

# Pour être sûres, les centrales nucléaires doivent être souterraines

Pierre Duffaut<sup>1</sup>

Président d'honneur, Espace souterrain

## RÉSUMÉ

*Parmi les premières centrales nucléaires, un petit nombre a été construit en souterrain, mais cette voie vers une meilleure sécurité publique a été ensuite abandonnée malgré son grand intérêt. L'historique de ces projets et travaux est rappelé, en mettant l'accent sur les aspects de Mécanique des roches. Pendant longtemps, un tabou a interdit les grandes portées aux cavernes creusées par l'homme ; la patinoire souterraine de Gjøvik, en Norvège a levé ce tabou. Il y a aujourd'hui de nouvelles raisons pour revenir à ce concept lorsque les conditions sont favorables en temps et lieu, et surtout dans les pays qui entrent dans l'ère de l'énergie nucléaire*

## 1. INTRODUCTION

Depuis leurs débuts et désormais partout dans le monde les sociétés exploitant des centrales hydrauliques projettent, construisent et exploitent des centrales souterraines. Au contraire peu de centrales thermiques sont souterraines et moins encore de centrales nucléaires. Après de premières expériences, cette solution paraît définitivement abandonnée, alors qu'il y a de plus en plus de raisons de la reprendre. Des usines hydroélectriques souterraines ont été construites aux Etats-Unis dès 1898, puis en Europe, et partout dans le monde à partir de 1950. Actuellement il y en a environ 200 en Norvège, sur un total de l'ordre de 500, dont 45 en France. Parmi les plus grandes cavernes, celle de La Grande, au Canada est large de 22 m, haute de 45 m, longue de 485 m. Comme celle-ci, beaucoup apparaissent comme des tunnels relativement courts dont la hauteur dépasse la portée. En vérité leur portée a longtemps été maintenue aussi petite que possible et beaucoup ont des sections très élancées, au point de ressembler à des trous de serrure, les projeteurs n'ayant pas compris que la hauteur puisse être plus critique que la portée. Plus tard les cavernes pour le stockage de pétrole en vrac ont apporté de plus en plus d'expérience à la construction de cavernes et plus récemment encore la recherche sur les neutrinos a demandé de très grandes cavernes (à très grande profondeur). Comme mécanicien des roches, l'auteur a discuté plusieurs aspects de ce problème (Duffaut, 1982, 1990 et figure 3), et comme prosélyte de l'espace souterrain il désire attirer l'attention sur l'aptitude des cavernes à accueillir toutes les installations dangereuses, y compris les réacteurs nucléaires.

## 2. RAPPEL HISTORIQUE SUR LES CENTRALES NUCLÉAIRES SOUTERRAINES

En 1960, la Norvège est le premier pays qui place un réacteur dans une caverne, un réacteur à eau lourde de 25 MW, à Halden (après le réacteur d'essai de Werner Heisenberg à Haigerloch en Allemagne en 1944 !). La Norvège est première au monde, par la date ou le nombre, dans la plupart des catégories d'ouvrages souterrains, y compris les tunnels sous-marins. Lorsque ce pays a abandonné l'énergie nucléaire, cette installation a été conservée comme réacteur de recherche, au sein d'un programme européen sur la sûreté nucléaire. La Suède et la Suisse ont suivi l'exemple au milieu des années 60 avec Agesta, dans les faubourgs de Stockholm, et Lucens, entre Lausanne et Berne. Lucens a été fermée après une fusion de cœur partielle le 29 janvier 1969. Cet accident, le premier rapporté dans la production d'énergie nucléaire, n'a eu de conséquences sérieuses sur aucun individu

---

<sup>1</sup> Traduction adaptée d'une communication en anglais au congrès d'ACUUS à Athènes le 11 septembre 2007, pages 207 à 212 du volume de comptes rendus (et CDROM)

ni sur l'environnement, grâce à l'implantation en souterrain. Ces trois centrales étaient très modestes par rapport aux centrales non nucléaires de l'époque, plus encore par rapport aux puissances actuelles.

En 1966, Chooz, en France constitue l'étape suivante, première centrale ayant une puissance électrique significative avec 305 MW. Seules les parties nucléaires ont été placées dans deux cavernes, sous une couverture d'environ 70 m, les turbines à vapeur et les alternateurs étant dans la vallée de la Meuse au pied du coteau. La caverne du réacteur a une portée de 21 m, une hauteur de 44,5 m, une longueur de 42 m (chacune environ deux fois la portée). Exploitée de 1967 à 1991, la centrale a produit 38 TWh en 19 ans.

