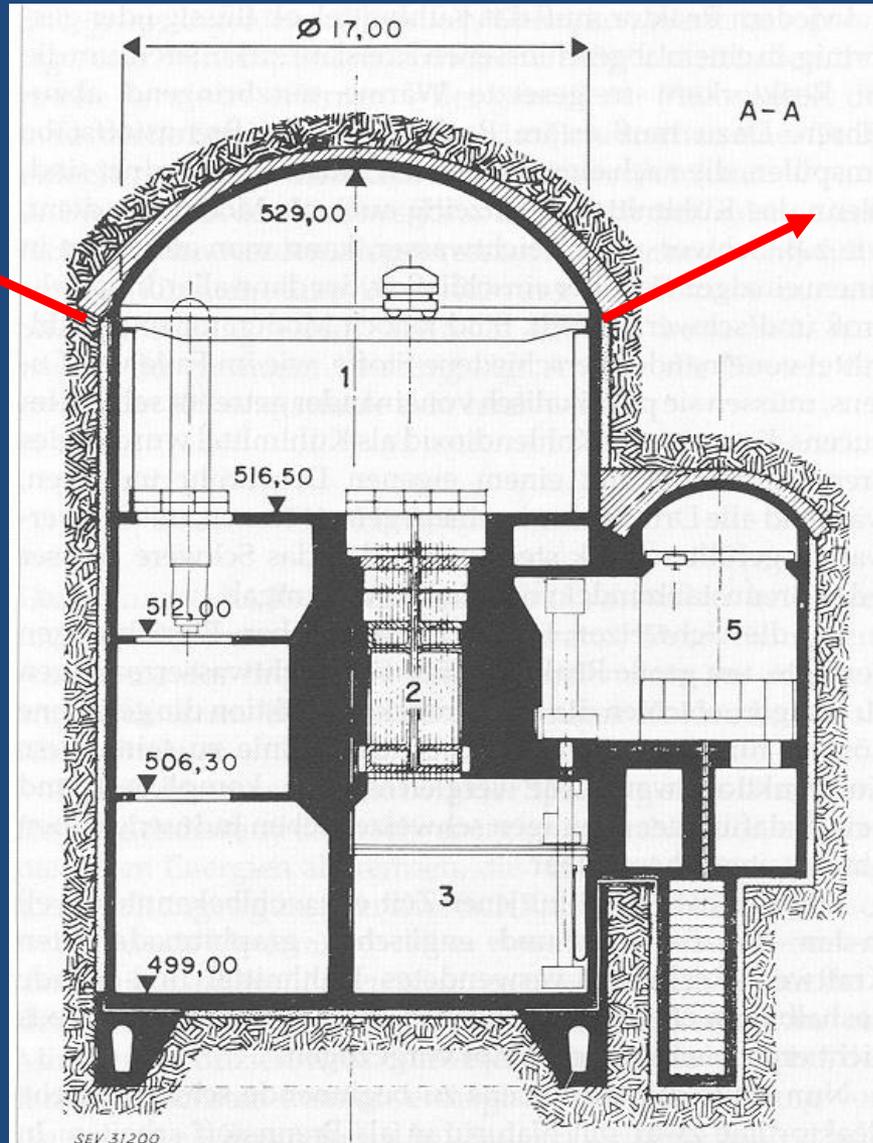


Kafue, Zambie

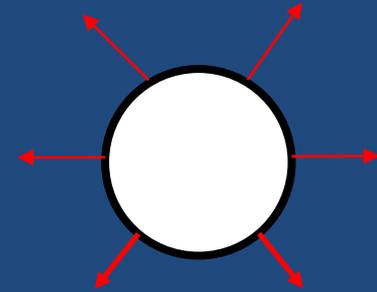
Projet présenté à Hanovre par le Japon



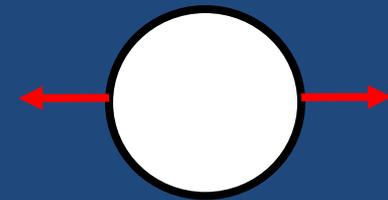
cuts around POATINA cavern



cuts around a tunnel



**two cuts only if
stress anisotropy is
