

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 113 (1987)
Heft: 12

Artikel: Centrales nucléaires souterraines
Autor: Buclin, Jean-Paul
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76389>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Centrales nucléaires souterraines

par Jean-Paul Buclin, Lausanne

L'auteur, ingénieur diplômé de l'EPF-Zurich, a travaillé quatorze ans dans des centrales nucléaires souterraines. De 1959 à 1962, il a participé à la construction de la centrale expérimentale HBWR en Norvège, comme chef du département d'électricité et de mécanique. Entre 1963 et 1968, il a entrepris des études de sécurité pour la centrale nucléaire expérimentale de Lucens, dirigé la préparation, puis l'exécution de la mise en service et des essais à caractère nucléaire de cette installation. Après l'avarie de janvier 1969, il fut chargé du démontage, terminé en 1972, du réacteur accidenté.

Jean-Paul Buclin a siégé de 1967 à 1986 dans la Commission fédérale de la sécurité des installations nucléaires (CSA), organisme que consulte le Conseil fédéral pour prendre position sur les requêtes déposées en vue de la construction et de l'exploitation de ces installations. La CSA rédige, puis publie des directives et elle s'exprime sur des sujets généraux touchant à la sécurité nucléaire.

A la demande de cette commission, l'auteur a rédigé sur les centrales nucléaires souterraines un rapport dont les pages suivantes constituent une version abrégée et simplifiée¹.

1. Introduction

Depuis Tchernobyl, des voix s'élèvent pour réclamer la mise en place de systèmes de réacteurs intrinsèquement plus sûrs, et notamment la construction souterraine. Les milieux spécialisés quant à eux avaient déjà proposé des améliorations de la sécurité inhérente, sans parler de construction souterraine.

Les raisons qui pourraient pousser à envisager de construire sous terre sont multiples: les instincts ataviques, l'habitude, l'intuition, l'ignorance, la peur; la prudence, une meilleure acceptation par le public; l'esthétique, la réduction des impacts sur l'environnement; le manque de terrains appropriés; la protection contre des événements externes, dont les actes de guerre; une résistance accrue contre des événements d'origine interne; la proximité des zones à forte densité de population, etc.

2. L'instinct, l'habitude, l'ignorance ou la peur ?

De nombreuses centrales hydrauliques ainsi que des ouvrages militaires ont été construits sous terre soit pour des raisons d'optimisation de l'aménagement, soit pour en protéger l'ensemble.

Après la conférence des Nations Unies de 1955 à Genève «L'atome pour la paix», l'un des premiers projets de réacteur civil expérimental a vu le jour en Norvège, à Halden. Le potentiel de danger du nucléaire était reconnu, mais à cette époque pourtant proche d'Hiroshima et de

Nagasaki, aucune peur irréflectée ne se manifestait: les habitants du quartier (réacteur construit à la périphérie d'une ville de 10 000 habitants) ne s'émouvaient pas particulièrement.

La Norvège était l'un des pays qui possédaient des centrales hydrauliques souterraines. Par intuition ou habitude, il apparut normal de placer le réacteur dans le rocher. Les études de site furent sommaires. Alors qu'une excavation voisine sur la rive gauche de la rivière montrait une bonne qualité du granit, la qualité du rocher d'en face (gneiss) était moindre. De fortes infiltrations apparurent. Pour cette raison, la caverne fut entourée de murs et d'une voûte en béton, sans peau d'étanchéité. Entre le rocher et la voûte il y a un espace, mais il n'est pas visitable. Depuis quelques années, il est maintenu en surpression. L'eau de roche (environ 1 m³/h) est pompée puis conduite vers des réservoirs de contrôle et de stockage. La zone des sas de pénétration a été rendue imperméable par injections de coulis entre béton et rocher et de résine entre les conducteurs électriques et les parois de pénétration; de cette manière, des gaz et des matières solides entraînées par ceux-ci en cas de dérangement ne pourraient pas pénétrer dans les bâtiments de service contigus à la galerie d'accès. L'exploitant s'efforcerait aussi de maintenir un équilibre entre les pressions à l'extérieur (air comprimé) et à l'intérieur des parois en béton. Si la surpression externe pouvait être maintenue, on éviterait une contamination de l'eau de roche. Dans le cas contraire, les parois de béton et l'épaisseur de rocher représenteraient un filtre efficace pour les matières solides. Ce type de confinement précède certaines idées modernes (France, Suède, 1980-1985) de filtres «rustiques» placés entre l'enceinte primaire et l'environne-

