

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

DOCUMENT PUBLIC

**COMPTE RENDU DE LA RÉUNION DE HANOVRE
SUR L'IMPLANTATION SOUTERRAINE
DES CENTRALES NUCLÉAIRES**

par

Pierre DUFFAUT



Département génie géologique

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

81 SGN 476 GEG

Juillet 1981

CONCEPTS GENERAUX DES CENTRALES NUCLEAIRES SOUTERRAINES

On peut distinguer un certain nombre de dispositions dont plusieurs mériteraient seulement le qualificatif enterré, voire recouvert de terre, plutôt que d'être appelées souterraines. En commençant par les moins souterraines, on trouve donc (planche I) :

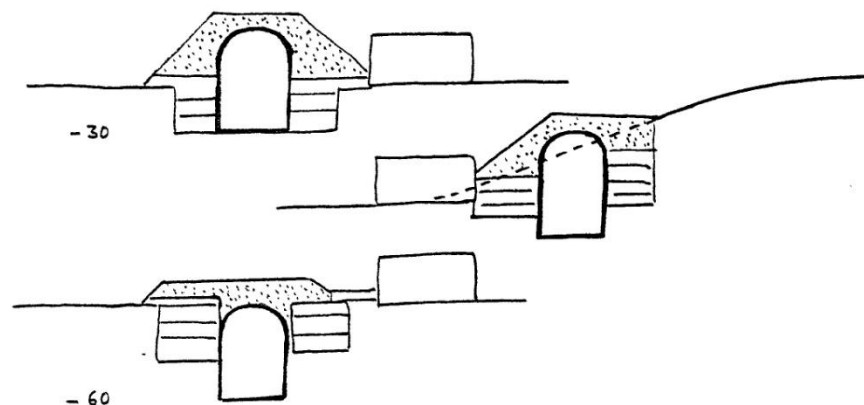
a - Le "mound" c'est-à-dire le tumulus, la butte artificielle : la centrale est construite sur le sol, ou plus souvent enfoncée en terrain plat, éventuellement au pied d'un coteau, et après construction elle est recouverte de 10 à 15 m de remblai. En règle générale seuls le réacteur et les auxiliaires nucléaires et le combustible sont ainsi enterrés, la salle des machines étant construite de façon classique. Ce schéma apparaît dans les études faites en Californie et en Allemagne Fédérale. Il a été développé spécialement pour les plaines d'Allemagne, précisément "en fosse", Grube, avec deux niveaux d'enfoncement -30 ou -60 par rapport à la surface du sol. Il s'agit en principe de terrains meubles soutenus par des parois moulées circulaires, diamètre 60 à 80 m. Plus au large une paroi d'étanchéité permet de déprimer la nappe au voisinage de la paroi porteuse. Le schéma allemand comporte une dalle de béton par dessus le remblai. Enfin, dans certains des schémas présentés une partie du remblai conçu avec une forte porosité, est chargée de servir de volume de condensation en cas de libération de vapeur à partir du circuit primaire.

b - Le puits en terrain rocheux, susceptible de recevoir ultérieurement une couverture, ne diffère pas considérablement du cas précédent. Une profondeur un peu plus grande de l'ordre de 90 m permet d'éviter toute superstructure, toutefois la salle des machines peut rester sur le sol ou bien être à son tour enterrée au ras du sol. Les formes et dimensions du puits sont plus libres qu'en terrain meuble (périmètre anguleux par exemple) on bénéficie aussi d'un accès horizontal à la base lorsque le puits est creusé sur le bord d'un plateau.

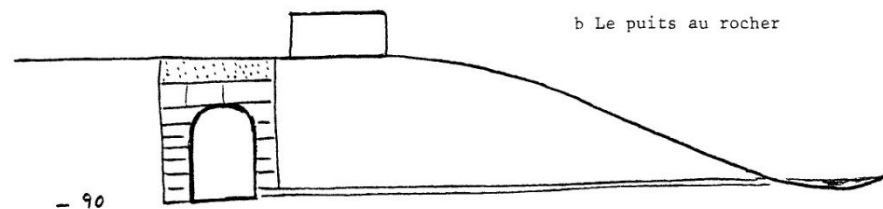
c - La centrale partiellement souterraine, où un ensemble de cavités abrite le réacteur et les parties "chaudes" de la centrale, la salle des machines notamment restant en surface. Ce schéma comporte deux variantes principales, suivant le relief du terrain : en terrain plat, schéma vertical, le réacteur est au-dessous des installations de surface, jusqu'à 400 m dans un projet canadien ; en bord de vallée, schéma horizontal, le réacteur est accessible de niveau (c'est le schéma qui a été déjà appliqué à Chooz, Ardennes, mais il n'en a pas été question).

d - La centrale totalement souterraine à l'exception des accès et en particulier des extrémités du circuit d'eau. D'une façon très générale cette dernière disposition fait appel à des cavités multiples, reliées entre elles par un très grand nombre de galeries. On peut donc subdiviser les variantes d'après l'organisation d'ensemble (planche II).