Au début des années 70, afin de démontrer la faisabilité de cavernes assez grandes pour accueillir des réacteurs de plus forte puissance, une grande patinoire souterraine a été projetée près d'Oslo avec une portée de 61 m ; ce projet est resté sans suite lorsque la Norvège a abandonné l'énergie nucléaire ; il revivra 20 ans plus tard comme on le verra ci-dessous.

En 1977, la société d'électricité canadienne Ontario Hydro a mis à l'étude un grand projet souterrain de quatre réacteurs CANDU de 850 MW (filiale canadienne à eau lourde et uranium naturel) à 300 m de profondeur dans le granite précambrien sur la rive du lac Ontario, non loin de Toronto (Oberth, Lee, 1979 et figure 1). Chaque réacteur occupe une caverne de 30 sur 40 et 60 m, sans aucune enceinte d'acier ni de béton, le terrain étant supposé capable de contenir toute surpression accidentelle grâce aux fortes contraintes horizontales ; la profondeur assurait aussi une charge naturelle pour le système d'injection d'eau. Chaque salle des machines était encastrée dans une excavation en surface pour l'esthétique, avec son toit au niveau du terrain naturel. Les essais géotechniques effectués près de la centrale de Darlington ont porté sur la résistance, la fracturation, la perméabilité et l'état de contrainte et bien que leurs résultats aient été favorables le projet a malheureusement été abandonné.

Une revue générale a été publiée par Watson (et al, 1975). Puis le gouvernement allemand a organisé un colloque en mars 1981 sur la construction de centrales nucléaires en souterrain : 240 participants de 12 pays se sont réunis à Hanovre pour discuter 36 communications sur les recherches en cours dans ce domaine (Pahl, Schneider, 1982). Les principaux avantages cités étaient la meilleure protection à la fois de la centrale et de la population, ainsi que la plus grande liberté de choix des sites. Certains aspects financiers et techniques pourraient aussi être avantageux. Pour accueillir un réacteur d'environ 1000 MW, une portée de 60 m était supposée nécessaire ; deux principaux concepts étaient présentés et comparés, soit une vraie caverne profonde, soit une fouille à ciel ouvert recouverte ensuite de terre (figure 2 gauche).

### **3. LE TABOU DES GRANDES PORTÉES AVANT LA PATINOIRE DE GJØVIK**

Placer des centrales en souterrain avait beaucoup d'inconvénients, le coût, le délai de construction, les incertitudes géologiques, etc. mais le principal semble avoir été la crainte face aux grandes portées : la plupart des cavernes creusées par l'homme restaient au-dessous de 20 m, peu d'entre elles atteignant 25, 30 ou 33 m (figure 3 d'après Hoek, Brown, 1990). En Suède, la méthode *Rib in Rock* avait été présentée au premier symposium Rockstore en 1977 (Sallström, figure 4 à gauche) : en première phase, un ensemble de « côtes » sont formées dans des plans verticaux parallèles autour de la future caverne (galeries et puits de petite section creusés puis remplis de béton), fournissant un terrain renforcé pour le creusement de la caverne<sup>2</sup>.

Les Jeux olympiques d'hiver de 1994 allaient fournir l'occasion de remettre à jour le projet de patinoire souterraine d'Oslo. La caverne a été creusée sous le relief granitique auquel est adossée la ville de Gjøvik, qui abritait déjà une piscine et des cavernes plus modestes pour un central téléphonique et divers services de sécurité. Le plafond voûté a une portée de 61 m (figure 4) une longueur de 91 m à une hauteur de 25 m, pour abriter 5800 sièges autour de la patinoire ; c'est de très loin la plus grande portée au monde pour une caverne non minière destinée à recevoir du public. La

---

<sup>2</sup> Trente ans après, aucune application de cette méthode n'a été signalée (mention sur le PowerPoint au congrès)

couverture rocheuse, de 25 à 50 m, est inférieure à la portée. La qualité du rocher était connue par les cavernes précédentes et le creusement n'a rencontré aucune surprise. La stabilité a été étudiée par deux équipes différentes avec les méthodes les plus récentes, mais aucune modification n'a été apportée au dessin initial : la forme et le soutènement sont conformes à ceux des nombreuses cavernes plus modestes construites en Norvège. Le seul soutènement est une couche de 10 à 15 cm de béton projeté associée à des boulons de 6 m à la maille 2,5 m. L'excavation de 165 000 m<sup>3</sup> a duré 8 mois (6 de moins que prévu). Inaugurée par le roi en mai 1993, la salle a accueilli sans aucun problème 16 matchs de hockey sur glace pendant les Jeux de 1994. Ce succès a définitivement levé le tabou sur les grandes portées.