ment. Des essais de tenue en pression de la caverne ont lieu régulièrement à Halden.

Ce réacteur expérimental HBWR fonctionne encore, après un quart de siècle de loyaux services rendus aux nations participantes, dont la Suède, la RFA, le Japon, les Etats-Unis.

3. La prudence et l'acceptation

Les promoteurs des premiers projets de centrales expérimentales en Suisse dans les années cinquante (Thermatom, sous le laboratoire des machines de l'EPFZ; Suisatom, à Villigen; Enusa et prédécesseurs, à Cossonay, Moudon, puis à Lucens) envisageaient chaque fois une construction souterraine, étant conscients de la difficulté à confiner toute fuite radioactive et du risque, encore mal connu, lié à ces fuites.

Des quelque cinquante centrales nucléaires construites dans les années soixante, trois seulement furent souterraines:

- Agesta, en Suède, mise en service en 1964
- Chooz A1, en France, mise en service en 1967
- Lucens, en Suisse, mise en service en 1967.

Aujourd'hui, Chooz A1 est la seule centrale nucléaire souterraine en exploitation parmi plus de 350 centrales dans le monde. Aucune construction souterraine n'est en cours, ni même en projet à notre connaissance.

C'est par prudence que ces trois centrales, parmi les premières construites en Europe, le furent dans le flanc d'une colline. On pensait intuitivement que le confinement serait d'emblée amélioré et que l'incidence sur l'opinion publique, qui n'était pas à l'époque une préoccupation majeure, n'en serait que positivement influencée.

3.1 Agesta

Cette centrale chaleur-force se trouve à 7 km de la cité satellite de Farsta, au sud de Stockholm. Elle servait au chauffage à distance (60 MWth) de cette cité (environ 50 000 habitants) et fournissait de l'électricité (10 MWe). L'exploitation a été arrêtée pour cause d'obsolescence en 1974.

Afin d'empêcher des venues d'eau de roche vers l'intérieur, les parois et voûtes bétonnées avaient été entièrement revêtues d'une tôle soudée en acier inoxydable. Les tensions résiduelles dues à la soudure, combinées avec l'effet de l'eau de roche (pH < 6), provoquèrent une corrosion sous contrainte, en plus de la corrosion par piqûres. Le revêtement n'était que très partiellement inspectable et pratiquement irréparable.

3.2 Chooz A1

Il existe certes des descriptions du confinement de cette centrale. L'auteur n'a

¹L'original peut être demandé à l'auteur, ainsi qu'une liste d'environ 70 références bibliographiques.

pas étudié de façon approfondie la conception et la construction, ni suivi les essais ultérieurs de ce confinement. La valeur de l'expérience personnelle étant irremplaçable, il n'est donc pas en mesure de s'exprimer.

3.3 Lucens

Nous ne traiterons ici que des aspects liés à la construction souterraine, essentiellement les faiblesses apparues. Ne seront pas évoqués les raisons qui justifiaient le choix d'une technique, ni la décision de l'expérimenter, ni les avantages que la Suisse a retirés de cette épopée. L'ère des centrales de puissance ne se serait pas présentée aussi favorablement sans Lucens.

