

Concevoir des centrales nucléaires souterraines, pour éviter Tchernobyl et Fukushima

Designing nuclear power plants underground in order to escape next Tchernobyl and Fukushima



Pierre DUFFAUT
AFTES



Jean PIRAUD
Antea, Orléans

Après les catastrophes chimiques de Bhopal (1984) et de Toulouse (2001), les désastres nucléaires de Tchernobyl (1986) et de Fukushima (2011) replacent en pleine lumière l'option souterraine pour toutes les activités industrielles dangereuses, singulièrement celles qui sont susceptibles d'envoyer à grande distance des ondes et/ou des substances mortelles. Il y a donc lieu de rappeler et de mettre à jour les propositions faites bien avant Fukushima en faveur de réacteurs nucléaires souterrains, pour les pays qui ont choisi d'exploiter cette forme d'énergie (cf. notamment Duffaut, 2007, et Piraud, 2009).

1 - Les qualités intrinsèques du sous-sol

On sait que, dans certaines conditions, le sous-sol peut cacher, isoler, protéger et confiner de façon optimale tout ce que l'on y dépose ; ces quatre propriétés sont bien connues et utilisées depuis les origines de l'humanité. A titre d'exemple, la conservation des explosifs dans des "poudrières" souterraines était et reste une pratique classique. A contrario, plusieurs usines

de fabrication d'explosifs ou de produits chimiques ont souffert d'explosions qui ont été particulièrement préjudiciables pour l'environnement parce qu'elles étaient installées en surface. Plus récemment, le stockage souterrain de grands volumes d'hydrocarbures liquides et gazeux s'est imposé comme la solution la plus sûre, mais aussi la plus économique lorsque les volumes à stocker sont très importants. Pour les mêmes raisons, les pratiques de stockage et

Following the chemical catastrophes of Bhopal (1984) and Toulouse (2001), the nuclear disasters of Chernobyl(1986) and Fukushima (2011) once again turn the spotlight on the underground option for all dangerous industrial activities and, in particular, those that might spread lethal radiations and/or lethal substances over a great distance. It is therefore worthwhile providing a reminder and an update of the proposals made well before Fukushima in favour of underground nuclear power reactors for countries having chosen to use this form of energy (cf. in particular: Duffaut, 2007, and Piraud, 2009).

1 - Intrinsic qualities of the underground space

We know that within certain conditions, the underground can hide, isolate, protect and confine at best all that is placed there. These four properties are well known and have been used since the origins of humanity. For example, the conservation of explosives in underground (warehouses) "magazines" was and remains standard practice. On the contrary,

several factories producing explosives or chemical products have suffered explosions that have been particularly prejudicial to the environment because they were installed (at grade) on surface level. More recently, the underground storage of liquid and gaseous hydrocarbons has imposed itself as the safest but also most economic solution when there is a need to store large volumes. For the same reasons, the practice of storing and burying final waste has also been

d'enfouissement de déchets ultimes se sont développées, y compris pour les matières radioactives.

Comment comprendre que les centrales nucléaires, qui utilisent aussi des processus et matériaux potentiellement dangereux, ne bénéficient-elles pas de la sécurité qu'apporterait une implantation souterraine ?

2 - Deux précurseurs éminents

Après la catastrophe de Tchernobyl, deux physiciens de premier plan se sont exprimés clairement en faveur de la solution souterraine :

- **Andrei Sakharov** (1921-1989), père de la bombe et de l'industrie nucléaire soviétiques, mais qui reçut pour d'autres raisons le prix Nobel de la Paix, a déclaré dans ses Mémoires : « *Il est évident que l'humanité ne peut renoncer à l'énergie nucléaire, c'est pourquoi nous devons trouver les moyens techniques de garantir une sécurité absolue et d'exclure la possibilité d'un autre Tchernobyl. La solution que je préfère serait de construire des réacteurs souterrains, à une profondeur suffisante pour que même le pire accident ne relâche pas de produits radioactifs dans l'atmosphère.* »

- **Edward Teller** (1908-2003), grand physicien d'origine hongroise, et qui fut l'un des pères de la bombe A américaine, a écrit dans ses Mémoires : « *[Pour ce qui est du confinement des éléments radioactifs en cas d'accident] ma suggestion est d'implanter les réacteurs nucléaires entre 100 et 300 m de profondeur. Je pense que la mauvaise perception des risques par le public ne pourra être corrigée qu'en prenant clairement le parti de l'implantation souterraine.* »

Les accidents de Tchernobyl et de



Fig.1 - A. Sakharov en conversation avec E. Teller / A. Sakharov in conversation with E. Teller.

Fukushima montrent à quel point ces savants étaient clairvoyants quand à la nécessité de multiplier les barrières de confinement en cas d'accident nucléaire.