high enough**



IMAICHI

Japon
1984

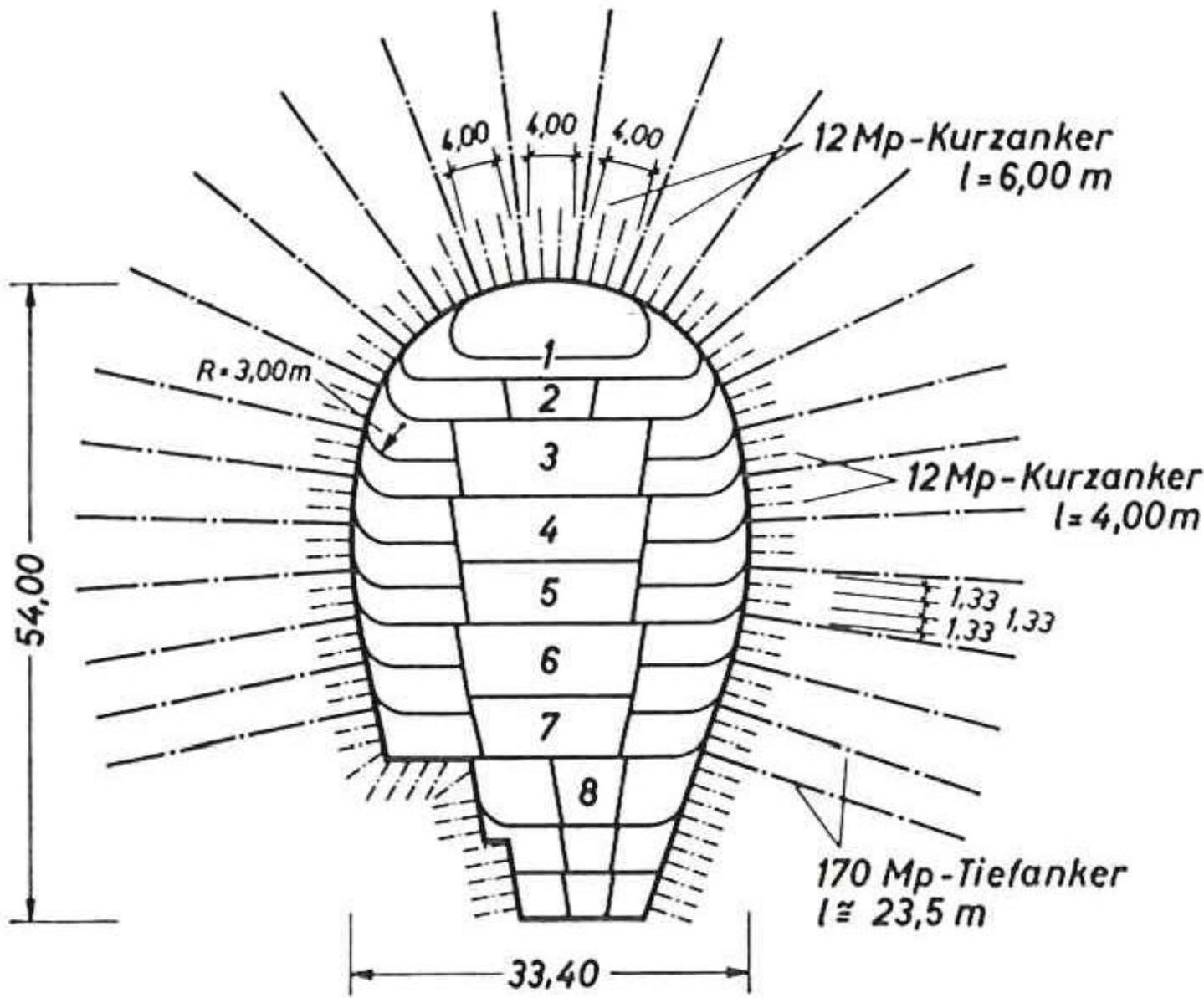
1050 MW

sur le modèle de
WALDECK II

Allemagne
1974

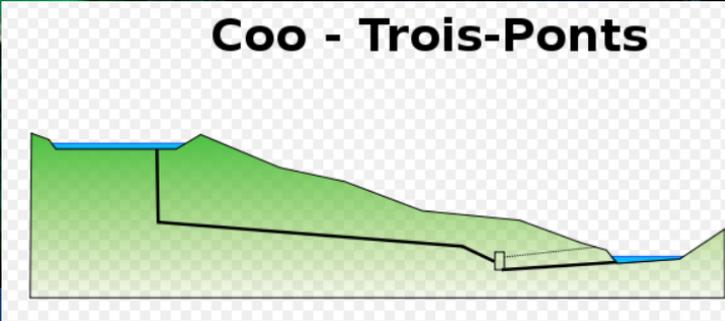
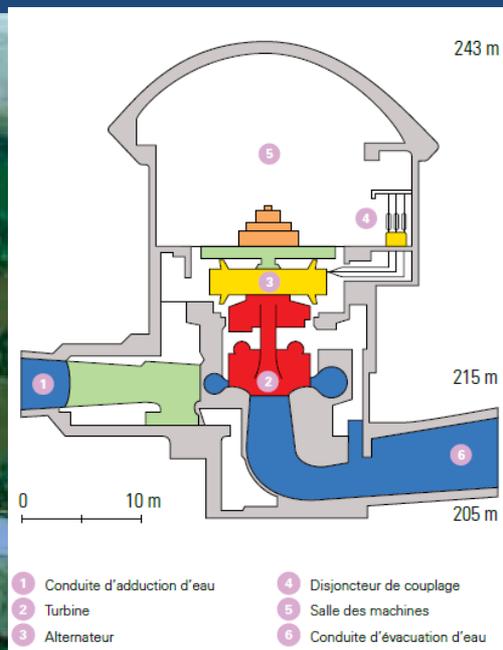
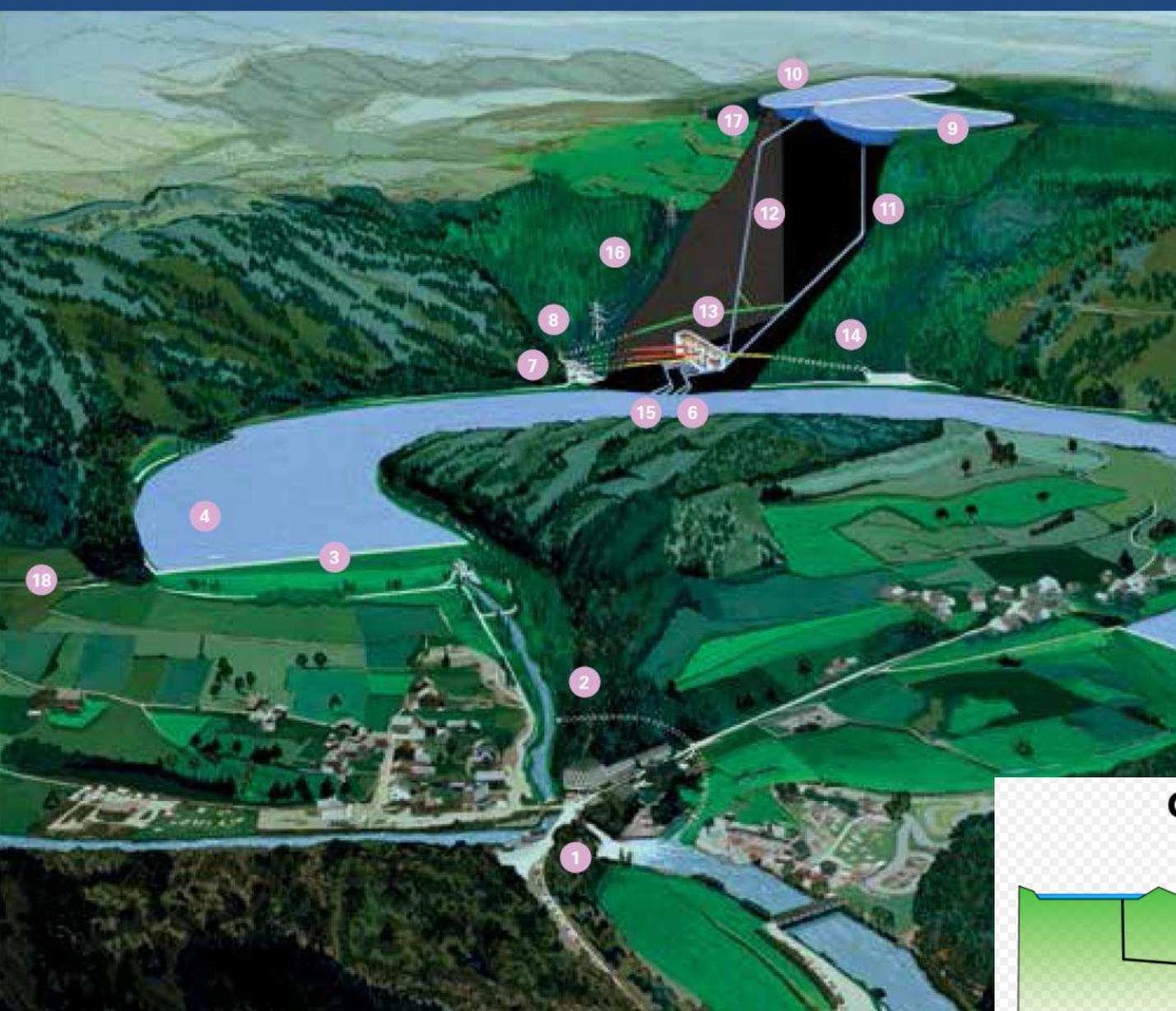
Profondeur 400 m