La conception et la construction du confinement de Lucens ont été décrites à l'époque. L'excavation des cavernes eut lieu de 1962 à 1964, dans la molasse, simultanément pour les trois cavernes:

1. caverne du réacteur: cylindrique; H: 35 m, ϕ : 20 m
2. caverne des machines: rectangulaire; L $\times$ B $\times$ H: 46 $\times$ 10 $\times$ 20 m
3. caverne du combustible: rectangulaire; L $\times$ B $\times$ H: 40 $\times$ 7 $\times$ 17 m.

Les techniques d'ancrage profond n'étaient pas encore au point. Il s'agissait de cavernes petites et étroites. Construites l'une près de l'autre et reliées par des passages de 10 $\times$ 10 m dont la longueur avait été réduite au dernier moment, ces cavernes (et le pilier central) ont atteint, voire dépassé leur limite de stabilité. D'importants renforcements durent être ajoutés, restreignant ainsi le volume intérieur disponible.

L'étanchéité fut réalisée comme suit:

- couche de drainage en béton maigre appuyée contre le rocher (40 cm)
- couche de gunite extérieure (1 cm)
- multicouche formé de trois feuilles d'aluminium se recouvrant, chacune insérée dans une protection en bitume et appliquée à chaud contre la gunite extérieure
- couche de gunite intérieure (1 cm)
- couche de béton armé porteur (50 cm).

Le niveau de la nappe d'imbibition du rocher se trouvait à mi-hauteur des cavernes. Cette eau s'accumulait au fond des excavations à raison de 5 m³/j pour la caverne du réacteur et de 5 m³/j pour les autres cavernes et les galeries de liaison. Cette eau est pompée depuis 1963. Le débit varie peu au cours des saisons. Au contact de l'air, la molasse se désagrège. Des résidus de molasse et de béton (sable) ont rapidement colmaté la moitié inférieure du drainage. La calcite a terminé ce phénomène d'obturation. Aujourd'hui, le système de drainage est complètement pétrifié.

Des cadres métalliques furent posés aux passages entre cavernes. Le multicouche y était réuni au moyen de contre-plaques. Dans ces constructions, les encoignures et les parties surplombantes sont diffi-

les à réaliser. Des passages qui n'étaient pas étanches durent être repiqués pour rétablir l'étanchéité. Le pH de l'eau augmenta jusqu'à 11. En contact, l'aluminium du multicouche aurait été rongé. Des injections eurent lieu dans la zone de liaison avec la caverne des machines. Ont-elles été utiles ou nocives? Des venues d'eau furent enregistrées dès la fin de la construction. Elles furent captées et menées aux puisards des cavernes.

Deux vannes télécommandées permettaient - en cas d'accident grave - de décharger le confinement vers le rocher. On espérait retenir ainsi les produits de fission solides ou solubles.

Les essais d'étanchéité de la caverne du réacteur montrèrent que les spécifications n'étaient pas toutes atteintes. Néanmoins, la surface de fuite équivalente n'atteignait pas 1 cm², pour une surface de 3000 m². Les essais d'étanchéité du système de drainage de la caverne du réacteur montrèrent une valeur inférieure à la spécification. Il ne fut guère possible d'en expliquer la cause, ni de la corriger. D'une façon générale, les systèmes d'étanchéité de Lucens ne pouvaient être ni inspectés, ni réparés.

Le comportement du confinement durant l'avarie de janvier 1969 se trouve décrit dans le rapport d'enquête. Rappelons quelques faits:

- Après l'obtention de la pression d'équilibre (vidange du circuit primaire en 4 min; refroidissement à la surface des parois; appoint en CO₂ de secours), celle-ci a légèrement augmenté: les appoints d'air comprimé (joints des soufflantes et commande de vannes) surcompensaient les petites fuites.
- Vu la faible gravité radiologique de l'avarie, les vannes de relâchement dans le rocher n'ont pas été ouvertes. Ni l'eau de roche, ni les systèmes de drainage n'ont été contaminés.
- Trois jours après l'avarie, la surpression du confinement a été relâchée à la cheminée à travers des filtres absolus, sans qu'il y ait urgence de procéder à ce dégonflage.
- Des chocs mécaniques, thermiques et chimiques ont, semble-t-il, causé le tarissement de certaines venues d'eau.
- Un essai d'étanchéité, fait après l'avarie, a montré une amélioration substantielle. Néanmoins, à partir de l'année 1975, de nouvelles venues d'eau sont apparues à cause de l'obstruction des drainages, avec formation de colonnes d'eau qui favorisent la détérioration du multicouche. Cette situation est impossible à assainir. La stabilité des ouvrages a été mise en cause. L'action la plus logique consisterait à combler ces volumes.