3 - Historique des centrales nucléaires souterraines

Après le premier réacteur que Werner Heisenberg a fait diverger en 1944 à Haigerloch, dans une caverne du Wurtemberg, des centrales nucléaires souterraines ont été mises en service en 1958, 1961 et 1964 à Zheleznogorsk, près de Krasnoyarsk (Sibérie), où était concentrée l'industrie nucléaire militaire de l'URSS. En Europe, divers réacteurs de faible puissance ont ensuite été construits et exploités dans des cavernes, que ce soit en Norvège (Halden, 25 MW, en 1960), en Suède (Agesta, en 1964) et en Suisse (Lucens, en 1968). Cette dernière centrale, d'une puissance de 30 MW, constitue un précédent significatif car elle a subi une fusion partielle du cœur en 1969, accident qui est passé inaperçu car le personnel n'a pas été irradié et la radioactivité est restée confinée à l'intérieur ; l'installation a été depuis décontaminée et réutilisée comme dépôt d'archives.

La seule centrale de puissance significative (320 MW), hormis les centrales russes alors secrètes, était une centrale franco-belge de type PWR (réacteur à eau pressurisée) implantée à **Chooz** (Ardennes) ; elle a fourni

des matériaux développés, incluant pour les matières radioactives.

How is it that nuclear power plants, which also use potentially dangerous processes and materials, do not also benefit from the safety offered by an underground siting?

2 - Two prominent precursors

Following the Chernobyl catastrophe, two leading physicists clearly expressed themselves in favour of the underground solution :

- **Andrei Sakharov** (1921-1989), father of the Soviet bomb and nuclear industry, but who was awarded the Nobel Peace Prize for other reasons, declared in his Memoirs: "*Plainly, mankind cannot renounce nuclear power, so we must find technical means to guarantee its absolute safety and exclude the possibility of another Chernobyl. The solution I favour would be to build reactors underground, deep enough so that even a worst case accident would not discharge radioactive substances into the atmosphere.*"

- **Edward Teller** (1908-2003), the great Hungarian physicist and one of the fathers of the American A bomb, wrote in his Memoirs: "*My suggestion [in regard to the containment of nuclear material in case of an accident] is to*

place nuclear reactors 300 to 1000 feet underground... I think the public misapprehension of risk can be corrected only by such a clear-cut measure as underground siting."

The Chernobyl and Fukushima accidents reveal to what point these learned scientists were perceptive regarding the need to multiply confinement barriers in the case of a nuclear accident.

3 - The history of underground nuclear power

Following the first reactor that Werner Heisenberg diverged in 1944 in Haigerloch, in a cavern in Wuttemberg, underground nuclear power plants were subsequently commissioned in 1958, 1961 and 1964 in Zheleznogorsk near Krasnoyarsk (Siberia), being the area concentrating the USSR's nuclear military industry. In Europe, various small reactors were then built and operated in caverns, be it in Norway (Halden, 25 MW, in 1960), Sweden (Agesta, in 1964) or Switzerland (Lucens, in 1968). This latter plant, with a power of 30 MW, represents an important precedent as, in 1969, it suffered a partial core melt, an accident that went unnoticed because the personnel was not irradiated and the radioactivity remained confined inside. The facility has been since de-contaminated and turned into an archive depot.

The only plant with a significant power (320 MW) - except the Russian power station covered by military secrecy - was a PWR type located in **Chooz** (Ardennes) that, from 1966 until it was closed down in 1991, provided 39 TWh. All the nuclear systems were contained in two caverns at a depth of 70 m (figure 2); one of them contained the reactor while the other contained the nuclear auxiliaries, above all the spent fuel storage pool. The non-

Figure 2 - Les deux cavernes de la centrale nucléaire franco-belge de Chooz, le réacteur et le circuit primaire à gauche, les auxiliaires nucléaires dont la piscine à droite (document EDF) / The two caverns of the Chooz Franco-Belgian nuclear power plant : reactor and primary loop cavern at left, used fuel pool and other nuclear auxiliaries at right, machine hall on river side.

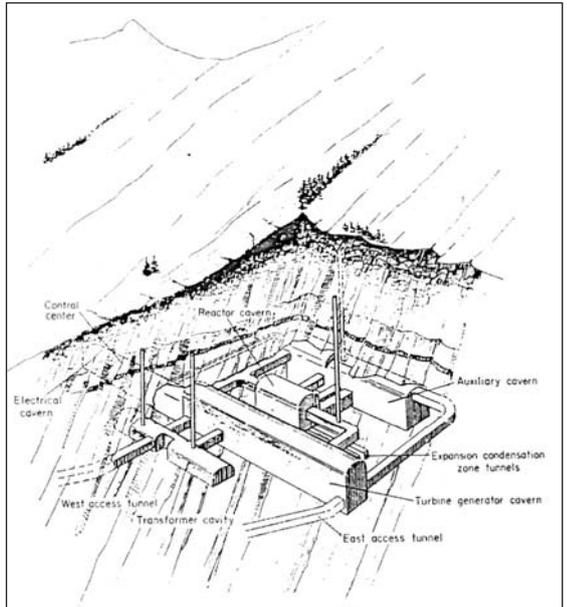
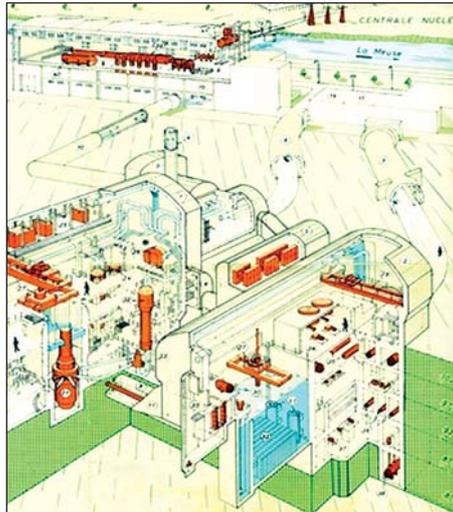