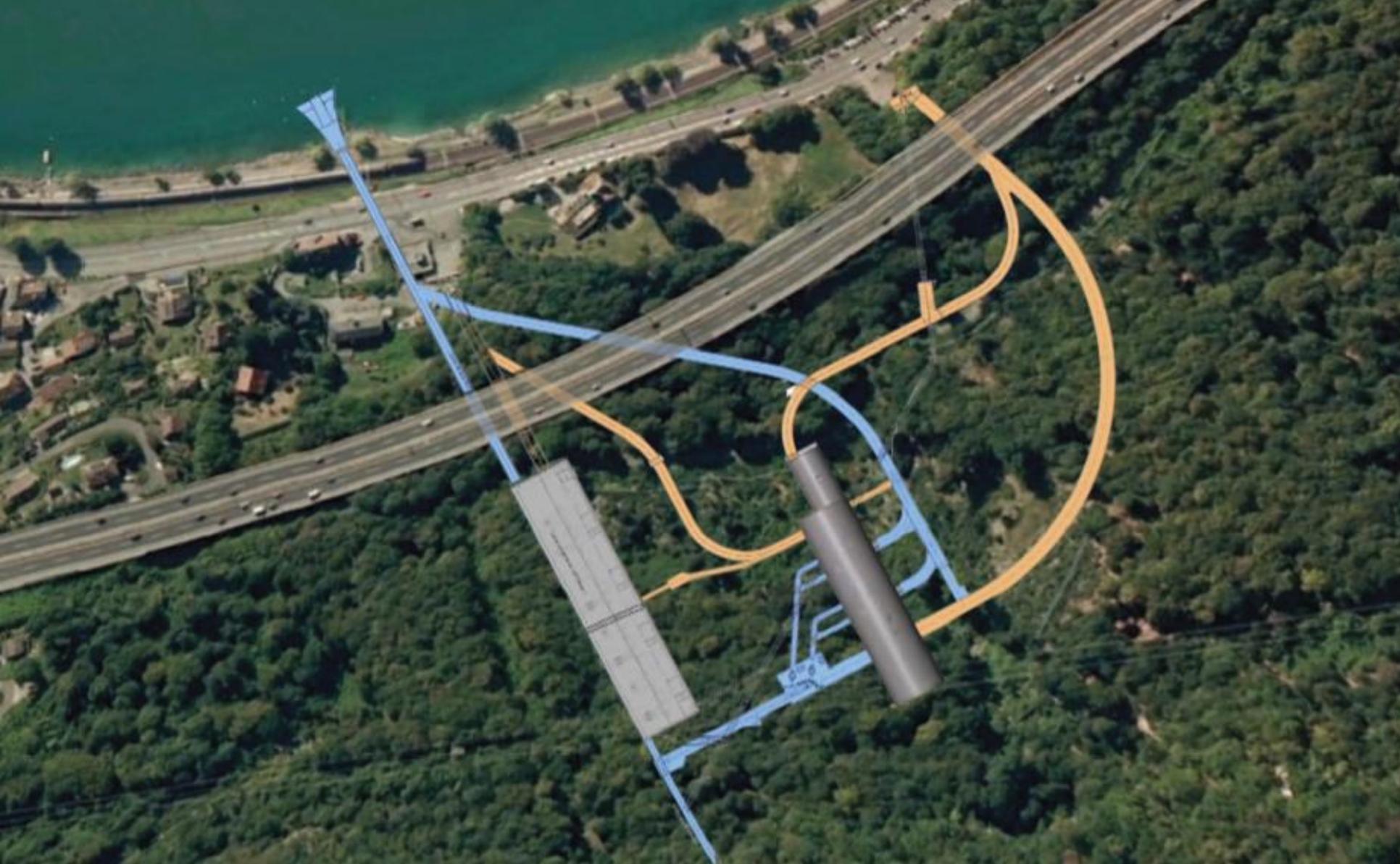
Grès, Schistes,
cornéennes
PALÉOZOÏQUE
pendage EW/50 N



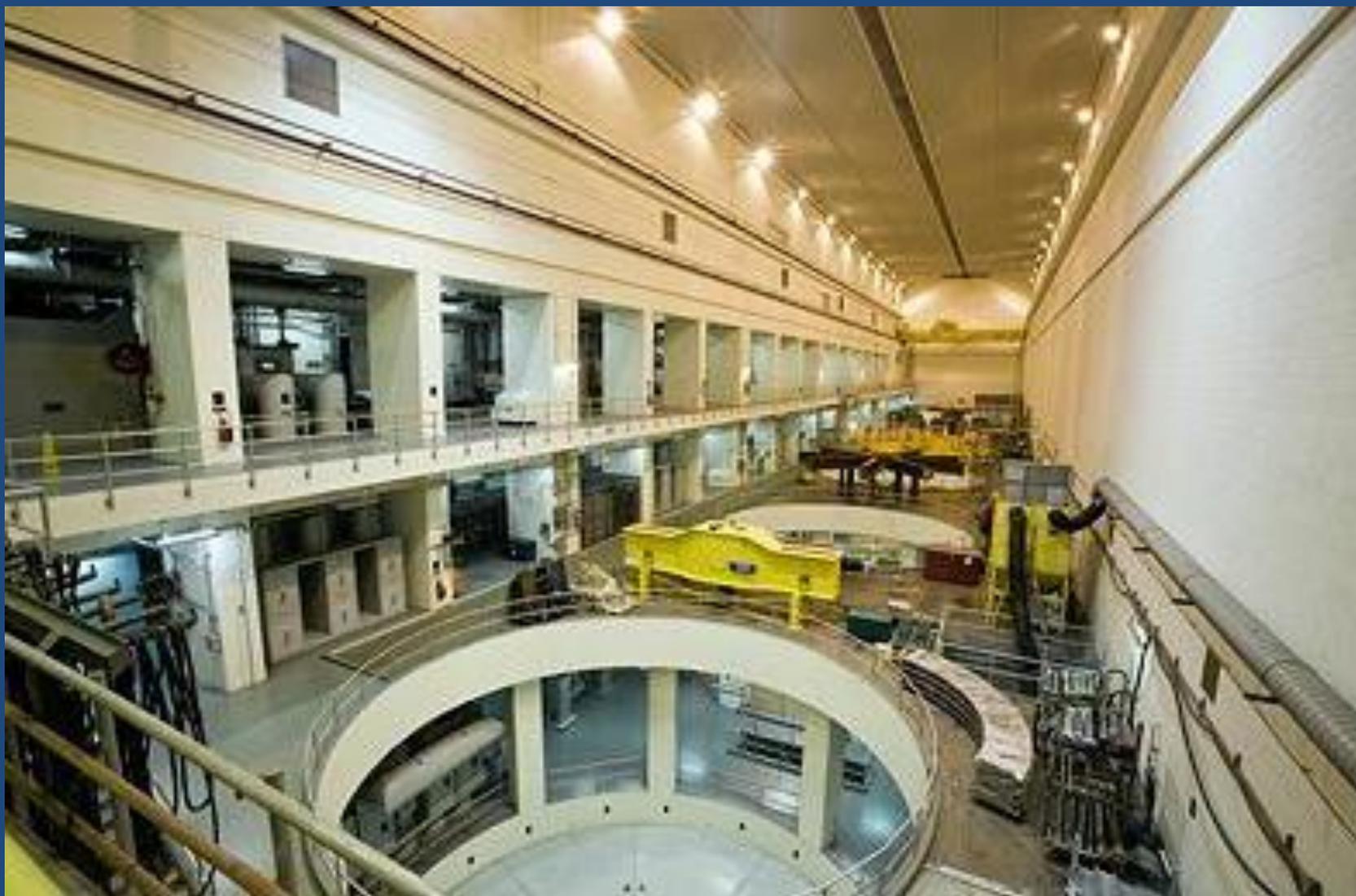
Phases d'excavation et soutènements
par boulons et tirants

STEP de Coo-Trois-Ponts sur l'Amblève, Belgique, Centrale de transfert d'énergie par pompage





Hongrin-Leman, Suisse, en cours de doublement



BATH COUNTY, 6500 MW journée Stockages ENPC

world biggest 23

les débuts : centrales d'EDF

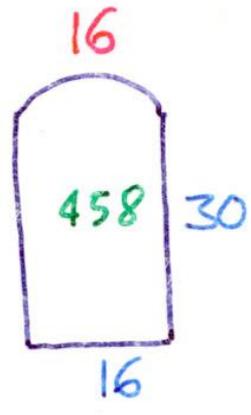
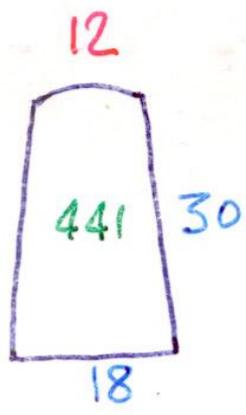
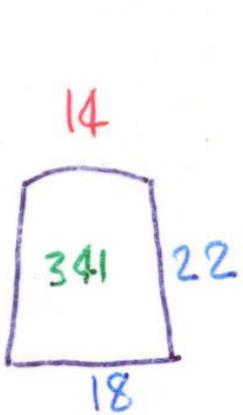
les voyages : autres pays

les stockages d'hydrocarbures

La physique des particules (*du CERN aux neutrinos*)