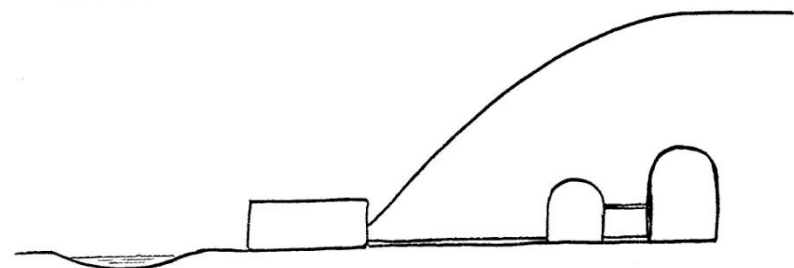
a La butte artificielle

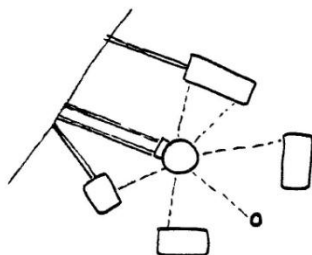


b Le puits au rocher

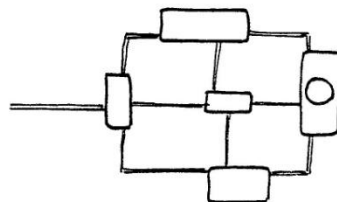


c La centrale souterraine
ex. CHOOZ



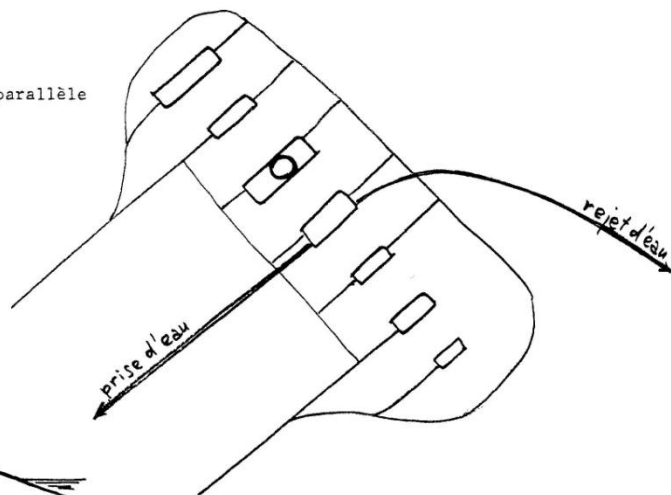


d1 Disposition radiale

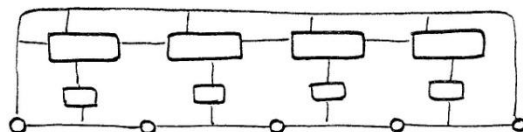


d2 Disposition cartésienne

d3 Dispositon parallèle



d4 Disposition en ligne



d1 - Disposition radiale autour d'une caverne principale abritant le réacteur, étudiée en Suisse. L'ensemble occupe un carré d'environ $400 \times 400 \text{ m}^2$. La caverne pour le réacteur a 70 m de haut, 46 m de diamètre. Des sites concrets auraient été envisagés.

d2 - Disposition "cartésienne" étudiée en Californie : les cavernes et galeries sont disposées suivant deux directions à angle droit, dans un rectangle d'environ $400 \times 500 \text{ m}^2$. Comme dans le cas suivant, les principales cavernes sont toutes parallèles.

d3 - Disposition parallèle étudiée au Japon : 7 cavernes parallèles abritent le réacteur, le groupe turbo alternateur, et tous les services auxiliaires. Ces cavernes sont desservies par diverses boucles qui les entourent et réunies par de nombreuses galeries, à 4 niveaux différents. L'encombrement est maximal d'autant que les cavernes sont largement écartées les unes des autres (60 à 80 m) environ $800 \times 500 \text{ m}$. Il est clair que c'est l'anisotropie du terrain (il s'agit en effet d'un site concret et c'est le seul cas où ce site soit strictement défini par les conditions géographiques : cap montagneux) qui a conduit les projeteurs à fixer la direction des cavernes de façon stricte.