Figure 3 - Concept de centrale souterraine étudié pour la Commission de l'Energie de Californie / Concept of the underground power plant studied for the California Energy Commission.

39 TWh de 1966 à sa fermeture en 1991. Tous les organes nucléaires étaient abrités dans deux cavernes sous 70 m de couverture (figure 2), l'une abritant le réacteur et l'autre les "auxiliaires nucléaires", c'est-à-dire surtout la piscine de stockage des combustibles usés ; la vapeur (non radioactive) du circuit secondaire alimentait des groupes turboalternateurs situés en surface, au bord de la Meuse. Mais aucune suite n'a été donnée à ces prototypes, en dépit d'un grand nombre d'études très fouillées dans divers pays.

En Amérique aussi, l'idée de centrales souterraines fut activement étudiée, mais sans aboutir à aucune réalisation. La figure 3 donne un exemple de réacteur souterrain étudié en 1981 à la demande du gouvernement de l'Etat de Californie [cf. Nuclear Power Plants..., 1979]. Un seul projet fit l'objet d'investigations sur le terrain, celui de la compagnie **Ontario Hydro** (principal producteur canadien d'électricité), qui prévoyait de construire 4 réacteurs de 850 MWe dans une série de cavernes souterraines parallèles creusées dans le gneiss à 300 m de profondeur sous la rive du lac Ontario ; le poste de commande était également prévu en profondeur, mais les turbines et alternateurs devaient être placés dans une fouille en surface.

4 - Les arguments du projet canadien de 1978

Les ingénieurs canadiens savaient que leur projet était a priori plus coûteux, mais ils considéraient que le surcoût de la construction en souterrain serait compensé par une série d'avantages dans d'autres domaines, avantages qu'ils avaient listés comme suit (Oberth & Lee, 1979) :

a) Plus grande liberté d'implantation

- La marge de sécurité supplémentaire liée à la barrière rocheuse permet d'envisager une implantation près de centres urbains ;
- En cas de séisme, les accélérations sont fortement réduites en profondeur, ce qui permet d'implanter plus facilement une centrale en zone sismique ;
- L'implantation souterraine peut être choisie plus librement car elle n'affecte pas le paysage.

b) Avantages pour la sécurité et l'environnement

- La roche encaissante constitue une barrière supplémentaire en cas de relâchement de radionucléides, sous réserve que l'étanchéité des puits d'accès soit garantie ;
- Une centrale souterraine est protégée contre la plupart des risques

radioactive steam from the secondary circuit supplied the surface turbogenerators located on the banks of the river Meuse. But not any follow up has been derived from these prototypes despite a large number of very detailed studies in many countries.

In America as well, the idea of underground power plants was actively studied but did not result in the construction of any plants. Figure 3 gives the example of an underground reactor studied in 1981 on request from the government of the State of California [cf. Nuclear Power Plants..., 1979]. A single project was subject to on-site investigations, being that of the **Ontario Hydro** company (the main Canadian producer of electricity), which programmed the construction of four 850 MWe reactors in a series of parallel underground caverns excavated into the gneiss at a depth of 300 metres below the banks of Lake Ontario; the system control centre was also to have been located at this depth while the turbines and generators were to have been constructed in a surface level excavation.

4 - The benefits set out for the 1978 Canadian project

The Canadian engineers knew that their project was fundamentally more expensive, but they considered that the additional cost of the underground construction would be compensated by a series of advantages in other areas. They listed these advantages as follows (cf. Oberth & Lee, 1979):

a) Greater freedom of location

- The additional safety margin linked to the rocky barrier made it possible to envisage a location close to urban centres;
- Should there be an earthquake, accelerations are much lower at depth, making it easier to locate a power plant in a seismic zone;
- The underground siting can be chosen more freely as it does not affect the landscape.

b) Advantages for safety and the environment

- The surrounding rock provides an additional barrier should there be a release of radionuclides, on condi-

naturels (ouragans...) et artificiels (chutes d'avion, explosifs) ;

- La sécurité vis-à-vis du sabotage ou d'actions terroristes est améliorée du fait d'un nombre limité de points d'accès, faciles à surveiller ;
- En cas d'urgence, de grandes quantités d'eau de refroidissement sous forte pression peuvent être facilement mobilisées par gravité ;
- L'implantation souterraine près de centres de consommation permet de réduire la longueur des lignes électriques et d'économiser de l'espace en surface.

c) Avantages économiques indirects

- L'implantation près des centres urbains permet d'économiser sur la construction des lignes électriques, sur les pertes par effet Joule et d'alimenter "gratuitement" des réseaux de chauffage urbain ;
- Le surcoût de la protection parasismique est beaucoup plus faible qu'en surface ;
- Les coûts à provisionner pour le démantèlement sont limités, car on peut facilement sceller tous les puits d'accès.