#### **4. FORMES ET TAILLES DE CAVERNES, ESSAI D'ARCHITECTURE SOUTERRAINE**

##### *4.1 Fouille ouverte ou vraie caverne ? Le projet MYRRHA*

En Belgique, une installation partiellement ou totalement souterraine est à l'étude sous le nom MYRRHA, *Multipurpose hYbrid Research Reactor for Hytech applications, Accelerator driven system* (réacteur de recherche à buts multiples pour applications de haute technologie, De Bruyn et al, 2006). Dans ce type de réacteur, le bombardement d'une cible par les neutrons émis par un accélérateur de particules permet de brûler des déchets nucléaires et de produire des matériaux radioactifs. L'implantation sous le niveau du sol a été choisie pour sa sécurité globale, avec deux variantes pour un niveau de sécurité supplémentaire, une couverture de remblai de 10 m sur le toit, ou une caverne qui nécessite une réorganisation des éléments non nucléaires.

Ces projets rappellent ceux que l'Allemagne avait présentés au colloque de Hanovre ; l'article cité discute les méthodes d'exécution de chaque solution, qui sortent du domaine traité ici. Il est clair que la variante en caverne n'est acceptable qu'en terrain rocheux.

##### *4.2 Forme des cavernes et mécanique des roches*

Les grottes naturelles montrent des portées très supérieures aux cavernes creusées par l'homme. On peut les séparer en deux groupes selon la forme de leur plafond, soit plan, suivant un joint de stratification, leur portée ne dépasse pas 100 m, soit grossièrement voûtée, avec une portée qui peut être plus grande (jusqu'à 400 m pour la plus grande salle connue, Lubang Nasib Bagus, à Sarawak, Indonésie, Gilli, 1984). Les vides miniers sont excavés suivant la structure géologique pour extraire les matériaux marchands, par exemple une couche de charbon. Ces limites naturelles, comme les périmètres perforés des timbres-postes, assurent aux vides une meilleure stabilité. Beaucoup de chambres creusées dans les mines ont des portées de 100 m et au-delà (carrières de calcaire de Tytyry en Finlande, mines de fer de Terre-Neuve au Canada et de May-sur-Orne en France (Normandie), etc.

La forme des cavernes « civiles<sup>3</sup> » creusées par l'homme (production d'électricité, stockage de pétrole, usages militaires, etc.) dépend d'abord de leur destination, suivant ce qu'elles devront abriter, ensuite de la Nature, structure des terrains et champ de contrainte, et en troisième lieu des méthodes d'exécution. Autant que possible, la direction d'une longue caverne est choisie perpendiculaire aux plans structuraux dominants, soit la stratification, soit la fracturation. Sauf le cas de cavernes conformes aux joints de sédimentation, il faut remplacer les faces planes et les angles aigus par des surfaces courbes à rayon variant progressivement et des congés afin de minimiser les concentrations de contraintes. Dans les terrains dépourvus de structure bien marquée, la meilleure stabilité est celle de puits verticaux ou des tunnels horizontaux à section circulaire (ou elliptique, si les contraintes principales dans le plan sont différentes). Le creusement à l'explosif favorise les faces planes ou cylindriques ; les tunneliers à pleine section donnent des sections circulaires jusqu'au diamètre 15 m ; des machines ponctuelles ont été utilisées pour creuser des stations de métro et des cavernes de stockage jusqu'à des sections 8 sur 12 m.