d4 - Enfin disposition en ligne, étudiée au Canada, à 400 m de profondeur pour bénéficier des terrains du socle, sous le rivage du lac Ontario non loin de Toronto. Contrairement à tous les autres projets, qui concernent chacun un seul réacteur, le projet canadien est prévu pour 4 réacteurs, ce qui a l'avantage de partager le coût d'un certain nombre de servitudes et dessertes, alors que aucune extension des dispositions d1 à d3 n'est envisageable. L'encombrement total serait de $200 \times 600 \text{ m}^2$ seulement. Grâce à la qualité du terrain, bien connue ailleurs au Canada, et vérifiée sur le site même par un premier forage, le projet canadien est le seul qui envisage de supprimer l'enceinte du bâtiment réacteur. Autrement dit en cas de rupture du circuit primaire, c'est le terrain nu ou revêtu de béton projeté qui constitue la dernière barrière. Les projeteurs d'Ontario Hydro (entreprise nationale de production d'électricité) ont prévu aussi un tunnel de condensation de la vapeur en cas d'accident, qui a été proposé sous diverses formes dans d'autres schémas souterrains, mais qui pourrait aussi être associé à des centrales traditionnelles.

Les schémas et dispositions présentés sont donc très variés et si la plupart étaient déjà publiés, leur rapprochement justifiait largement la conférence. Les avantages et les inconvénients sont traités dans les deux chapitres suivants.

Les projets présentés ont tous été établis pour des réacteurs nucléaires standards : réacteurs à eau lourde CANDU de 850 MW au Canada, réacteur à eau légère (B ou PWR) de 1 100 MW au Japon, de 1 300 MW en Allemagne Fédérale. Il est assez extraordinaire qu'aucun projet ni commentaire n'ait concerné des puissances plus petites. Ontario Hydro a envisagé des centrales souterraines à l'échelle de villes moyennes, mais n'y a pas fait allusion, et ce concept s'appliquerait particulièrement à des centrales calogènes dans la bande 100 à 300 MW. Jusqu'à ce jour 3 petites centrales nucléaires aujourd'hui fermées ont été construites à Halden (Norvège), Agesta (Suède) et Lucens (Suisse). Quant à la centrale franco-belge de Chooz, elle est exploitée à 300 MW depuis 15 ans maintenant.

Un des soucis principaux des projeteurs a été de ne recourir qu'à des systèmes déjà brevetés et autorisés, en introduisant le minimum de différences susceptibles de nécessiter de nouvelles autorisations.

AVANTAGES DE L'IMPLANTATION SOUTERRAINE

Pendant les premières journées du moins, les avantages étaient implicitement supposés connus de tous, leur discussion étant du ressort des thèmes suivants. Les priorités varient suivant les pays, ce qui rejaillit sur les choix qu'ils ont faits. Les avantages se classent en trois catégories principales dont les deux dernières concernent la sécurité. L'exposé allemand au thème 1 de M. BACHUS (ministère de l'Intérieur) évoque précisément le potentiel de sécurité des constructions souterraines.

- Economie d'espace au sol uniquement dans le cas de centrales entièrement souterraines. Cet argument n'est évoqué que par le Japon mais pour lui il est absolument essentiel. Tout terrain plat en bord de mer est déjà urbanisé ou industrialisé. La situation en souterrain permet aussi de tirer avantages d'un cap montagneux qui sépare la prise d'eau du rejet. Cet argument pourrait jouer aussi pour des centrales à proximité de zones urbaines ou industrielles dans toute région montagneuse (Alpes par exemple). C'est lui qui avait motivé aussi l'implantation souterraine d'une centrale suédoise de chauffage urbain en 1964.

- Protection de la centrale contre les événements extérieurs qu'il s'agisse d'événements fortuits (chutes d'avions/aérolithes, etc.), mais aussi explosions ou incendies d'origine industrielle, inondations par rupture de digues et barrages, ou de faits de terrorisme ou de guerre (les mêmes, volontaires, plus évidemment les bombardements). Le degré de protection augmente avec la profondeur, et aussi, s'agissant de la sécurité de fourniture d'électricité, avec la protection de ce qui reste au-dessus du sol, prises d'eau, lignes électriques, éventuellement tours de réfrigération. En réalité il reste toujours des installations vulnérables, mais qui sont plus faciles à remettre en service que la partie nucléaire.

Une place à part doit être faite pour la protection contre les séismes. Les enregistrements obtenus dans six centrales hydro-électriques du Japon confirment la thèse invoquée jusqu'ici sans beaucoup de confirmation, d'un affaiblissement des vibrations du sol en profondeur (surtout pour les composantes horizontales) mais l'avantage devrait venir surtout de la réduction des structures en béton, et de la possibilité de fixer les pièces lourdes beaucoup plus directement au terrain lui-même (ceci seulement dans les cavernes bien entendu).