Il est clair qu'une partie des avantages ci-dessus reflète à la fois la situation géographique particulière du Canada et l'état d'esprit de l'époque. On n'excluait pas alors l'idée de centrales proches des villes, chose aujourd'hui impensable, au moins en Europe (la centrale nucléaire d'Indian Point est à 40 km seulement de New York, alors que celle de Nogent-sur-Seine est à 110 km de Paris).

En contrepoint, Oberth & Lee reconnaissent honnêtement que du point de vue de la sécurité, une centrale souterraine, en dépit d'avantages majeurs en matière de protection et de confinement, pouvait être plus vulnérable qu'une installation de surface vis-à-vis de certains types de risques :

- inondation d'origine naturelle ou causée par une rupture de canalisation ;
- instabilité des parois rocheuses sous l'effet de contraintes thermiques (écaillage), en cas d'accident nucléaire fortement exothermique ;
- exposition du poste de commande souterrain à des gaz toxiques.

5 - La conférence de Hanovre (1981)

Un colloque international fut convoqué sur le thème des centrales souterraines par le gouvernement allemand à Hanovre, en 1981 (Pahl et Schneider, 1982). Les principales conclusions qu'en avait tirées P. Duffaut (1981), qui y assistait, étaient les suivantes :

a) Il est incontestable que les centrales souterraines sont mieux protégées contre les événements extérieurs, et l'environnement mieux protégé contre les accidents nucléaires pouvant survenir à l'intérieur.

b) Les schémas envisagés sont nombreux, depuis les centrales enterrées dans de grandes fouilles jusqu'aux centrales profondes creusées dans le rocher. Mais il semble qu'aucun ne tire tout le bénéfice possible d'une implantation souterraine, faute de s'écarter largement des schémas classiques utilisés en surface.

c) 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).

d) La principale difficulté vient des habitudes très strictes codifiées dans

tion that the tightness around the access shafts is ensured;

- An underground plant is protected from most natural risks (hurricanes, etc.) and artificial risks (crashing plane, explosives);
- Protection from sabotage or terrorist actions is improved thanks to the limited and easily monitored access points;
- In case of emergency, large quantities of gravity-fed high pressure cooling water can easily be introduced;
- The underground siting near centres of consumption reduces the length of power lines and saves surface space.

c) Indirect economic advantages

- A location near urban centres permits savings in the construction of power lines, losses resulting from the Joule effect and the "free" supply of hot water to district heating systems;
- The additional cost of seismic protection is much lower than for a surface siting;
- The costs to be anticipated for decommissioning are reduced as all access shafts can be easily sealed.

It is clear that a proportion of the above-mentioned advantages reflect both Canada's particular geographic situation and the mood of the time. The idea of power plants close to towns is something that is now unthinkable, at least in Europe (the Indian Point nuclear power station is within 40 km from New York, when the French Nogent-sur-Seine is at 110 km from Paris).

As a counterpoint, Oberth & Lee honestly admit that from a security point of view, an underground power plant, despite major advantages in terms of protection and confinement, could be much more vulnerable than a surface installation when faced with certain particular types of risk:

- Flooding, either natural or caused

by a break in the pipework;

- The instability of rock faces under the effect of thermal constraints (flaking) in the event of a highly exothermic nuclear accident;
- The exposure of the underground system control centre to toxic gasses.

5 - The Hanover conference (1981)

In 1981, an international conference was organised in Hanover by the German government on the theme of underground power plants (cf. Pahl and Schneider, 1982). The main conclusions drawn by P. Duffaut (1981), who was present, were as follows:

a) It is undeniable that underground power plants are better protected from external events and that the environment is better protected from nuclear accidents that could take place inside.

b) There are a large number of possibilities ranging from power plants buried in large excavations through to deep power plants bored out of the rock. But it would seem that none of these possibilities takes advantage of all the possible benefits of an underground siting as they are all fairly similar to standard surface layouts.

c) While, underground power plants are technically possible in a wide range of terrains, deep plants are only reasonably economic in rock able to accept large cavities (additional cost comparable to that imposed by difficult foundations or considerable earthworks).

d) The main difficulty results from the very strict habits that have been codified in all countries for the nuclear industry. All countries have therefore sought to make as few changes as possible to the authorised and proven

tous les pays pour l'industrie nucléaire. Tous les pays ont donc cherché à apporter le moins de changement possible aux schémas autorisés et éprouvés pour les centrales de surface, afin de n'avoir pas à reprendre des études et des négociations avec les autorités. En outre, il paraissait difficile de "justifier" la résistance de cavernes, surtout à long terme, comme on savait le faire pour les enceintes extérieures en béton.

e) Pour que des projets de centrale souterraine prennent corps, il faudrait une incitation très forte (soit pour des raisons stratégiques, soit à la suite d'un accident grave, comme il est arrivé depuis en effet), ou encore une démonstration convaincante que des sites existent pour de très grandes cavernes.