---

<sup>3</sup> Les cavernes civiles s'opposent ici aux cavernes minières, cf. *civil opposed to mining engineering*

L'excès de contrainte pose problème dans les massifs rocheux surcontraints, en particulier à grande profondeur. Les saignées radiales, obtenues par des forages parallèles rapprochés, fournissent une méthode générale pour maîtriser les contraintes excessives, mais seulement à l'échelle de sections de quelques mètres ; d'après Lombardi, 1986 (figure 4) et Duffaut, 2005 (figure 5), les saignées peuvent être remplacées par de petites galeries tout autour du périmètre futur, et leur efficacité sera d'autant meilleure que le terrain sera plus plastique. Oberth et Lee (1979) comptent aussi sur des saignées pour maîtriser les contraintes d'origine sismique et thermique (celles-ci en cas de pression de gaz dans l'enceinte d'un réacteur).

## **5. L'IMPLANTATION SOUTERRAINE GAGE D'UNE MEILLEURE SÉCURITÉ**

Les cavernes au rocher procurent à la fois le confinement de toute explosion et émission de gaz (protection de l'environnement contre les phénomènes dangereux à l'intérieur de l'installation) et la protection de l'aménagement contre les menaces extérieures, qu'elles soient d'origine naturelle (ouragans, inondation, instabilité des pentes, secousses sismiques, volcanisme) ou d'origine humaine (intrusion, bombardements, fusées, chute d'avions, malveillance et terrorisme. Un remblai de roche concassée peut servir aussi à condenser les gaz en cas de défaillance de l'enceinte. Une telle protection à double sens est valable aussi pour toutes usines et dépôts dangereux, tels qu'engrais nitrates et explosifs (Duffaut, 2002, à la suite de l'explosion de l'usine AZF de Toulouse).

L'accident nucléaire de classe 9 implique la fusion totale du cœur d'un réacteur, qu'aucune enceinte ne peut contenir sans rupture. Le vice président de la société américaine Acres, David Willett a rappelé (1980) que les essais sur les armes nucléaires effectués (à des profondeurs de quelques dizaines à quelques centaines de mètres) au Site d'essai du Nevada, dans un tuf volcanique et au-dessus de la nappe phréatique avaient prouvé l'aptitude du terrain à résister aux très hautes pressions et températures. Au contraire du « syndrome chinois », une masse fondue va rester en place pendant longtemps, perdant lentement sa température et sa radioactivité, sans aucun effet négatif sur l'environnement.

## **6. SOUTIENS ET CONCLUSIONS**

Dans un éditorial au quotidien Le Monde au début de la décennie 70, Robert Poujade, premier ministre de l'environnement au monde, souhaitait que toutes les centrales nucléaires soient souterraines afin d'éviter tout impact négatif. Avant même qu'aucun accident ne soit survenu alors (ou n'ait été publié), c'était une première application du principe de précaution. Au niveau international, le savant russe André Sakharov a affirmé, dans sa préface au livre de Medvedev (1989-1999), que l'humanité ne pouvait pas abandonner l'énergie nucléaire ; aussi demandait-il qu'une législation internationale impose de les placer toutes en souterrain. Devant la tendance générale à la décentralisation, des centrales de taille moyenne, jusque dans la fourchette de 10 à 20 MW des propulseurs des navires de guerre, pourraient être réparties au plus près des villes, économisant ainsi les lignes de transport et les pertes en ligne.

Les centrales nucléaires peuvent être placées en souterrain. Elles peuvent donc être placées partout où le terrain offre des conditions convenables. La stabilité des grandes cavernes ne peut être démontrée par le calcul, quelle que soit la précision des données collectées et la confiance dans les modèles de comportement retenus. C'est la même chose pour les pentes raides des hautes montagnes : il est certain que ni les pics ni les grottes de grande portée ne resteront stables indéfiniment, mais le long terme de la Nature est sans commune mesure avec la vie des œuvres de l'ingénieur. Nous devons reconnaître qu'« il y a très peu de groupes et de spécialistes au monde ayant suffisamment d'expérience pour émettre des conclusions qui ne soient ni évanescentes ni discutables. Chaque nouveau projet est un prototype (un monotype) exigeant une étroite adaptation au site comme c'est le cas des grands barrages. Un haut niveau de confiance dans les équipes chargées du projet et du suivi de chantier est indispensable » (You, Vaskou, 2002).