- Protection de l'environnement contre les accidents intérieurs (dont l'étude est à la base de la sûreté nucléaire). C'est évidemment le confinement de la vapeur d'eau contaminée en cas de rupture de circuit primaire qui est le plus visé : dans le projet canadien le confinement est assuré par le terrain, les autres conservent les barrières classiques, et ne font donc pas jouer de rôle mécanique au terrain. Toutefois, le volume offert à la vapeur est parfois augmenté, et en particulier un "puits de

chaleur" (c'est-à-dire un échangeur de chaleur souterrain) est prévu pour condenser la vapeur. En outre dans les centrales profondes, il est aisé de disposer d'un réservoir d'eau en charge susceptible d'alimenter la caverne par simple gravité donc échappant aux pannes des pompes. La protection des nappes naturelles environnantes contre des effluents pollués est assurée lorsque l'eau souterraine s'écoule vers la cavité. A une question sur l'insuffisance des barrières en cas de fusion du cœur, le canadien répond que c'est un accident de trop faible probabilité pour être retenu.

Un dernier avantage a été évoqué en discussion c'est la facilité de mise hors service d'une centrale souterraine. L'exemple de Lucens en Suisse (non cité à ce moment) est démonstratif. Certaines cavités seraient utilisées maintenant pour stocker des déchets radio-actifs.

INCONVENIENTS DE L'IMPLANTATION SOUTERRAINE

La première catégorie d'inconvénients concerne les centrales partiellement ou totalement souterraines, ce sont les difficultés réelles ou supposées d'exécution de cavités suffisamment grandes, dont la stabilité soit garantie. En fait les comportements varient depuis de rares projeteurs qui dessinent sans se soucier des qualités du terrain (ils font confiance aux spécialistes et donc se mettent à l'aise), jusqu'à ceux qui n'osent pas franchir les limites des cavités déjà classiques pour abriter des centrales hydro-électriques.

La plupart des auteurs se préoccupent de la portée des cavernes allongées horizontalement, et limitent cette portée à 31 m, 35 au Canada. Plusieurs notent que la hauteur des cavités, comparée à la portée, ne pose pas de problème particulier (46 à 69 m). Les japonais ont présenté un graphique portant les portées et hauteurs de toutes les cavités hydro-électriques. En Suisse et en Allemagne sont au contraire étudiées des cavernes à axe de révolution vertical, de diamètre 46 m en Suisse (hauteur 70) et 64 m en Allemagne. Mais dans ce dernier cas il s'agit plutôt d'un puits vertical que d'une caverne.

Les auteurs allemands insistent sur l'audace de la centrale hydro-électrique de Waldeck II, en service depuis quelques années, et considérée comme la caverne industrielle de plus grande section. Ils semblent considérer qu'il n'est pas raisonnable de dépasser les 33 m de sa portée. Il y a lieu toutefois de remarquer que la nature offre des terrains plus favorables que celui de Waldeck (schistes et grès). Le chapitre suivant traitera plus précisément les problèmes de construction.

Deux problèmes de stabilité supplémentaires ont été évoqués en sus de l'équilibre statique normal ; l'effet des séismes étudié par éléments finis au Japon et l'effet d'une élévation brutale de la température intérieure en cas de rupture de circuit primaire (accident dit de référence pour le calcul des enceintes). Dans ce cas également étudié par éléments finis, mais au Canada, les contraintes approchent localement la résistance à la compression mais il ne s'agit que de zones de faible épaisseur et un écaïl-

lage superficiel ne semble pas présenter alors d'inconvénients sérieux (on se rappelle qu'il s'agit de cavernes en rocher nu). Pour les centrales enterrées allemandes, un arrosage de la face extérieure de l'enceinte est prévu.

Deuxième catégorie d'inconvénients : l'eau souterraine non par les difficultés qu'elle entraîne pour le projeteur (qui rentreraient plutôt dans la catégorie précédente) mais pour le danger de pollution en cas d'émissions radio-actives. D'une manière générale c'est l'écoulement de la nappe encaissante vers la cavité qui est considéré comme la meilleure sécurité à ce sujet. Dans le cas des centrales enterrées dans un sol meuble aquifère, le rabattement d'un "anneau de garde" est maintenu autour de la construction proprement dite. Dans le cas d'une caverne profonde (Canada) la nappe est évidemment très au-dessus de la cavité, et la très faible perméabilité rend négligeables les débits qu'il faut pomper (les vitesses très lentes de l'écoulement pourraient permettre une certaine diffusion à contre courant). Les cavernes moins profondes, accessibles à flanc de colline, sont à ce point de vue les moins bien placées, à moins de terrains très peu perméables dont on ne perturbera pas la nappe naturelle pendant les travaux de creusement. Au contraire les japonais précisent qu'ils maintiennent la nappe rabattue au-dessous des cavernes utilisées.