6 - Pourquoi avoir abandonné cette idée ?

En fin de compte, aucune décision positive d'implantation souterraine ne vit le jour après cette conférence. Les raisons officielles invoquées au début des années 1980 pour en justifier l'abandon étaient d'abord technico-économiques :

- les difficultés d'exécution attendues en souterrain, traduites en suppléments de coût et de délais, étaient évaluées dans les diverses études nord-américaines entre 15 et 50 %, suivant les dispositions topographiques et la nature des terrains, par rapport à une implantation équivalente en surface ;
- à l'époque, il y avait un véritable tabou sur la portée maximale des cavernes de génie civil, qui n'avait dépassé 30 m qu'exceptionnellement, dans quelques ouvrages hydroélectriques comme la centrale de pompage de 480 MW de Waldeck (fig. 4, Abraham et al., 1974).

C'est aux ingénieurs norvégiens qu'il allait appartenir de dépasser cette limite : ils ont projeté une patinoire souterraine large de 61 m pour démontrer la faisabilité de cavernes assez grandes pour y loger des réacteurs de forte puissance. Par la suite, l'abandon du nucléaire par la Norvège en a différé l'exécution, jusqu'à la préparation des Jeux Olympiques d'hiver de 1994 où la patinoire projetée a été exécutée et mise en service avec un succès sans précédent ;

- La refonte des concepts qui avaient fait leurs preuves en surface aurait exigé un long et coûteux processus d'ingénierie, puis d'approbation par les autorités nationales de sûreté, alors que les premiers chocs pétroliers incitaient les électriciens à développer au plus vite l'énergie nucléaire.

layouts used for surface power plants in order to avoid having to resume studies and negotiations with the authorities. It would also seem difficult to "justify" the strength of caverns, especially over the long term, in the same manner that we already can do for concrete vessels.

e) For underground power plants to become a reality, there needs to be a powerful incentive (for strategic reasons, subsequent to a serious accident, as happened incidentally since) or a convincing demonstration that sites exist for very large caverns.

6 - Why has the idea been abandoned?

At the end of the day, no positive decision concerning an underground

- The expected difficulties in carrying out the underground works, translated into additional costs and completion times, were evaluated in various North American studies as representing between 15 and 50% depending on the topographical layout and the nature of the terrain, when compared with an equivalent location on surface level.
- At the time, there was a complete taboo on the maximum span of civil engineering caverns which had only rarely exceeded 30 metres in a few hydroelectric works such as the 480 MW Waldeck pumping plant (cf. fig. 4 and Abraham et al., 1974). It was Norwegian engineers that proved that this limit could be exceeded, having designed a 61 m wide underground skating rink to prove the feasibility of caverns large enough to contain high power output reactors. Subsequently, Norway's abandoning of the nuclear solution led to construction of this amenity being delayed. It was only during the preparation of the 1994 Winter Olympics that the planned skating rink was finally constructed and proved to be an unprecedented success.
- The revision of concepts having already proven themselves on surface level would have demanded a long and expensive engineering process followed by the approval of the national safety authorities at the same time that the first oil shocks were leading electricians to develop nuclear energy as rapidly as possible.

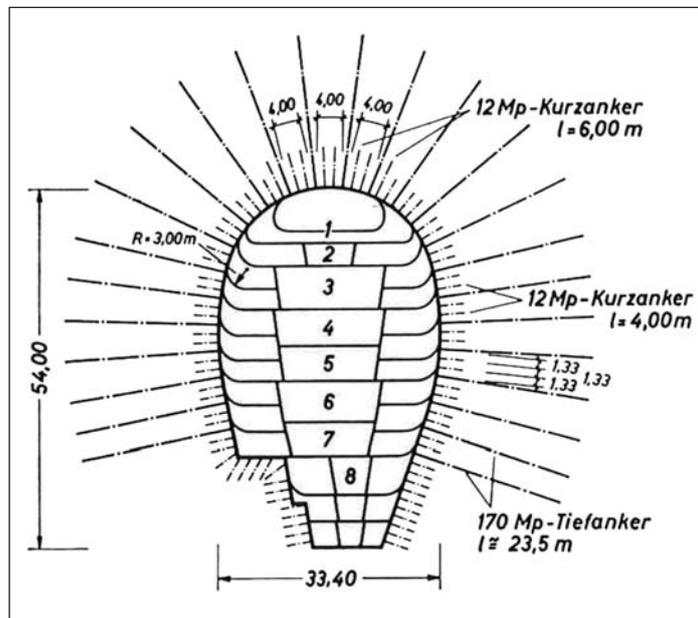


Figure 4 - Coupe de la centrale hydroélectrique de Waldeck II (Hesse), avec ses phases successives de creusement et de soutènement par tirants (Tiefanker) et boulons (Kurzanker) [Abraham et al, 1974] / Waldeck II hydroelectric plant (Hesse): successive steps of excavation and support (by rock anchors and rock bolts).