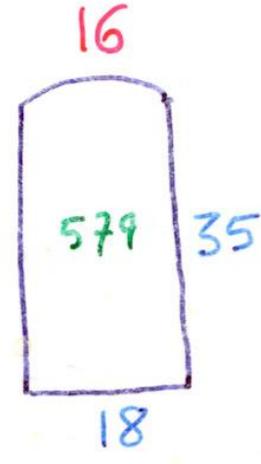
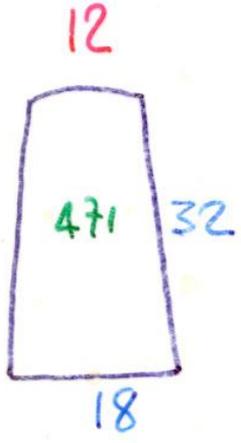
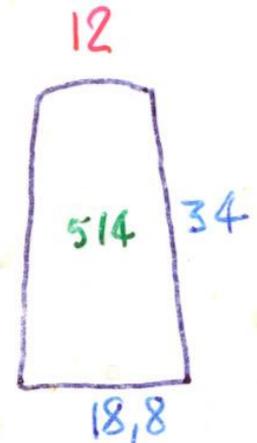
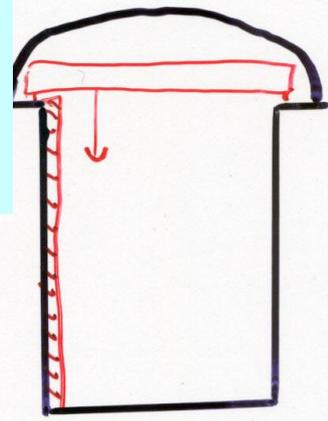
les centrales nucléaires ...





CAVERNS
hydro and thermo power plants

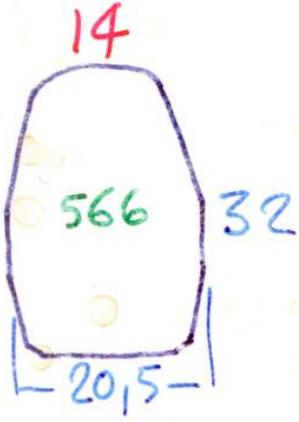
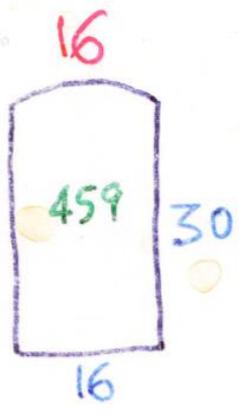
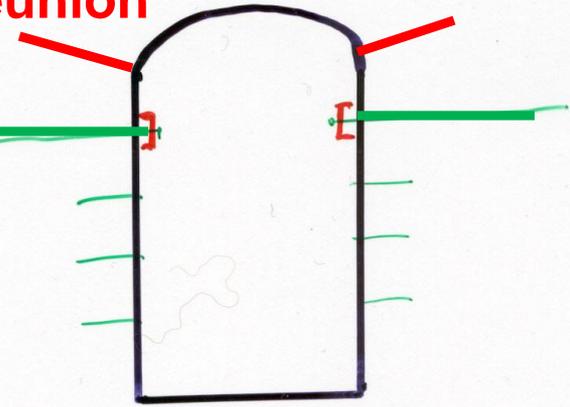
mushroom



POATINA Australia
TAKAMAKA Réunion

ancrages

destrressing slots



PORVOO
Finland
evolution of caverns for fuel storage

ovoid



Tindaya, l'acte gratuit

- Chillida quería meter el espacio dentro de una montaña para consagrar la existencia del vacío,
- del espíritu de la montaña o de la materia, teniendo en cuenta, eso si, todos los aspectos técnicos análogos a la obra y por supuesto entre ellos estaban los medio ambientales
- un lugar arquitectónico donde el hombre se da cuenta de su



ocho personal, para desar
entendimiento del mundo
er diseña la Basílica de la
aña. (*Sainte Baume, près*



Tindaya, l'acte gratuit

- Chillida quería meter el espacio dentro de una montaña para consagrar la existencia del vacío,
- del espíritu de la montaña o de la materia, teniendo en cuenta, eso si, todos los aspectos técnicos análogos a la obra y por supuesto entre ellos estaban los medio ambientales
- un lugar arquitectónico donde el hombre se da cuenta de su escala
- un espacio para el goce personal, para desarrollar la sensibilidad y el entendimiento del mundo
- **En 1948 Le Corbusier diseña la Basílica de la Paz y el Perdón dentro de una montaña. (*Sainte Baume, près de Marseille*)**

Tindaya, l'acte gratuit

- Arup was appointed to lead the technical design of the 45m x 50m x 65m cubic 'carved space' inside Mount Tindaya – one of the largest underground caverns ever constructed and the only one of its kind with a flat roof.
- ***Un contre sens mécanique parfait !***

Le Tabou sur la Portée

- **Duffaut P., 1977.** Site reservation policies for **large underground** openings. Rockstore Symposium, Bergman M. ed. Stockholm; & *Underground Space*, 3 (4), p 187-194.
- **Duffaut P., 1982,** Les facteurs qui limitent la taille des cavités ; Symp SIMR Aachen, Wittke éd. Balkema, p 245-253.
- **Duffaut P. et Marin G., 1986,** Quels ouvrages souterrains pour le XXI siècle? Conf. AITES, Grandi Opere Sotterranee, Florence; en Français *Tunnelling & Underground Space Techn.* 2-2, p 155-164, en Italien, *Gallerie*, 25, oct 1987, p 13-22.
- **Duffaut P., Piguet J.P. and Théron R., 1986.** A review of **large permanent rock caverns** in France. Symposium on Large Rock Caverns, Saari K. ed., Helsinki, Pergamon, p 55- 66.
- **Duffaut P. Labbé M. et Bertholon P., 1999,** Architecture souterraine et conception ; CR. Journées de l'AFTES; Spécifique, Caluire p 157-162.
- **Duffaut P., 2011,** Large Caverns, Design and Construction, URL Workshop, Pekin, 4 p.

Gjøvik Olympic Mountain Hall (Norway)