Il est ainsi démontré que la conception, la construction et l'entretien d'une enceinte souterraine étanche ne sont pas

une sinécure. On rencontre de nombreuses difficultés qui n'existent pas lors de la construction en surface.

4. L'esthétique

L'appréciation esthétique reste assez subjective. Mais on peut établir quelques comparaisons. Une centrale nucléaire construite en surface est-elle forcément inesthétique? Le confinement, ses annexes et la salle des machines - appelés bloc-usine - ne sont ni volumineux, ni de forme inhabituelle; il existe de nombreux bâtiments plus grands et plus laids: silos, cimenteries, parcs de citernes, supermarchés, bâtiments administratifs et même culturels. L'emprise au sol et en hauteur est par contre importante pour la tour de refroidissement, de même que pour les postes extérieurs de haute tension. Or, la tour et les postes extérieurs ne pourraient que difficilement être placés sous terre. Ils existeraient aussi dans le cas d'une centrale au charbon, avec en outre une cheminée beaucoup plus élevée, d'immenses parcs pour le stockage du combustible et des déchets, ainsi qu'une gare de triage attenant.

5. Le manque de terrains adéquats, c'est-à-dire plats

Certaines nations sont à la fois fort peuplées, montagneuses et techniquement évoluées. La Suisse n'est pas seule dans ce cas. Le Japon, Formose, la Corée, Hong Kong, Singapour se trouvent dans la même situation. C'est surtout au Japon que cet argument fut à l'origine d'études avancées de la construction souterraine de centrales nucléaires. Dans ce pays, plusieurs sites furent aménagés en bord de mer après qu'on eut «raboté» une colline et utilisé les gravats pour créer une plate-forme artificielle. Les cicatrices qui marquent ces collines ne sont certes pas esthétiques. Mais ce procédé comporte moins d'aléas qu'une construction souterraine et coûte moins cher.

6. La protection contre les actes de guerre

L'épaisseur des parois d'un confinement suffit pour protéger les centrales nucléaires contre l'effet d'armes légères ou milourdes, et aussi contre les actes de saboteurs agissant de l'extérieur. Compte tenu de la précision de tir d'armes lourdes actuelles, aucune centrale nucléaire construite en surface ne serait capable de résister. Néanmoins, aucune centrale nucléaire n'a été construite ou projetée sous terre, ni à l'Est, ni à l'Ouest, ni en pays neutres, par crainte d'actes de guerre.

Une protection contre l'arme nucléaire n'est pas réalisable. La couverture devrait être au minimum de l'ordre de 500 m de

rocher. Une destruction de l'accès et des ouvrages périphériques remplirait déjà le but final recherché: l'anéantissement du système de production et de distribution d'énergie. L'humanité présente une sorte de fatalisme qui est en fin de compte plutôt lucide et réconfortant. La destruction serait de telles dimensions, en cas de conflit nucléaire, que la présence d'un risque de contamination supplémentaire n'aurait plus d'importance. Reconnaître cette situation c'est justifier la décision de ne pas en tenir compte dans la conception et dans le dimensionnement d'une centrale nucléaire.

7. La protection contre les autres événements externes

Les événements externes naturels les plus limitatifs dépendent de la géologie et du climat local.