Mais on peut avancer d'autres raisons, qui n'ont guère été avancées ni discutées publiquement du fait de leur caractère éminemment politique :

- Avant Tchernobyl, le surcroît de

siting has been developed since this conference. The official reasons invoked in the early 1980s to justify the abandoning of this solution were, above all, technical and economic:

- Before Chernobyl, the increased safety provided by the underground option seemed a superfluous and expensive luxury. Generally speaking, politicians and prevailing opinion continued to firmly believe

sécurité apporté par l'option souterraine apparaissait comme un luxe superflu et coûteux ; d'une façon générale, les politiques et l'opinion dominante croyait encore fermement aux vertus du progrès technique en général ;

- Les compagnies d'électricité pouvaient craindre que, suite à la démonstration concrète de la faisabilité d'une grande centrale souterraine, l'opinion n'exige que toutes les nouvelles centrales soient souterraines, avec les surcoûts correspondants ;
- Dans une industrie aussi lourde que l'électronucléaire, aucun acteur technique innovant ne pouvait espérer émerger en franc tireur et contredire l'oligopole des grands électriciens, surtout en proposant un concept plus cher.

Pourtant, si on jette un regard rétrospectif sur l'époque de la Guerre Froide, on peut se demander quelle est vraiment la menace la plus grave : les risques militaires liés à "l'équilibre de la terreur", ou les risques induits par la nébuleuse terroriste ?

7 - Evolutions récentes

Beaucoup d'événements nouveaux conduisent aujourd'hui à reconsidérer le concept de centrale nucléaire souterraine :

- après les avions suicides jetés sur les tours du World Trade Center (2001), la menace terroriste a changé de dimension et est devenue diffuse et insaisissable ; des formes de guerre "artisanale" ou intermédiaire sont désormais à considérer ;
- les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont jeté le doute sur l'efficacité des dispositifs de sécurité et sur la prétention des ingénieurs à les maîtriser entièrement ;

• en dépit de ces accidents, l'aggravation inéluctable du réchauffement climatique poussera la plupart des grandes puissances à développer l'énergie nucléaire, qui n'émet pas de CO₂, car elles savent que l'avenir du Monde est entre leurs mains.

Un enseignement trivial de la catastrophe japonaise est que le rassemblement de six réacteurs sur un même site, qui en temps normal facilite la gestion, le gardiennage et autres services, a en réalité fragilisé l'ensemble, aggravé les difficultés d'intervention et augmenté les dégâts. Inversement, la solution souterraine autorise la multiplication de petites centrales, puisque la sécurité vis-à-vis des actes de guerre, terrorisme et malveillance est beaucoup plus facile à assurer en souterrain (on perd alors le bénéfice de l'effet d'échelle, mais on pourrait bénéficier d'un effet de série).

C'est ainsi que le concept de réacteurs souterrains est réapparu à la fin des années 1990 comme une solution intéressante. Cette fois, c'est la **Belgique** qui a montré la voie, en mettant à l'étude un réacteur de recherche souterrain destiné notamment à étudier la transmutation : c'est le projet MYRRHA, avec ses deux variantes en fouille remblayée ou en cavité creusée, qui a été décrit en détail dans ces colonnes (De Bruyn et al., 2006, et figure 5). La variante entièrement enterrée a été rapidement abandonnée car sa réalisation était douteuse. La variante partiellement enterrée (avec la base de la fondation à 30 mètres de profondeur a longtemps été la référence pour le projet.

Lors de la révision la plus récente, il a été tenu compte du fait que pour un réacteur de recherche, de nombreuses opérations doivent avoir lieu régulièrement : chargement des expériences tous les trois mois, production de radio-isotopes toutes les semaines,

in the virtues of technical progress in general.

- Electricity companies might have been concerned that, following the demonstration of the feasibility of a large underground power plant, opinion might demand that all new power plants be placed underground, with the corresponding additional costs.
- In an industry as important as that of nuclear power generation, no innovative player would dare stand out as a maverick and contradict the oligopoly of major power producers, especially by proposing a more expensive concept.

But, if one were to look back over the years of the Cold War, it might well be asked if the military risks that existed at that time were not just as serious as today's risks of terrorism (far more difficult to control due to the nebulous nature of the terrorist).

7 - Recent developments

Many new developments now lead us to reconsider the concept of underground nuclear power plants:

- Following the suicide planes that crashed into the World Trade Center towers (2001), the threat of terrorism has changed dimension and become diffuse and intangible. Crude, small scale and intermediary forms of war now have to be considered.
- The Chernobyl and Fukushima accidents threw doubt on the efficiency of safety measures and the claims of engineers convinced of their capacity to fully control power plants.
- Despite these accidents, the inevitable worsening of global warming will push most of leading countries towards the development of nuclear energy which does not emit any CO₂, as they know they bear the

future of the world.