La troisième catégorie d'inconvénients est proprement économique, c'est le supplément de coût et de délai. Ces suppléments ont été estimés par presque tous les projeteurs : le délai augmente de 18 à 30 mois environ, l'augmentation de coût présente une fourchette beaucoup plus large, soit entre 11 et 35 %. Encore il y a lieu de constater que beaucoup des centrales sont implantées dans des sites où les terrassements et les fondations spéciales représentent un supplément important en délai et en coût (Blayais, Paluel, Flamanville notamment).

Le supplément de délai sert évidemment à creuser les cavités, mais il tient compte aussi d'une façon mal précisée (et peut-être sous estimée) des difficultés d'approvisionnement et de montage en sites exigus, les cavernes, accessibles sur une part très faible de leur surface, alors qu'un angle solide 2π est libre autour d'un site en plaine. Pour obtenir des conditions acceptables il semble nécessaire :

- ou bien de travailler dans des fosses à ciel ouvert, à la rigueur dans des puits de grand diamètre,

- ou bien de supprimer presque tout bétonnage intérieur et de préférer des charpentes métalliques plus rapides à monter. Lorsque la caverne constitue l'enceinte (Canada) le délai supplémentaire est alors minimisé.

Enfin une étude a été présentée des inconvénients pour l'exploitation. Mais elle a été limitée au schéma enterré, qui est encore plus compact qu'une centrale traditionnelle, cette disposition étant jugée favorable. Au contraire dans les schémas souterrains présentés, les distances sont augmentées, parfois de façon considérable. Les japonais ont étudié assez exhaustivement les conditions de circulation du personnel, en séparant clairement les zones susceptibles de contamination, et en multipliant les issues de secours.

DETAILS DE CONSTRUCTION DES CAVERNES

Dans tous les cas c'est le bâtiment réacteur qui est le plus contraignant par ses dimensions. Les conceptions retenues se classent en 3 catégories (planche 3).

- En Allemagne l'enceinte sphérique (Cf. Biblis) est maintenue notamment pour les schémas enterrés, ce qui conduit semble-t-il à des espaces mal utilisés puisque le terrassement est un puits à fond horizontal. La couverture présente un pan coupé conique. Un schéma plus aplati en forme de goutte d'eau, posé sur le sol a été présenté pour réduire la hauteur totale en cas de centrale peu enfoncée.

- Les projets des Etats-Unis et du Japon placent une enceinte traditionnelle (cylindre de béton à axe vertical) au centre d'une caverne horizontale allongée, dont le volume restant abrite les auxiliaires nucléaires.

- Le projet Suisse place le réacteur dans une caverne spécifique en cylindre à axe vertical, fermée par une coupole à la partie supérieure.

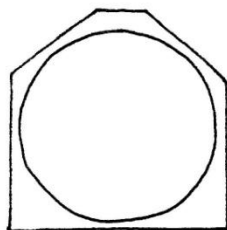
Aucune explication n'est fournie sur l'excavation de la coupole. Il ne semble pas qu'il y ait d'exemple de telles réalisations. Du moins leurs faibles courbures (rayon 23 m) doit permettre de les obtenir par facettes planes à l'échelle des trous de mine (3,75 m pour 10° d'arc).

Sur la voûte deux conceptions sont en présence : le plein cintre et le "mushroom" (champignon). Les japonais appellent ainsi la voûte de leurs centrales hydro-électriques de portée plus grande que la caverne proprement dite afin de loger un pont roulant. Cette forme conduit en général à surbaïsser la voûte (pour éviter d'excaver un espace inutilisable au-dessus du pont roulant) donc à l'encastrement assez fortement, en augmentant encore la portée au moment de l'excavation.

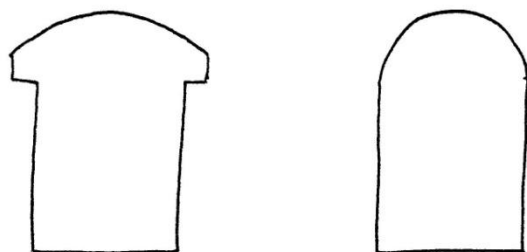
Cette section en champignon est peu favorable à la stabilité des hautes parois verticales qu'il faut alors confirmer par des tirants précontraints. Les calculs de stabilité montrent bien que c'est la zone des retombées de voûtes qui est la plus sollicitée, et surtout en cas de séisme. Cette section est de plus en plus abandonnée dans les cavernes pour centrales hydro-électriques européennes.

Le volume supplémentaire dégagé par la voûte en plein cintre devient d'ailleurs utile pour un bâtiment réacteur puisqu'il contribue à diminuer la pression en cas de rupture du circuit primaire.

Le dessin en plein cintre est surprenant au Canada dans la mesure où les cavernes qui abritent la station NORAD de North Bay ont au contraire des voûtes très tendues (opposées à celles de la station de Colorado Springs qui a le même plan d'ensemble, mais des voûtes en plein cintre). Ce dessin particulier avait été prévu en raison de fortes contraintes horizontales, mais il n'a pas évité un écaillage différé qui s'est poursuivi de nombreuses années.