## RÉFÉRENCES

- De Bruyn D., Abderrahim H.A., Ramaeckers C., Van Cotthem A., 2004. Construction techniques for a large underground structure in aquifer sands. The Myrrha project case, Mol, Belgium, Tunnels et Ouvrages souterrains, 182, 77-84.
- Duffaut P., 1982. Les facteurs qui limitent la taille des cavités ; Symposium SIMR, Aix-la-Chapelle, Wittke W. ed., Balkema, pp 245-253.
- Duffaut P., 1990. Les formes des cavernes, introduction à l'architecture souterraine; in Stockage en souterrain, Rousset G. ed., Presses des Ponts, pp 279-291.
- Duffaut P., 2002. Les usines et dépôts souterrains comme réponse aux risques industriels ; Tunnels et ouvrages souterrains, 171, p 177.
- Duffaut P., 2005. Engineering of large and deep rock caverns for physics research. Séminaire NNN05, Aussois ( <http://nnn05.in2p3.fr> ).
- Gilli E., 1984. Recherches sur le creusement et la stabilité des grands volumes karstiques souterrains. Thèse, Université Aix-Marseille.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground excavations in rock. Inst. Mining and Metallurgy, London.
- Lombardi J., 1986. Particularités des grandes cavernes, & Rapport final Session E, Proc. Intern. Conf. Grands ouvrages en souterrain, Florence, Italy, vol. 1, pp 293-305 & vol. 3, pp 126-135.
- Medvedev G., 1999. La vérité sur Tchernobyl, Albin Michel (après l'édition anglaise de 1989).
- Nakagawa T., 2005. Study of the Hyperkamiokande cavern. NNN05, Aussois (ci-dessus).
- Oberth R.C., Lee C.F., 1979. Underground Siting of CANDU Power Stations, Underground Space, vol. 4-1, pp 17-27, Pergamon Press.
- Pahl A., Schneider H.J., 1982. Unterirdische Bauweise von Kernkraftwerken. Ein Resümee über das internationaler Symposium in Hannover 1981, Symposium SIMR, Aachen.
- Sallström 1977, Symposium Rockstore, Stockholm
- Watson M.B., Kammer W.A., Langley N.P., Selzer L.A., Beck R.I., 1975. Underground Nuclear Power Plant Siting. Nuclear Engineering and Design, 33, pp 269-307.
- Willet D., 1980. Underground Nuclear Power Plant Siting after Three Mile Island, USNC Tunneling Technology Newsletter nr. 29.
- You T., Vaskou Ph., 2001, Les stockages souterrains en milieu difficile. Journées Nationales de Géologie et Géotechnique, Nancy, CDROM.

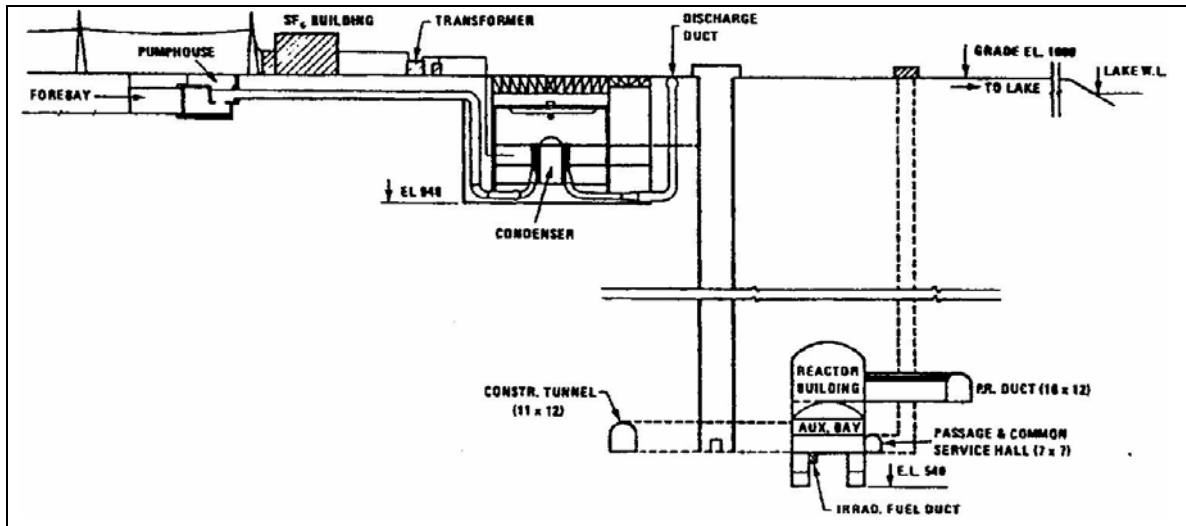


Figure 1 : Coupe d'ensemble d'une centrale souterraine CANDU (Oberth, Lee, 1979).