Les excitations d'origine sismique sont atténuées en fonction de la profondeur de la roche. La différence est cependant trop faible pour justifier une implantation profonde. La technique actuelle permet de construire une centrale nucléaire en surface dans une région de forte sismicité, mais cette technique ne serait pas applicable en construction souterraine: les installations importantes pour la sécurité seraient reliées entre elles par de nombreuses galeries, tuyauteries et conduites de liaison, toutes très sensibles aux effets des secousses sismiques.

Des sollicitations climatiques de grande envergure peuvent se présenter. On sait s'en protéger par une construction adéquate. Au même titre, on peut construire les centrales nucléaires de façon à résister aux sollicitations externes d'origine humaine non liées à un acte de guerre: chute d'un avion civil gros-porteur ou même d'un avion militaire en vol d'exercice, inondation, détonation ayant son origine dans un transport d'explosifs ou de gaz naturel liquide, etc. Ces sollicitations extrêmes sont rares. Dans de nombreux pays, leur fréquence est jugée assez faible pour qu'on n'en tienne pas compte.

8. La protection contre les événements d'origine interne

Beaucoup de non-spécialistes ont justifié leurs propositions d'enterrer les centrales nucléaires par des arguments cités ci-dessus. Les spécialistes pour leur part ont plutôt recherché dans la construction souterraine une protection accrue contre des événements d'origine interne, vu leur fréquence plus élevée. Il y a une dizaine d'années, on craignait encore la rupture fragile d'une cuve de réacteur. Une paroi de confinement appuyée directement contre le rocher aurait résolu le problème, sous réserve que l'impact du missile n'entrave pas l'étanchéité. En fait, l'étanchéité ne peut être obtenue

qu'en l'absence de contact avec l'eau, absence qui doit pouvoir être vérifiée et rétablie. Si l'on prévoit un espace visible entre la voûte et l'enceinte, le but recherché (l'appui direct) est compromis. Le volume à excaver grossit et la portée de la voûte atteint 60 m. Or, la technique de l'époque ne permettait qu'avec peine de réaliser une coupole de 50 m de diamètre en construction souterraine.

On craignait également qu'en cas de dérangement mal maîtrisé, l'amas fondu du cœur ne traverse la cuve, provoquant une explosion de vapeur. Là aussi, un appui de l'enceinte de confinement contre le rocher aurait été souhaitable. L'état de la science et de la technique a permis, grâce à des essais proches de la vraie grandeur, de démontrer que la probabilité de tels phénomènes extrêmes était négligeable pour les réacteurs les plus courants. L'intérêt du confinement souterrain disparaissait. Néanmoins, les études probabilistes appliquées à diverses installations réalisées (il ne s'agissait plus d'études génériques) confirmèrent que la probabilité de fonte partielle d'un cœur était plus élevée, mais aussi que les conséquences, établies selon des données réalistes, étaient moins graves qu'on ne l'estimait jusque-là. Il fallait s'attendre à un accident du genre Harrisburg (TMI-2) tous les trente ans. L'enceinte de confinement primaire était censée résister pendant toute la durée du dérangement, ou alors ne subir une pression supérieure à sa pression de dimensionnement qu'au bout d'une journée, ou plus tard. Une surpression conduirait en premier lieu à une fuite, laquelle limiterait l'augmentation de la pression, et il n'y aurait pas de rupture. La conclusion, tirée en 1978-1979, donc avant TMI-2, était qu'il serait préférable de munir les installations de confinement d'un système de dépressurisation lente à travers des filtres, même rustiques, plutôt que de les enterrer.

L'analyse de l'accident de TMI (avril 1979) n'a fait que confirmer cette façon de peser les avantages et inconvénients de la construction souterraine. Il n'a pratiquement plus été question de ce mode de construction depuis le début de 1980. L'accident de Tchernobyl n'a pas non plus apporté de nouvel argument à ce sujet.