61 m

widest civil engineering cavern under 30 m granite

les débuts : centrales d'EDF

les voyages : autres pays

les stockages d'hydrocarbures

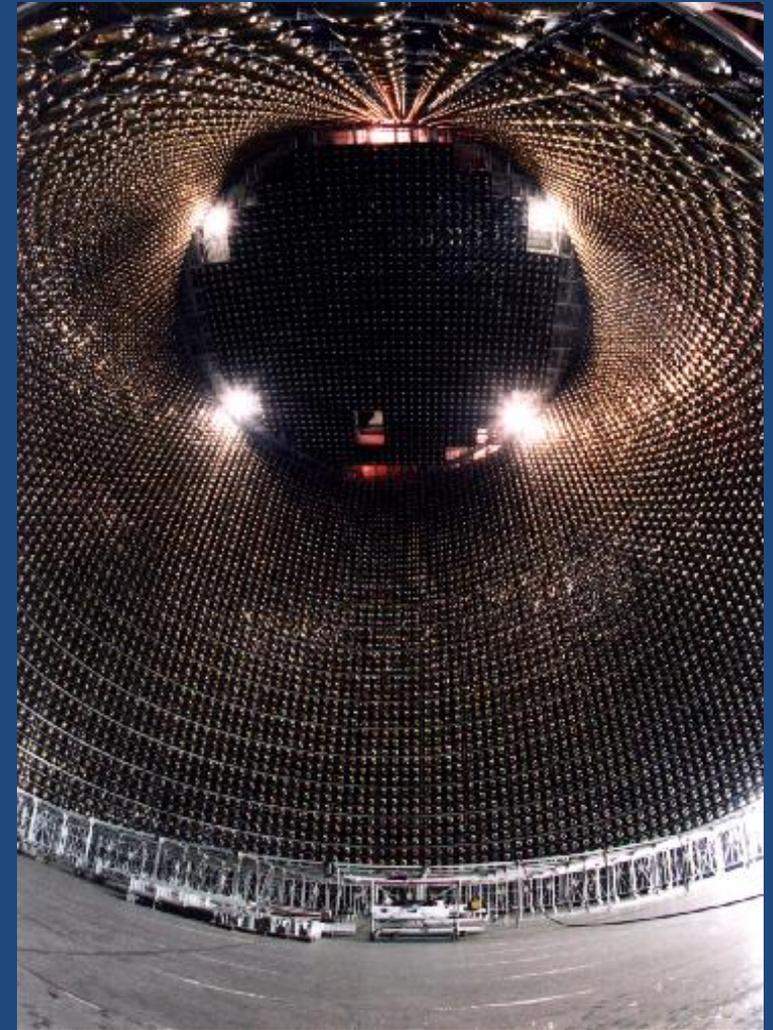
La physique des particules

les centrales nucléaires ...

Our Experience

Case History of Super KAMIOKANDE Cavern Excavation

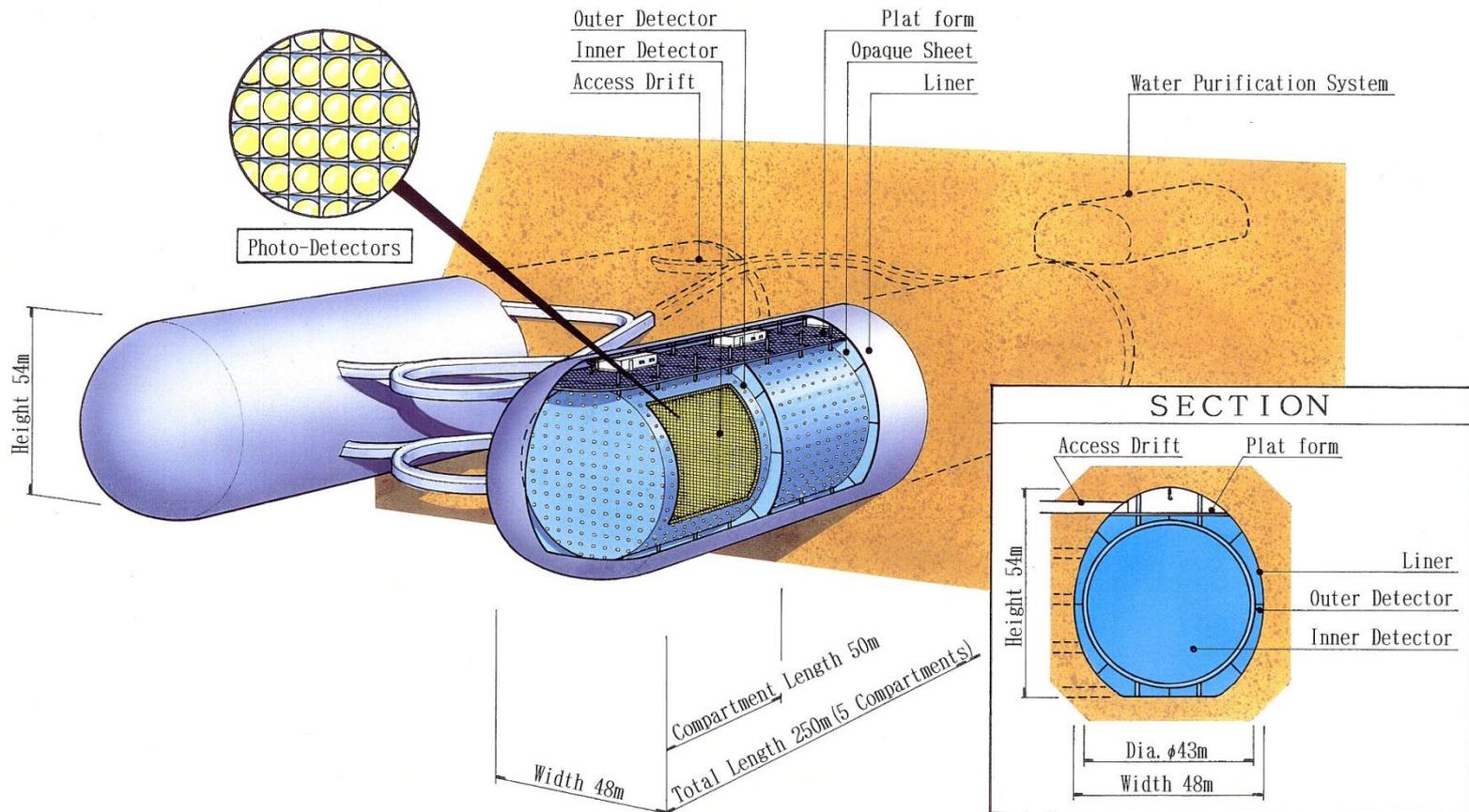
- Super-K Cavern Excavation (69,000m³) was Successfully Completed with no Loss Time of Injury.
- Long Term Stability of Rock Mass Surrounding the Cavern has been Maintained.
- Optimized Design Based on Geological and Engineering Properties of In-Situ Rock Mass.
- Qualified Mining Technologies, Informed, Monitored & Modernized Excavation Method.



Super-KAMIOKANDE Observatory

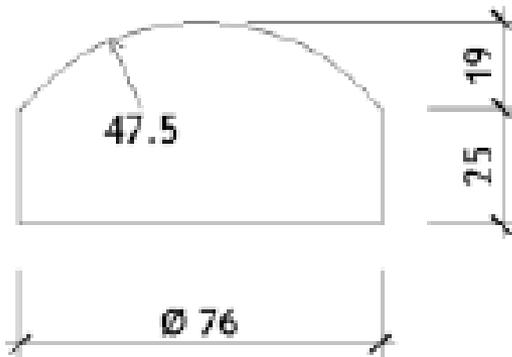


What is Hyper-Kamiokande ?