A marginal lesson to be learned from the Japanese catastrophe is that the grouping together of six reactors on a same site, a solution that in normal times simplifies management, supervision and other services, in fact fragilised the complex, complicated intervention difficulties and increased the damage. Conversely, the underground solution permits the multiplication of small plants (on an economic level, there is no scale effect such as exists for large plants for construction, operation and maintenance), as safety and security with regards to acts of war, terrorism and malice are far easier to provide for a power plant located underground; the benefit of scale effect is lost but a series effect could be beneficial.

This is why the concept of underground reactors reappeared in the late 1990s as a possible solution. This time, it was **Belgium** that showed the way by studying an underground research reactor intended, in particular, to study transmutation. This was the MYRRHA project with its two variants, being a backfilled excavation or excavated cavity, both of which described in detail in these columns (cf. De Bruyn et al., 2006, and figure 5). The entirely buried variant was rapidly abandoned as its construction raised some doubts. The partially buried variant (with the foundation based at a depth of 30 metres) had for a considerable time been taken as the reference for the project.

During the most recent revision, it was taken into consideration that for a research reactor, a large number of operations need to be carried out on a regular basis: loading of experiments every three months, production of radioisotopes every week and the renewal of certain components every year. The current solution therefore only includes the reactor vessel below

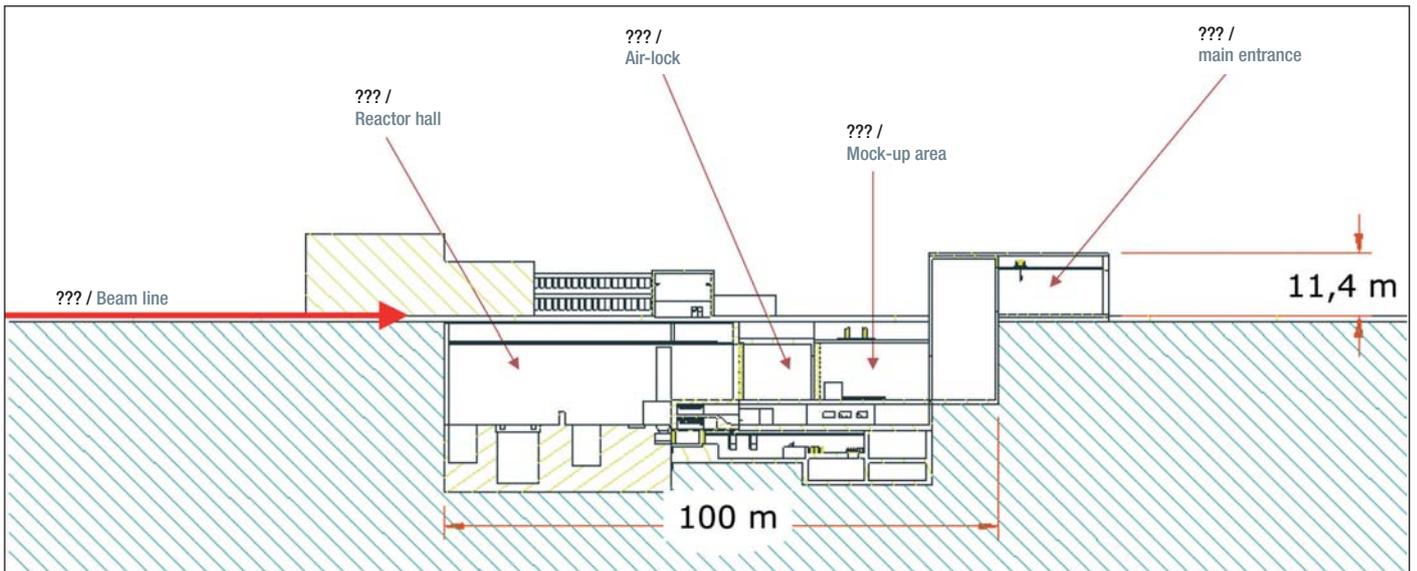


Figure 5 - Projet belge de réacteur souterrain MYRRHA 2005 (variante moyennement enterrée) / Belgian project for the MYRRHA underground reactor project (medium depth variant).

renouvellement de certains composants tous les ans. La solution actuelle ne comporte donc plus que la cuve du réacteur en-dessous du sol ; la base de la fondation est ainsi limitée à une profondeur de 17 m, mais le bâtiment du réacteur a une hauteur hors sol de près de 45 m.

Aux **Etats-Unis**, un projet audacieux de parc de centrales souterrain a été proposé en 2006 dans les épaisses couches de sel du Nouveau-Mexique, au voisinage immédiat d'un site d'en-

fouissement de déchets ; cette concentration extrême des moyens de production était liée au projet Super-Grid, réseau de distribution supraconducteur supposé capable de desservir tout le pays grâce à la disparition des pertes par effet Joule. Les promoteurs de ce concept estiment qu'un tel parc reviendrait moins cher en souterrain qu'en surface, du fait notamment des qualités exceptionnelles du sel gemme vis-à-vis du creusement de grandes cavités (figure 6, et Myers, Elkins, 2005).

ground level. Consequently, the foundation base is limited to a depth of 17 metres, but the reactor building reaches up to a height of 45 metres above ground level.