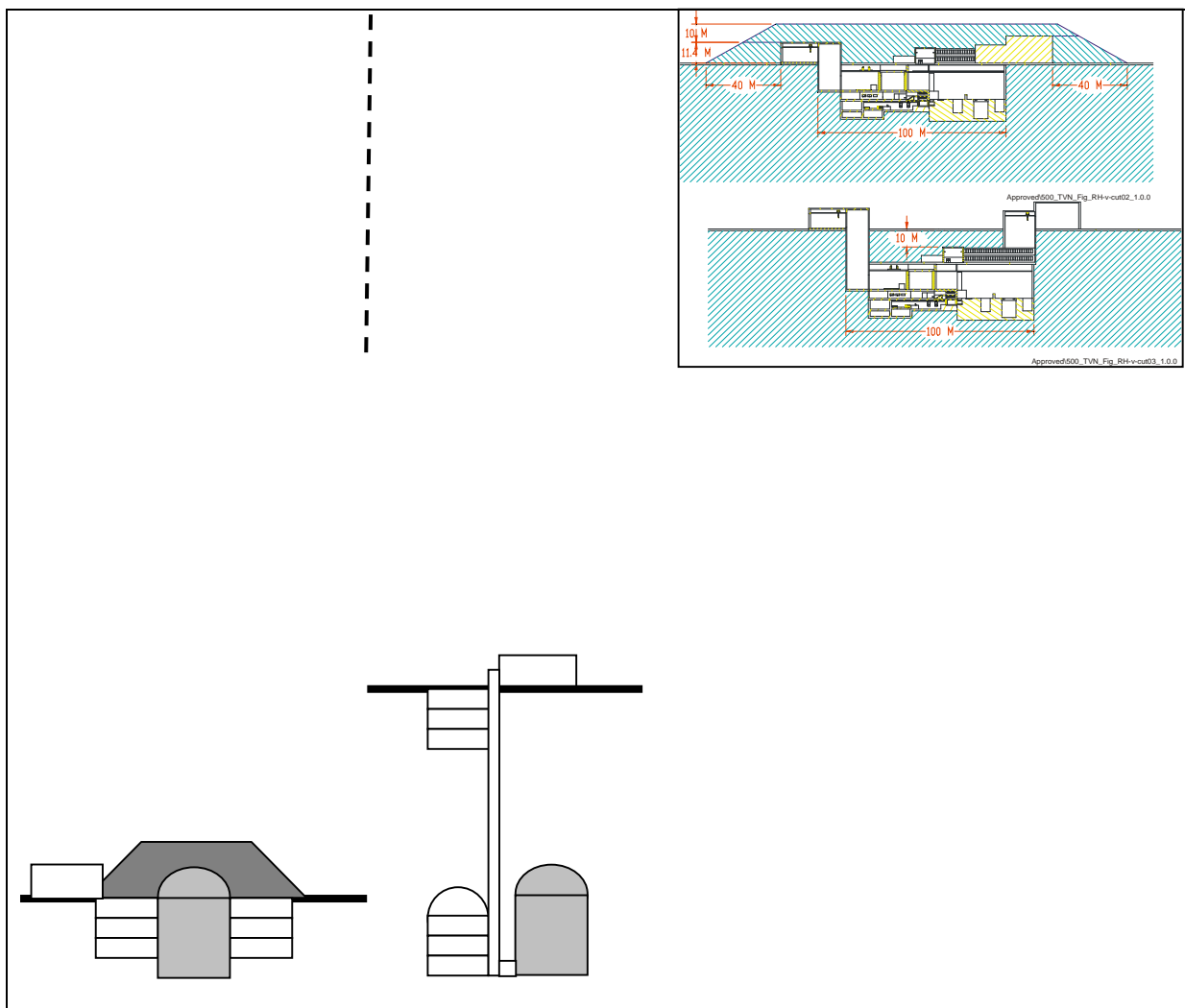


Figure 2 : à gauche, les deux principaux schémas présentés à Hanovre, la fouille recouverte de terre en terrain meuble, ou la caverne profonde au rocher, la salle des machines étant en surface dans les deux cas ; à droite le concept Belge MYRRHA, soit recouvert de terre, soit entièrement en souterrain (De Bruyn et al, 2006).