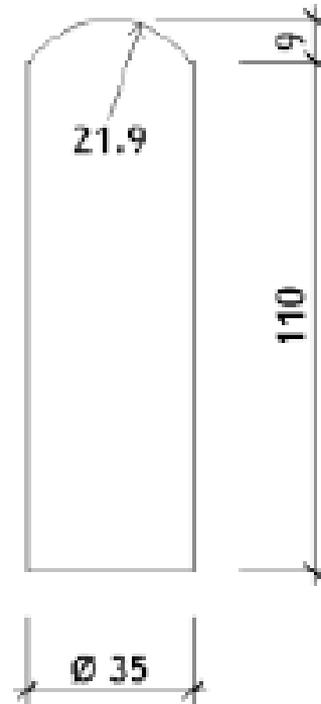


Cavernes du projet LAGUNA

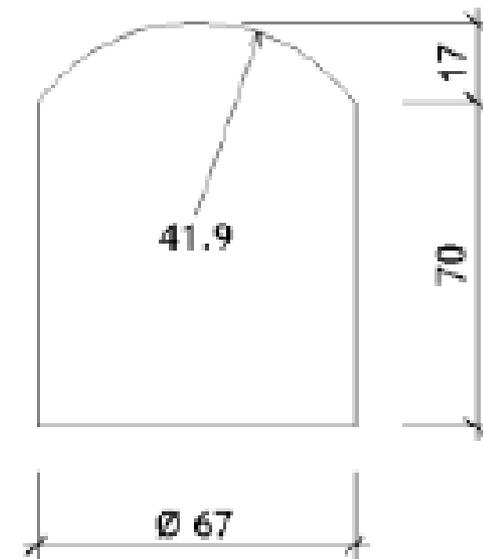
GLACIER



LENA



MEMPHYS

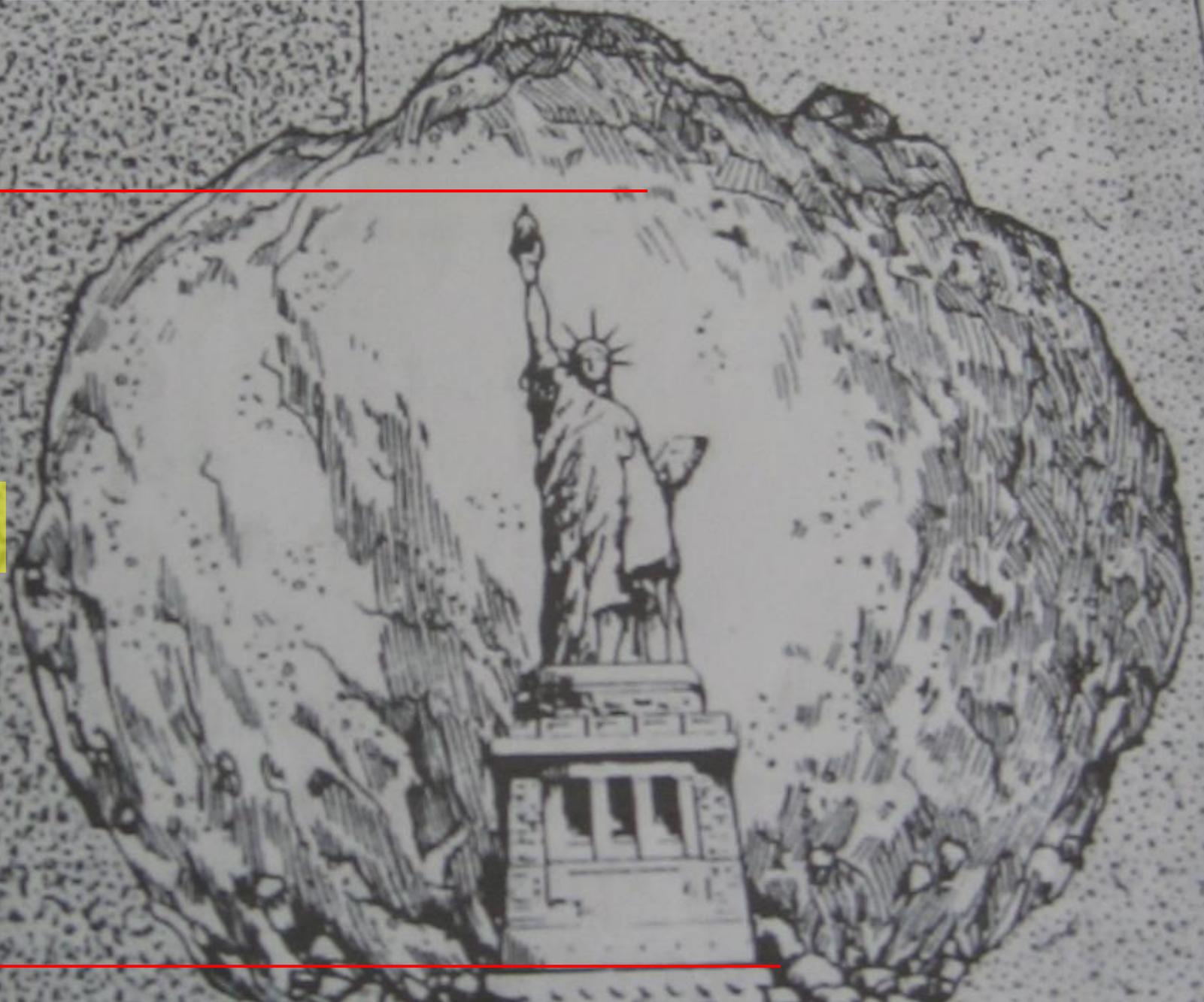


Volumes de révolution

Mosca, 2010

La Liberté, lightening the MEGATON cavern

86 m



les débuts : centrales d'EDF

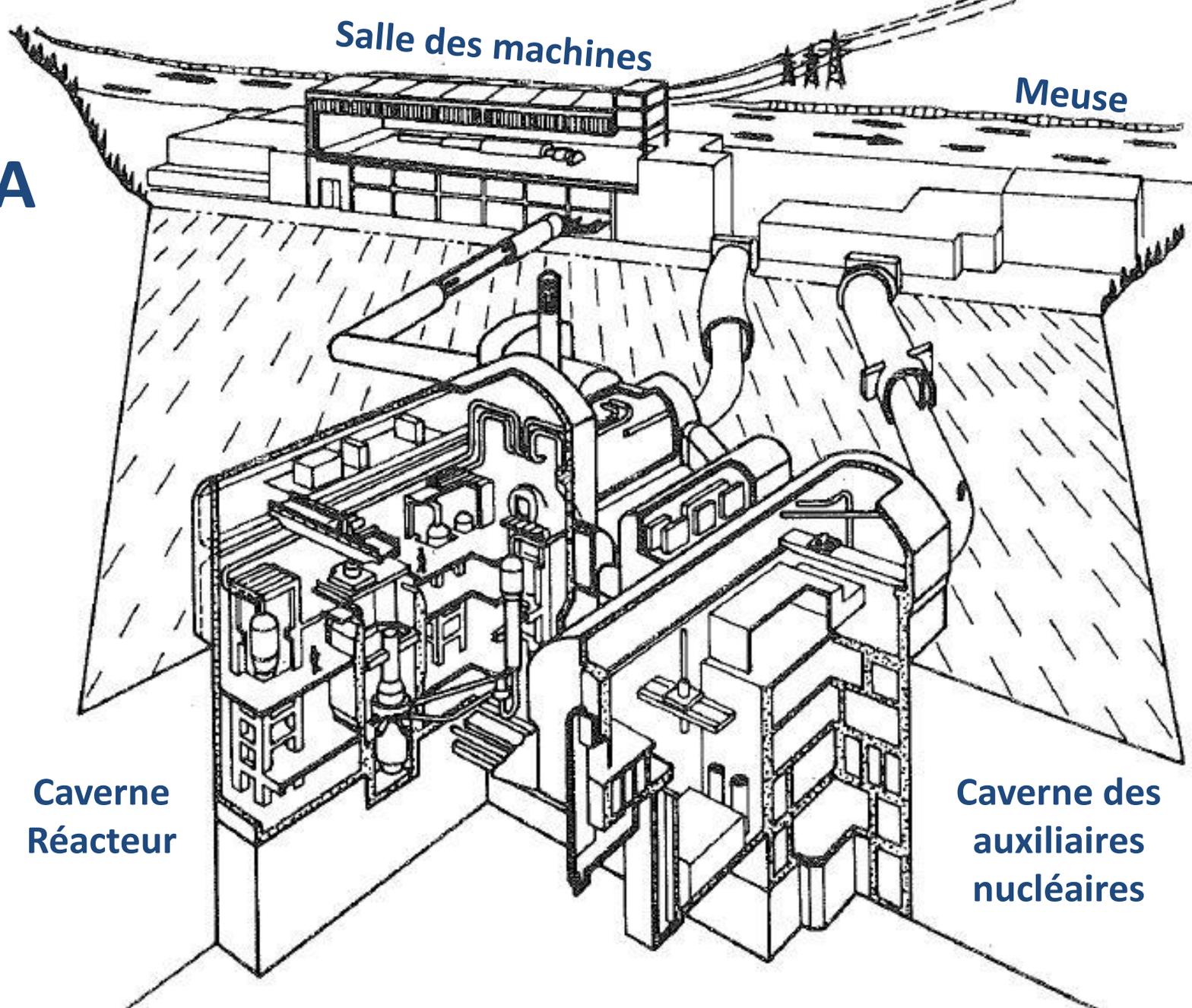
les voyages : autres pays

les stockages d'hydrocarbures

La physique des particules (*du CERN aux neutrinos*)

les centrales nucléaires ...