9. Proximité des zones à forte densité de population

En cas de dérangement grave, une importante quantité de gaz rares radioactifs (Xe, Kr) serait libérée à l'intérieur de l'enceinte de confinement. Ni un filtre chimique ou physique, ni l'espace entre un confinement souterrain et les couches géologiques qui l'entourent ne peuvent en absorber une part importante. En cas d'inétanchéité ou de fissuration du confinement, donc de relâchement à l'extérieur, ce serait le «nuage» comportant

ces gaz qui irradierait les personnes exposées en plein air. Vu la protection importante apportée par un simple mur en béton, une alarme rapide est prévue au voisinage immédiat des centrales, afin que les personnes se trouvant à proximité (jusqu'à environ 4 km) se mettent à l'abri. Il est important de savoir que l'inhalation de tels gaz n'est de loin pas aussi dangereuse que l'exposition directe, car le volume des poumons, de même que celui du local dans lequel on s'abriterait, sont très faibles par rapport à celui du nuage. Il n'est donc pas nécessaire de se réfugier dans un local étanche: l'épaisseur des murs et l'étroitesse du local sont les facteurs de protection principaux. Une simple cave suffit.

La durée de vie de la plupart de ces gaz rares radioactifs est courte. Après moins de deux jours, le danger n'est plus aigu. Il importe donc que le confinement soit et reste étanche pendant cette période au moins. Or, cette condition est justement mieux garantie dans un confinement extérieur, régulièrement inspectable et réparable, que dans un confinement souterrain. De ce point de vue, la construction souterraine ne constituerait pas un avantage, mais plutôt un inconvénient.

10. Avantages et inconvénients de la construction souterraine

Nous allons essayer de dresser une liste des avantages et des inconvénients, en comparant une construction souterraine supposée avec une construction en surface de type aujourd'hui courant.

10.1 Avantages

- *Meilleure protection en cas de guerre*, sous réserve que la source froide ultime et l'alimentation électrique de secours reçoivent le même degré de protection.
- *Meilleure protection contre les autres événements d'origine externe*, mais la probabilité de tels événements est très faible.
- *Meilleure flexibilité dans l'espace*: Il serait possible d'ajuster la profondeur relative de chaque volume, pour une solution optimale. On peut ainsi travailler sur les trois dimensions.
- *Moindre surface occupée*, mais les installations de chantier exigent déjà une surface plane supérieure à celle de la centrale.
- *Acceptation par le public*: L'avantage présumé est non vérifiable.

10.2 Inconvénients

- *Défaut d'une conception générale, manque d'expérience et insécurité industrielle*: Les études de conception des centrales nucléaires modernes se sont concentrées uniquement sur la construction traditionnelle en surface. Il n'existe aucune expérience de construction d'une centrale nucléaire moderne en souterrain.
- *Étanchéité des parois*: L'étanchéité des parois (tant pour le gaz depuis l'intérieur, en cas de dérangement, que pour la pression de l'eau depuis l'extérieur) est difficile à réaliser et surtout à maintenir durant toute la vie utile des installations. Elle doit par principe être vérifiable et réparable.
- *Tenue au séisme*: En fractionnant les divers ouvrages, on crée des problèmes de conception antisismique difficiles à résoudre. Le nombre des liaisons augmente. Les multiples ancrages et renforcements