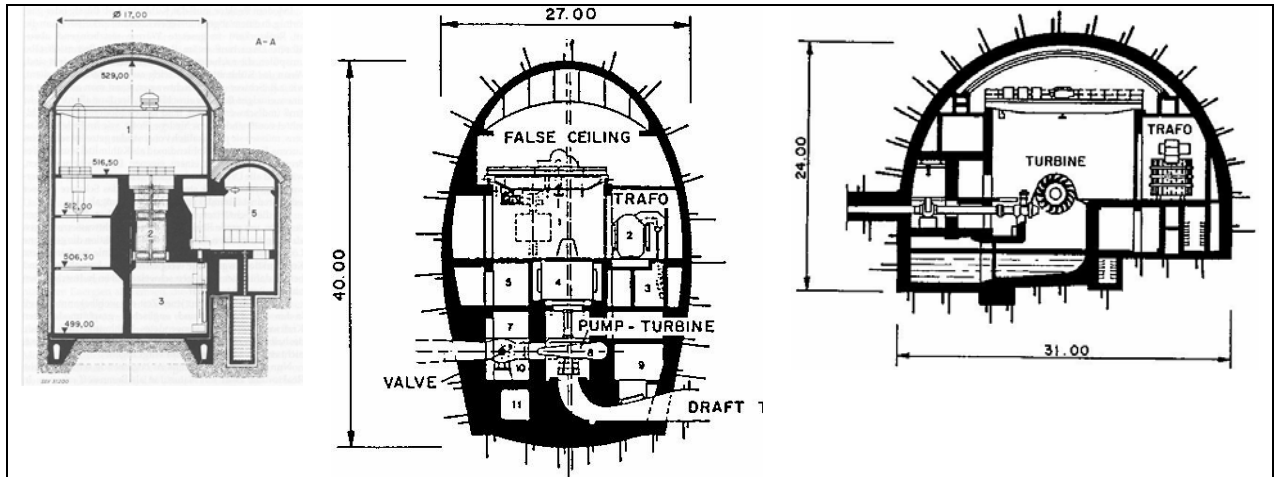
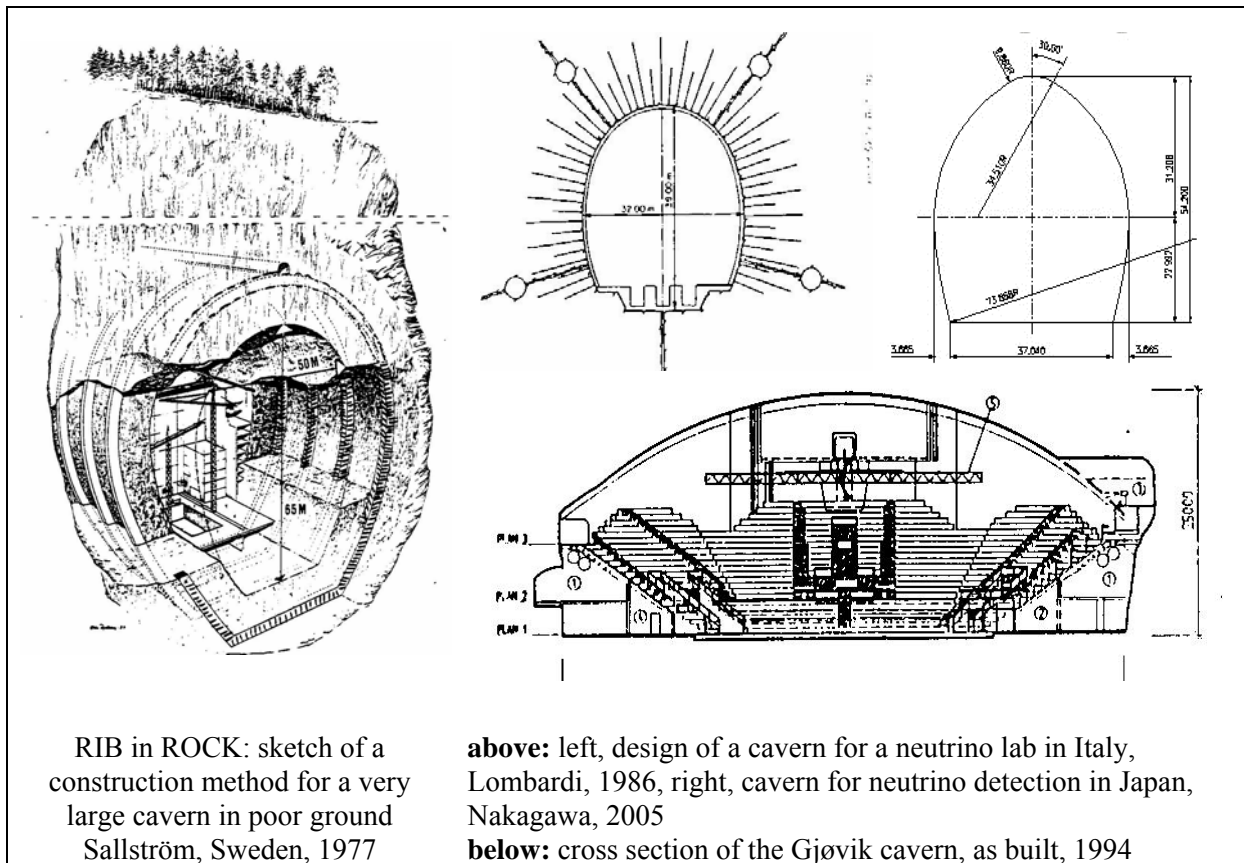