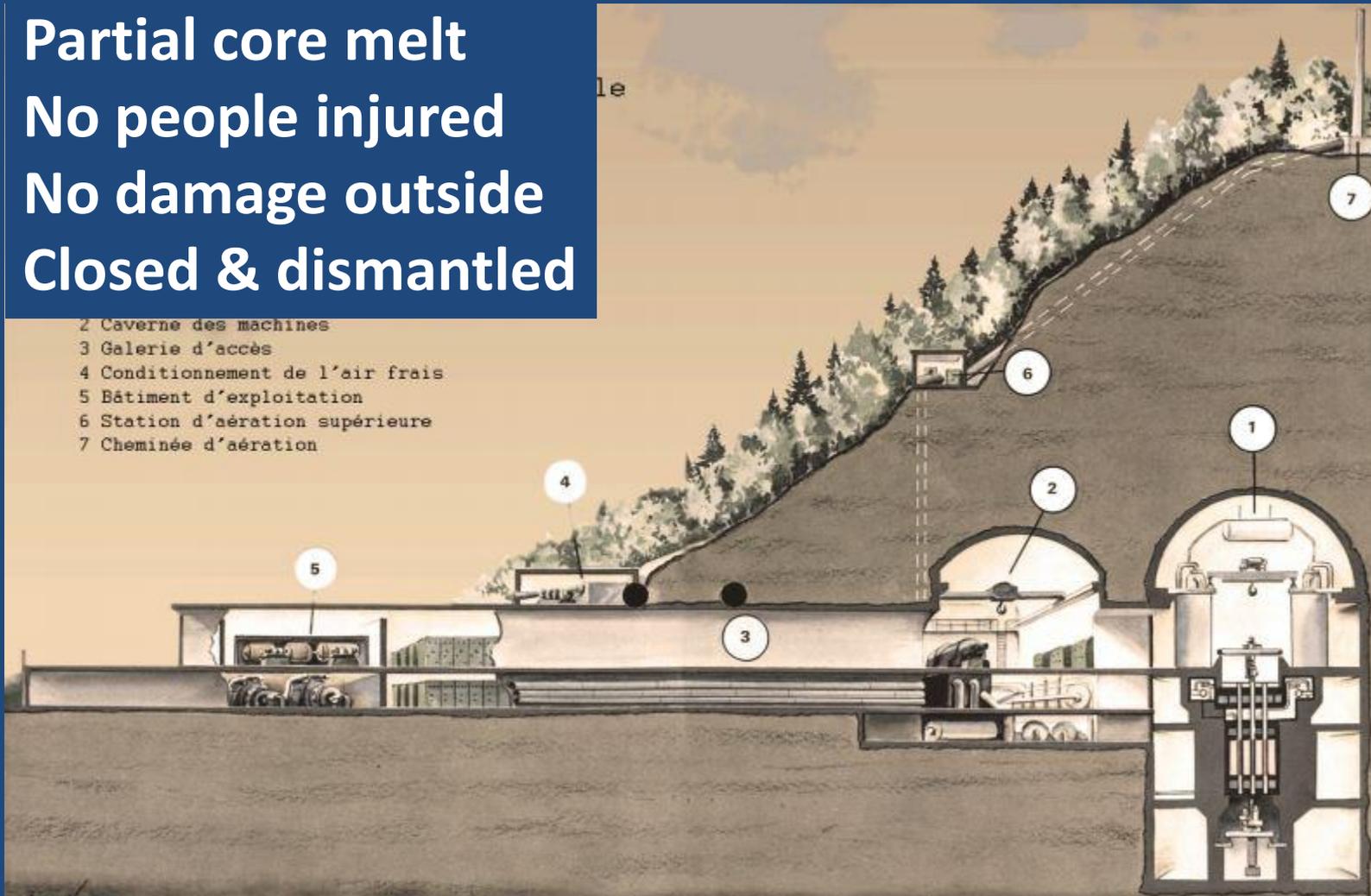
CHOOZA
Ardennes



1969 Lucens accident, Switzerland

Partial core melt
No people injured
No damage outside
Closed & dismantled

- 2 Caverne des machines
- 3 Galerie d'accès
- 4 Conditionnement de l'air frais
- 5 Bâtiment d'exploitation
- 6 Station d'aération supérieure
- 7 Cheminée d'aération



Projet canadien présenté à Hanovre par Ontario Hydro

Underground Space, Vol. 4, No. 1, pp. 17-27.
 Pergamon Press Ltd, 1979. Printed in Great Britain.