- gèment considérablement les inspections en service et les travaux de maintenance.
- **Restriction des volumes disponibles:** La construction souterraine étant beaucoup plus chère (environ le double du coût du génie civil en surface), il faudrait limiter les volumes. L'exploitation, en particulier la maintenance, en souffrirait.
 - **Inondations internes et incendies:** La protection contre les inondations internes est rendue plus difficile: l'eau doit être évacuée par pompage à l'extérieur. La protection contre les incendies est rendue plus difficile, non seulement à cause de l'évacuation de l'eau d'aspersion, mais surtout de celle des fumées. Le manque de possibilités d'accès est un handicap majeur.
 - **Pompage des eaux souterraines:** Il faut continuellement évacuer l'eau de roche, dès le début de l'excavation et jusqu'à la fin de la vie utile de la centrale, voire au-delà.
 - **Accès:** Le manque de possibilités d'accès représente l'un des inconvénients majeurs lors de la construction, de modifications et durant le démontage final. Les grues entourant un chantier extérieur devraient être remplacées par des treuils et élévateurs, qui encombreraient les places de travail.
 - **Sabotage externe:** La protection contre le sabotage externe diminue. Il manque l'espace libre entre le bloc-usine et la barrière extérieure, espace qui permet de détecter et surtout de dissuader d'éventuels saboteurs. Un système de galeries peut permettre un contrôle rigoureux des entrées, mais au cas où ce système serait contourné, il serait plus difficile de déloger ou de neutraliser l'éventuel saboteur.
 - **Déclassement:** L'évacuation à l'extérieur de pièces activées qui nécessitent un important blindage est l'une des tâches les plus délicates au cours d'un démantèlement. Dans une construction souterraine, elle devient encore plus problématique, tant à cause du poids et des dimensions de ces pièces que du manque d'accès. Il semble illusoire d'espérer des avantages dans le sens de laisser sur place des résidus activés ou contaminés. Le site serait alors assimilé à un dépôt définitif².
 - **Coût:** Le coût total d'une construction souterraine a été évalué dans diverses études à

- environ 120%, voire 125% du coût d'une construction en surface. Il faut cependant relever le manque total d'expérience dans le cas de centrales nucléaires de puissance.
- **Durée du chantier:** La durée de construction est notablement plus longue et engendre plus de nuisances dans le cas d'une construction souterraine (excavation, évacuation des déblais).
 - **Travail continu en souterrain:** Le travail en installations souterraines crée une situation psychologique difficile à supporter. L'expérience montre qu'il est plus difficile de conserver du personnel bien formé et hautement qualifié lorsque les conditions de travail sont difficiles.
 - **Déblais d'excavation:** La masse importante des déblais d'excavation doit trouver une destination. A l'heure actuelle, il devient difficile de trouver des décharges. Il convient de mentionner en outre les nombreux transports que ces déblais nécessitent.
 - **Contamination de la nappe d'eau souterraine:** En cas de dérangement grave avec relâchement de gaz et de substances entraînées à travers le radier inférieur, il se produirait une contamination de la nappe d'eau qui entoure l'excavation. Son cheminement peut être difficile à suivre et à modifier. Cet inconvénient peut certes exister dans une construction en surface, mais il est alors mieux maîtrisable.

10.3 Aspects présentant autant d'avantages que d'inconvénients, que le genre de construction soit à ciel ouvert ou souterrain

- **Aspect esthétique.**
- **Impact socio-économique.**
- **Acceptation par le public.**
- **Plans et mesures d'urgence** au voisinage immédiat de la centrale.
- **Sources d'alimentation électrique de secours.**
- **Systèmes de refroidissement principaux et auxiliaires:** Système d'évacuation de la puissance résiduelle, tour(s) de refroidissement ou refroidissement direct. Consommation d'eau, impact sur la qualité de l'eau de refroidissement.
- **Flexibilité:** Adjonction ultérieure, par exemple d'une deuxième installation.
- **Systèmes de ventilation et de climatisation:** Il faudra peut-être augmenter le degré de séchage dans des ouvrages souterrains. Mais, les températures étant plus constantes, les besoins seraient un peu réduits.
- **Raccordement au réseau de lignes à haute tension.**
- **Raccordement au réseau de transport externe:** route, rail, etc.

- **Nuisances dues au bruit:** Léger avantage durant la construction si en surface, et durant l'exploitation si en souterrain.

10.4 Sécurité intrinsèque

La construction souterraine pourrait-elle conduire à un renforcement de certaines caractéristiques passives qui favoriseraient la sécurité intrinsèque? Nous avons déjà dit que la différence est négligeable pour ce qui touche les séismes et que la probabilité d'impact d'un missile interne de haute énergie est très faible. La protection contre la chute d'un avion de ligne ou militaire étant réalisable, cet aspect ne suffit pas à justifier une construction souterraine. Aucune nation, ni à l'Est ni à l'Ouest, n'a protégé une centrale nucléaire contre des actes de guerre.