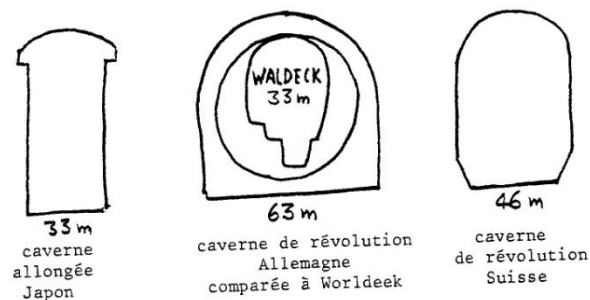
1 - Enceinte sphérique en puits (Allemagne)



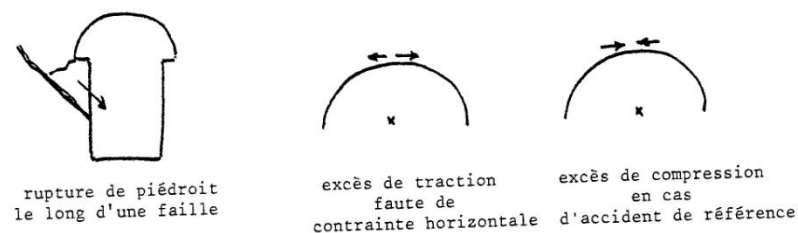
2 "Champignon" (Japon) opposé à plein cintre (Canada)

PLANCHE III COUPES DE BATIMENTS REACTEURS

1. Comparaison de quelques sections



2. Types d'instabilité classiques



3. Schéma de boulonnage et tirants

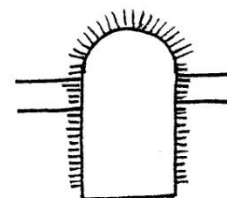


PLANCHE IV SECTIONS ELANCEES OU RAMASSEES

Au-dessous de la voûte tous les projets dessinent de hautes parois verticales (planche 4), dont l'équilibre exige évidemment qu'il n'y ait pas de failles ou autres discontinuités à pendage défavorable. Le cas échéant ces problèmes sont résolus par des tirants calculés précisément pour les "coins" qu'il faut soutenir. Peu de réalisations ont jusqu'ici recherché les cavernes en forme d'oeuf pour mobiliser un effet de voûte sur les parois latérales (c'est toutefois le cas de Waldeck II dans une certaine mesure).

Enfin le raccordement avec le radier, lorsqu'il est à angle droit, supporte toujours une forte concentration de contrainte que certains projecteurs évitent par un congé.

La stabilité des voûtes dépend beaucoup de la contrainte horizontale naturelle. A défaut de cette contrainte, une traction horizontale s'y manifeste. Ce point n'a pas été évoqué, et en effet ce sont bien les parois latérales qui sont en général critiques (toutefois les schémas de boulonnage présentés emploient tous des boulons plus longs en voûtes qu'en parois, par exemple 9 m au lieu de 6). Au Canada, la contrainte horizontale en voûte devient critique en compression en cas de choc thermique. Pour éviter un écaillage à cet endroit, une saignée est proposée.

L'espacement entre galeries et cavernes est un problème important sur lequel les solutions diffèrent (planche 5). Le schéma japonais est à cet égard le plus prudent : l'espacement entre deux cavernes parallèles est supérieur à leur hauteur, afin que le "pilier" qui les sépare n'apparaisse pas élané. Dans le domaine hydro-électrique cette règle n'a pas été toujours respectée mais du moins le nombre de cavernes est généralement limité à 2 et en cas de faiblesse du pilier intermédiaire on peut compter sur un effet de voûte global (par exemple à Chooz). Ceci n'est plus vrai pour des cavités plus nombreuses. D'ailleurs la multiplication des galeries de liaison entre les cavernes est un élément non négligeable d'affaiblissement des piliers (et il y a lieu de soigner tout particulièrement l'exécution et le soutènement des intersections avec les cavernes).

Dans une gamme de sections plus modeste les cavernes parallèles sont classiques pour les stations d'épuration des eaux scandinaves (150 à 200 m²) et pour les stockages de produits pétroliers (300 à 500 m²).

Seuls les japonais annoncent le volume de déblais de leur projet : 2 millions de mètres cubes dont moitié pour les cavernes (au nombre de 7) et moitié pour les galeries d'accès et de liaison. La multiplication des cavernes augmente les espaces perdus, et allonge les galeries de liaison (d'autant que l'espacement des cavernes est voulu important).