Underground Siting of CANDU Power Stations

R. C. OBERTH

Generation Planning and Development Department

and

C. F. LEE

Geotechnical Engineering Department

Ontario Hydro

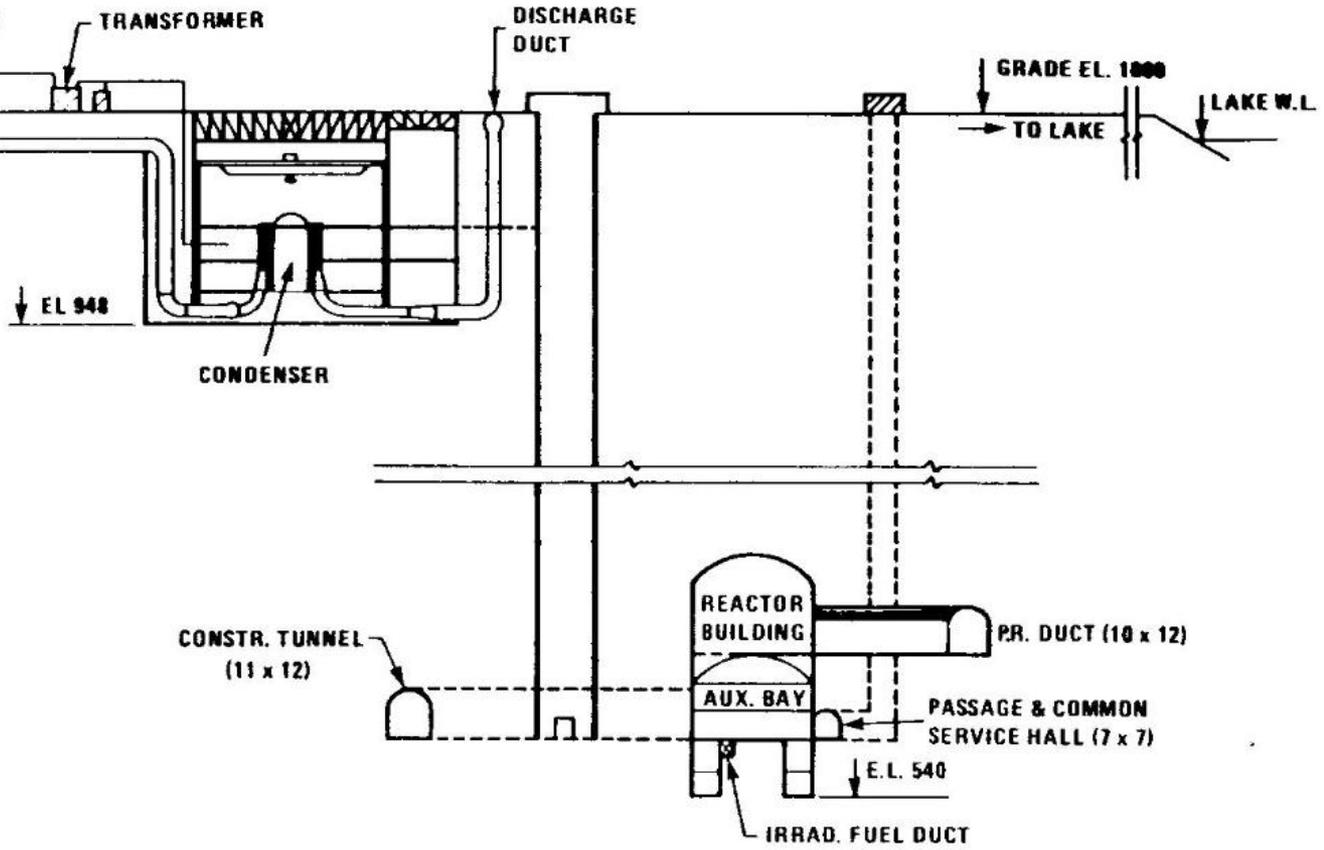
700 University Avenue, Toronto, Ontario

Ontario Hydro is currently investigating the feasibility of constructing an underground CANDU nuclear power station. Two underground concepts are being examined: (a) deep rock burial with reactor units located in deep hard rock caverns and (b) cut-and-cover burial in which the station is constructed in an open excavation and subsequently covered with backfill.

The investigation is developing conceptual station designs for both underground concepts and is examining potential Ontario sites, safety and operational considerations, construction methods and schedules, and stations capital costs.

This paper focuses on the deep rock excavation concept and presents the major interim findings of the Ontario Hydro study. A description of southern Ontario rock formations, in terms of their capability of supporting large underground caverns, is presented. In addition, recent results of a test hole drilling program are described. The paper summarizes the *in situ* and laboratory measurements and draws inferences regarding the underground station design.

A preliminary assessment of the potential safety advantages of underground siting (extra containment barrier, reduced seismic motion) is presented and construction and operational considerations are reviewed. Finally, the areas of major cost disadvantage with respect to surface stations are identified and approximate overall station cost penalties are discussed.



**FIGURE 5
 DEEP ROCK BURIAL CONCEPT
 GENERAL CROSS SECTION**

Florence AITES 1986,
l'année de Tchernobyl



Une ville purement imaginaire ... ou bien ?



CONCLURE ?

Lors de la première descente de mine, l'ingénieur du fond s'est ingénié à nous faire passer par les galeries les plus écrasées de son quartier, c'est-à-dire ramper entre des boisages rompus ;

il était clair que ces boisages avaient subi de gros efforts et que dans leur état rompu, ils étaient devenus incapables d'en supporter.

Il ne nous a pas expliqué ce paradoxe, tout naturel pour lui : je ne sais s'il l'avait reconnu et je ne pense pas qu'on me l'ait jamais clairement enseigné :

Incoercible, la déformation éteint la contrainte qui l'avait provoquée; tout se passe comme si le massif avait «adopté» la cavité

C'est dans la **culture du mineur**, pas dans celle du génie civil

Peut-être même s'éteint elle chez des mineurs qui n'ont pas passé assez de temps en souterrain ?

La Géologie gouverne tous les ouvrages souterrains, construisons selon la Nature, pas contre elle.

BUILD WITH NATURE, NOT AGAINST IT

Merci ... *pour ce moment*

A handwritten signature in black ink on a white background. The signature is stylized and appears to read "Pierre-André".

comparison of 5 clever tricks

to slacken the hoop stress, or provide safety valves

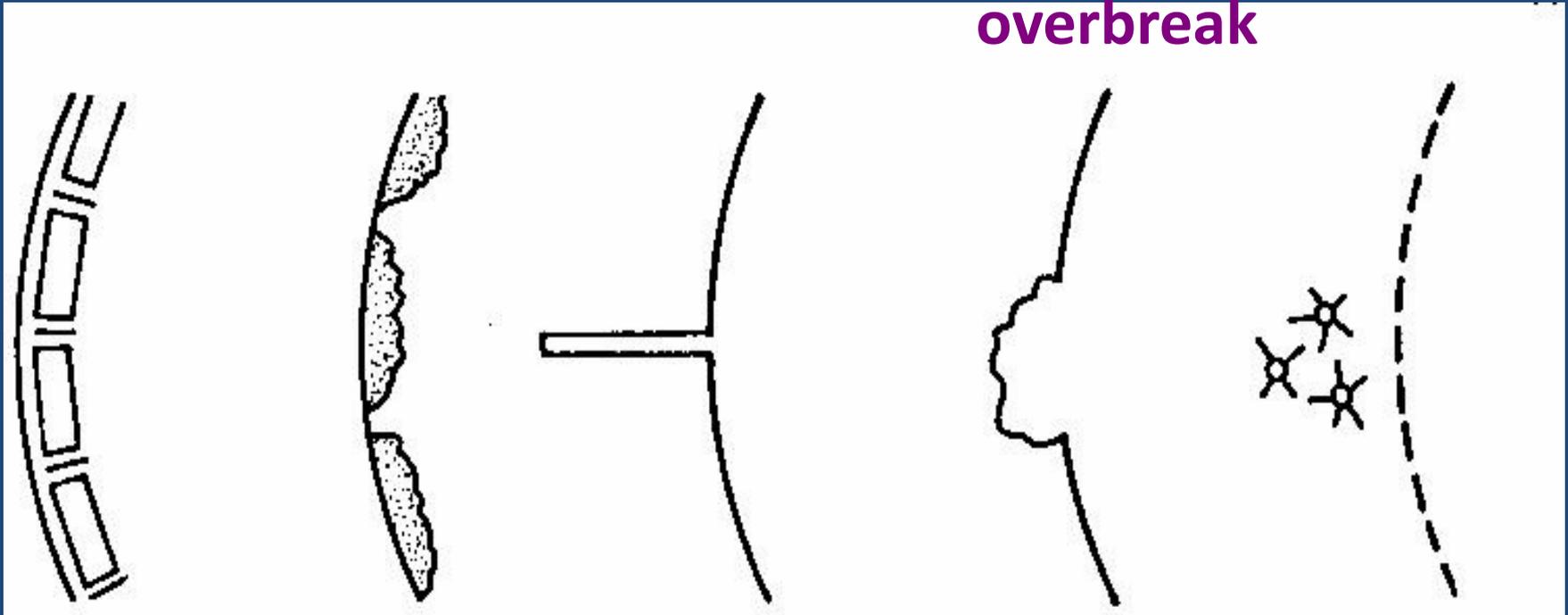
- **sliding steel sets** (classical in mines)
- **crushable wood planks** (well known in mines)
- **gaps in shotcrete linings** (L. Müller, Tauern Tunnel)
- **radial cuts** (well known in mines)
- **deliberate overbreaks**
- **explosive induced fracturing ahead of the face**

comparison of 5 clever tricks

to slacken the hoop stress, or provide safety valves

shotcrete gaps

overbreak



wood planks
between blocks

radial cut

shots ahead
of the face

from *La géotechnique et le creusement mécanisé des tunnels* DUFFAUT

et al., 1974, Ann. ITBTP, n° 322

DUFFAUT - BOGOTA - 2008

how to name those tricks ?

- stress-control (or strain-control)
- when dismantling a firearm, one must remove the trigger spring before the device blows up to your face
- it is the contrary of **prestress** (*creating tunnels and caverns also being the contrary of construction*)

Réservoir supérieur créé sur le plateau par une digue périphérique (en matériaux prélevés dans le bassin)

Réservoir inférieur créé sur la rivière Meuse par un barrage en remblai

Centrale souterraine alternant pompage et turbinage (d'une eau toujours la même)



Kurokawa, Japon
Tataragi dam