En revanche, une construction souterraine affaiblirait de nombreuses autres qualités positives, inhérentes à la façon, bien maîtrisée, de construire en surface. Elle conduirait à une prolifération des mesures actives qui doivent être prises pour se protéger contre des phénomènes caractéristiques de la construction souterraine: évacuation des eaux de roche; protection contre les inondations, les incendies, le sabotage; renforcements des tuyauteries et des conduites, etc.

Dans l'ensemble, il ne se dégage pas d'avantage majeur, qui se traduirait par une augmentation de la sécurité intrinsèque, lors d'une construction souterraine.

11. Conclusions

Compte tenu du très haut degré de sécurité et de fiabilité atteint par les centrales nucléaires à eau légère de grande puissance, modernes et standardisées, construites en surface, et surtout des inconvénients – sans parler des nombreuses incertitudes – de la construction souterraine, il n'existe aucune raison valable de revenir en arrière et de se lancer dans des difficultés d'ordre technique, économique et psychologique.

Adresse de l'auteur:

Jean-Paul Buclin, ing. dipl. EPFZ
c/o S.A. de l'Energie de l'Ouest-Suisse
Case postale 570
1001 Lausanne

Bibliographie

Algorithmique et représentation des données – tome 2

par M. Lucas. – Un vol. 16 × 24 cm, 200 pages. Masson éditeur, Paris 1984. Prix: FF 90.00 (broché).

Lors de la recherche de solutions informatiques à un problème donné, la connaissance de techniques de traitement différentes conduit à la découverte d'algorithmes nouveaux. Cet ouvrage présente des structures de données utilisées pour des problèmes touchant à la recherche opérationnelle (arbres, graphes). Cependant, la bonne connaissance de ces structures et des tech-

niques qui leur sont attachées permet de construire des algorithmes efficaces, de construction relativement simple, adaptés à des problèmes difficilement solubles à l'aide de techniques de files.

Les structures de données étudiées sont présentées à travers un ensemble d'exercices commentés, permettant d'introduire progressivement les outils nécessaires. C'est ainsi que l'utilisation d'algorithmes récursifs est présentée en préalable à l'étude des arbres. Plusieurs problèmes de synthèse sont étudiés en fin d'ouvrage, permettant de faire le point sur les techniques présentées. Ces problèmes soit traitent d'un aspect technique (évaluation, analyse descendante), soit montrent, pour un exemple, diverses solutions faisant appel aux différentes structures présentées.

La perspective «pas à pas»

par Jean-Claude Ludi. – Un vol. 18 × 26 cm, 142 pages, nombreuses figures. Editions Dunod, collection «Les pratiques de l'espace». Paris, 1986. Prix FF 120.00 (broché).

Après une période de recul et d'incertitude, le dessin a repris aujourd'hui une place incontestée dans les programmes d'enseignement des écoles de design et d'architecture. Ce renouveau est lié, bien sûr, au renforcement de ses pratiques, mais aussi à l'intérêt spécifique qu'on lui porte dans l'histoire et la théorie de l'architecture.

C'est dans ce contexte que se place le livre de J.-C. Ludi, véritable guide pratique des modes de construction graphique de l'espace. L'ouvrage constitue, en effet,

une contribution tout à fait exceptionnelle à l'enseignement des principes fondamentaux de la construction géométrique et de la représentation graphique. La présentation des procédés de construction des figures dans l'espace est donnée pas à pas, dans le but de faire comprendre chaque opération au lecteur, progressivement, à partir de dessins commentés. Chaque chapitre commence par la mise en place des principales règles et composantes, l'une après l'autre, puis il se poursuit par la projection des arêtes, des plans et des volumes recherchés. Ce manuel est totalement opérationnel, depuis le deuxième chapitre sur les axonométries jusqu'au neuvième chapitre sur le tracé des ombres dans la perspective à deux points de fuite.

F. N.