De même un seul rapport toujours japonais, a abordé les séquences d'excavation, à partir de la voûte et en descendant par banquettes successives. Manifestement la méthode indiquée est très précautionneuse lorsqu'on la compare aux séquences utilisées en Scandinavie pour les cavernes de stockage.

C'est bien sur ce point que le principal problème se pose : ou bien on peut choisir des sites "capables" de grandes cavités (roches massives suffisamment résistantes), ou bien il faut accepter des sites moins favorables. Dans le premier cas (projets canadien et suisse) la solution souterraine est relativement engageante car elle exige un minimum d'adaptations et un minimum de délai et de coût supplémentaire. Dans le second, elle reste techniquement réalisable, mais au prix de difficultés qui paraissent en condamner l'économie.

Plusieurs projets précisent le soutènement qu'ils recommandent : boulonnage systématique des parois rocheuses, 1 boulon pour 4 m² en général, de longueur 6 à 9 m (9 m en voûte).

ETUDE DES ECOULEMENTS EN MILIEU POREUX OU FRACTURES

Plusieurs rapports (dont l'auteur a seulement lu les résumés) abordent l'étude des écoulements.

- Soit écoulement de vapeur en milieu poreux : il s'agit alors d'utiliser la couverture meuble d'une centrale enterrée à la fois comme volume offert à l'expansion, comme puits de chaleur, et comme site d'adsorption de produits radio-actifs. Les modélisations disponibles des flux de vapeur et des flux de chaleur permettent de choisir la granulométrie, la porosité et le volume du remblai. Elles s'appliquent aussi au concept de filtres à graviers étudiés en Suède (et qui devaient compléter les centrales à construire sur le sol avant l'arrêt des constructions nucléaires). Un volume de 100 000 m³ est proposé, soit fractionné en silos de béton construits sur le sol, soit sous forme d'un tunnel (1 km avec section 100 m² par exemple). Ce concept de tunnel de condensation est commun à de nombreux projets présentés qui ne précisent pas le volume nécessaire. Pour d'autres applications (stockage d'eau chaude) des projets suédois ont été présentés à Rockstore 80, où le remplissage du tunnel est assuré par le foisonnement des dernières banquettes tirées à l'explosif. Le prix du volume fini est donc inférieur à celui d'une caverne vide.

- Soit écoulement de fluide, voire migration de produits radio-actifs en milieu rocheux fracturé. Au Japon en particulier des essais de circulation d'air ont été réalisés in situ, à l'aide d'un traceur. Les autres études évoquées portent sur l'écoulement de liquides et rejoignent donc celles qui sont faites dans le cadre d'étude pour le stockage et l'environnement de déchets radio-actifs.

CONTRIBUTION DE LA GEOLOGIE DE L'INGENIEUR

Le rapport de A. PAHL (BGR) comporte 3 parties principales :

- brève revue de l'état des connaissances en géologie appliquée aux ouvrages souterrains : il souligne que le terrain constitue une part essentielle de ces ouvrages, grâce à l'effet de voûte, puis passe en revue les défauts du terrain, failles et diaclases, altération et décompression, venues d'eau. Après quoi il compare la caverne demandée par le projet allemand (diamètre 65 m) à Waldeck II, la plus grande caverne de Génie Civil, construite jusqu'ici (portée 33 m, hauteur 54 m et longueur 106 m, section 1 400 m²) stabilisée grâce à des tirants précontraints de 135 tonnes (longueur 25 m) et dont il rappelle les déformations pendant la construction ;

- rappel des propriétés de roches utiles aux ouvrages souterrains et recherches des zones d'Allemagne susceptibles de fournir des sites (toujours au voisinage de grands fleuves). Trois types de roches sont envisagées : le type Quartzite (incluant granite et gneiss) : le type Schiste ; et le type Grès bigarré (incluant les calcaires secondaires) ;

- recherches pour le choix de sites, comportant des propositions d'ouvrages de reconnaissance et d'essais, en particulier dans une première phase de 3 ans, des cavernes modèles de dimensions croissantes (10, 38 puis 150 m²) puis une deuxième phase de 4 ans pour excaver une caverne d'essai de portée 63 m avec une voûte en plein cintre.

Dans la discussion qui a suivi A. PAHL a évoqué l'intérêt d'une certaine latitude dans la disposition des cavernes permettant d'éviter telle faille en allongeant la distance entre deux cavernes. Ce genre d'adaptation est déjà bien difficile à obtenir pour les centrales hydro-électriques, il paraît hors de question ici. Et d'ailleurs la connaissance insuffisante des massifs rocheux n'exclurait pas qu'on tombe de Charybde en Scylla.

CONTRIBUTION DE LA MECANIQUE DES ROCHES

Le rapport de W. WITTKE (Université Aix-la-Chapelle) a comporté une introduction sommaire sur les modes de rupture des roches anisotropes, puis le traitement de 4 exemples de cavernes.