Figure 3 : trois coupes de cavernes typiques à peu près à la même échelle, de gauche à droite centrale nucléaire de Lucens, Suisse, 1966 ; centrales hydro électriques de Porąbka Jar, Pologne, en caverne ovoïde, et de Cirata, Malaisie, 1980 en demi cercle (Hoek, Brown, 1990).



RIB in ROCK: sketch of a construction method for a very large cavern in poor ground Sallström, Sweden, 1977

above: left, design of a cavern for a neutrino lab in Italy, Lombardi, 1986, right, cavern for neutrino detection in Japan, Nakagawa, 2005

below: cross section of the Gjøvik cavern, as built, 1994

Figure 4 : Trois projets de très grandes cavernes à section ovoïde, comparés à la grande portée de la patinoire de Gjøvik, Norvège, seule construite et en service depuis 1994 : à gauche le schéma « RIB in ROCK » (cage thoracique dans le terrain) proposé par Sallström, 1977, pour la construction d'une grande caverne en terrain médiocre ; à droite projets de cavernes pour la détection de neutrinos, de Lombardi, 1980, pour le laboratoire italien du Gran Sasso et de Nakagawa, 2005, pour un laboratoire japonais.

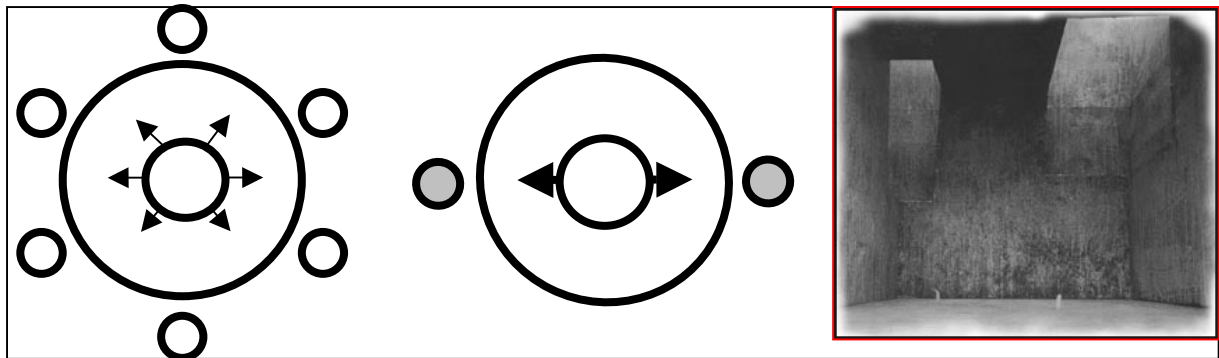


Figure 5 : à gauche, les saignées de décompression autour d'un tunnel sont remplacées autour d'une caverne par de petites galeries ; au centre, lorsque le champ de contrainte est anisotrope, il suffit d'une paire de saignées ou de galeries ; à droite la caverne proposée par le sculpteur Chillida à Fuerteventura (Canaries), proche d'un cube ; ses faces planes et ses angles francs sont exactement ce qu'il ne faut jamais faire en souterrain.