- Wehr, centrale hydro-électrique en Forêt noire, 20 x 32 m² granite sous 350 m de couverture, mais avec une faille oblique limitant un coin instable.

- Turlough Hill, centrale hydro-électrique en Irlande, 28 x 23 m² sous 100 m de couverture, dans un massif à nombreuses failles verticales.

- Bremm, caverne d'essai déjà ancienne 24 x 9 m² dans un schiste ardoisier fracturé, très anisotrope.

- Estangento Sallente, centrale hydro-électrique en Espagne, 20 x 34 m² sous 100 m de couverture, mais avec une contrainte horizontale élevée.

Par ces exemples W. WITTKE montre que la mécanique des roches est à même de résoudre des problèmes très variés, notamment grâce à la méthode des éléments finis. Puis il souligne l'effet d'échelle : les contraintes élastiques ne dépendent guère de la taille et même les déplacements paraissent augmenter moins vite que la portée tant qu'il n'y a pas d'anomalie. Mais toute anomalie, discontinuité, anisotropie du terrain, et forte contrainte horizontale se trouve exacerbée par l'augmentation de taille des cavités.

Toutefois, il n'a pas évoqué précisément la stabilité des cavernes de grande dimension requises par les projets nucléaires, ni formulé d'opinion sur les limites qu'il y aurait lieu d'assigner à leur portée (ce sujet figure au programme d'un prochain symposium international de mécanique des roches qu'il organise à Aix-la-Chapelle en mai 1982, sous le titre "Cavités souterraines de grande portée").

REMARQUES FINALES ET CONCLUSIONS

Manifestement il y avait coexistence dans la salle de partisans et de détracteurs des solutions souterraines, ceux-ci invoquant les coûts et délais supplémentaires et les difficultés d'autorisation, ceux-là les avantages en cas d'accident extérieur ou intérieur. Si les Allemands sont apparus partagés, les autres pays semblent n'avoir envoyé que des partisans. Le dernier orateur inscrit, suédois, a présenté un rapport très favorable (pour une solution en puits plutôt que totalement souterraine).

L'importance du choix de sites favorables apparaît primordiale pour les solutions souterraines. Ce qui n'a pas été dit, c'est que comme pour certains stockages, et à la différence des centrales hydro-électriques, le choix du site exact peut être assez largement ouvert, ce qui donne des chances de succès à une reconnaissance géologique détaillée.

Les roches salines n'ont pas été évoquées et pourtant elles abritent les plus grandes cavernes artificielles actuelles. Les cavités de dissolution à axe vertical atteignent couramment le diamètre de 64 m. Les roches tendres sont peut être aussi sous estimées lorsqu'elles ne sont pas parcourues de diaclases. La craie (du bassin parisien par exemple) devrait supporter des cavernes de grande dimension sans requérir un soutènement prohibitif.

Le pendage des terrains sédimentaires est un élément important de la stabilité des cavernes. Le pendage horizontal est très favorable dès lors que les diaclases sont verticales.

Sous réserve de ce qui a pu être dit à la fin de la réunion, les principales conclusions pourraient être :

1 - Les centrales souterraines sont mieux protégées contre les événements extérieurs et l'environnement est mieux protégé contre les accidents nucléaires à l'intérieur. Ceci est incontesté.

2 - Les schémas envisagés sont nombreux. Aucun ne tire tout le bénéfice possible d'une implantation souterraine, faute de s'écarter largement des schémas classiques en surface. La confrontation devrait toutefois réduire les solutions.

3 - Les centrales souterraines sont techniquement réalisables dans une large gamme de terrains, mais les centrales profondes ne sont raisonnablement économiques que dans des roches "capables" de grandes cavités (coût supplémentaire comparable à celui imposé par des fondations difficiles ou des terrassements importants).

4 - La principale difficulté vient des habitudes très strictes codifiées dans tous les pays pour l'industrie nucléaire. On a donc préféré dans tous les pays apporter le moins possible de changement aux schémas autorisés en surface pour n'avoir pas à reprendre des études et des négociations avec les autorités. En outre il sera difficile de justifier la stabilité des cavernes comme on le fait pour celle des enceintes en béton.

5 - Pour que des projets prennent corps il faudrait ou bien une incitation très forte (soit pour des raisons stratégiques, soit à la suite d'un accident grave par exemple) ou bien une démonstration convaincante que des sites existent pour de très grandes cavernes.

Le projet japonais : schéma montrant les sept cavernes parallèles.
Les cavernes sont toutes au niveau de la mer, et le massif est drainé par des galeries intermédiaires.
Un grand nombre de galeries d'accès et de liaison sont nécessaires à différents niveaux.

PLANCHE V