In the **United States**, an audacious project for a series of underground power plants was proposed in 2006. This was to have been located immediately adjacent to a radioactive waste deposit site in the thick layers of salt to be found in New Mexico. This extreme concentration of production means was linked to the SuperGrid project, being a superconductor distribution network supposedly able to service the entire country thanks to the elimination of losses caused by

the Joule effect. The promoters of this concept believe that the cost of this nuclear park would be cheaper to build underground than on the surface, especially given the exceptional qualities of rock salt when it comes to excavating large cavities (figure 6).

In **France**, after a parliamentary question following the terrorist attacks of 11 September 2001, a study kept confidential has been asked at EDF and AREVA about the feasibility of underground power plants: as performed before Fukushima, this study did not lead to a conclusion in favour of underground plants, either caverns excavated inside rock or cut and filled pits.

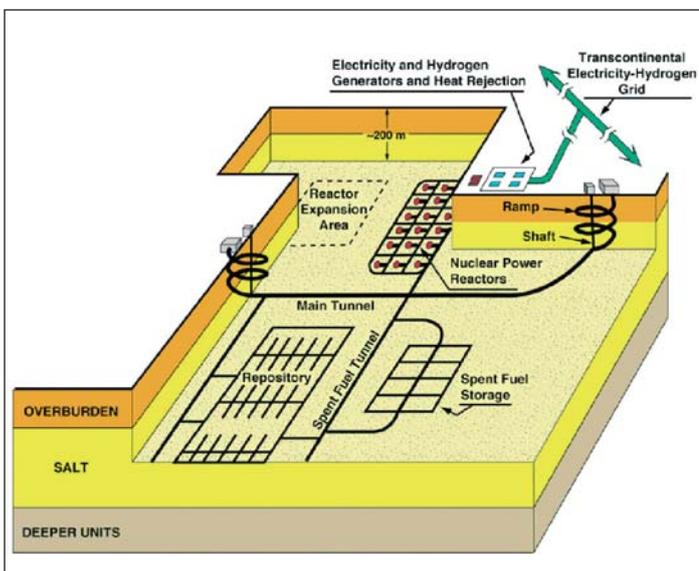


Figure 6 - Projet de parc électronucléaire souterrain au Nouveau-Mexique (USA) / Nuclear power park project in New Mexico (USA).

En **France**, suite à une question parlementaire consécutive aux attentats du 11 septembre 2001, une étude restée confidentielle a été demandée à EDF et AREVA quant à la possibilité de centrales souterraines ; cette étude - réalisée avant Fukushima - n'avait pas conduit à cette époque à des conclusions positives en faveur de centrales souterraines, qu'elles soient creusées dans des cavernes au rocher ou enfouies dans des fosses remblayées.

Enfin, en **Israël**, l'intérêt d'une centrale nucléaire souterraine a été souligné publiquement par le géologue Wes Myers, de préférence à une centrale de surface qui aggraverait dramatiquement la vulnérabilité d'un pays aussi exigu et menacé.

8 - Que proposent les mécaniciens des roches ?

Soutenus par les spécialistes de Mécanique des roches, les ingénieurs sont aujourd'hui capables de mieux répondre aux problèmes posés par la construction de grandes cavernes, et de mieux garantir leur stabilité à long terme. Ils imaginent que les grands traits d'une centrale nucléaire souterraine pourraient être les suivants :

- installation du réacteur et des échangeurs primaires dans une grande caverne, globalement étanche mais cependant légèrement drainante à l'extrados vis-à-vis des eaux souterraines (que la centrale soit située au-dessus ou au-dessous de la nappe) ;
- installations nucléaires annexes (piscines...) et du poste de commande dans une ou plusieurs cavernes voisines ;
- accès aux installations souterraines par puits mais aussi descenderie, afin de garantir un accès autonome en toutes circonstances ; les entrées de ces ouvrages en surface seraient

bien sûr concentrées, sécurisées et même blindées ;

- installations non nucléaires (échangeurs secondaires, turbines, alternateurs, poste électrique...) en surface, comme à Chooz et dans les projets d'Ontario Hydro ; les effluents liquides ou gazeux seraient bien sûr rejetés exclusivement en surface ;
- naturellement, les prises d'eau et condenseurs seraient eux aussi en surface, de préférence au bord d'un lac ou d'un vaste réservoir afin de garantir une alimentation en eau gravitaire en cas d'urgence ; il faudrait aussi prévoir une grande caverne-albraque pour recueillir les eaux de refroidissement de secours (sauf à installer idéalement la centrale au flanc d'une montagne) ;

A propos de l'étanchéité, il serait intéressant d'exploiter à fond le retour d'expérience sur la centrale de Chooz A sous l'aspect hydrogéologie et contamination. On peut envisager un réseau de drainage externe autour des cavernes, pour éviter que des fuites d'eaux éventuellement contaminées n'atteignent des exutoires en surface (à noter que le problème de l'étanchéité des installations se pose aussi en surface, puisque les bâtiments ne sont pas totalement étanches et qu'on constate souvent une légère contamination de la nappe au droit des sites). On rejoint ici la problématique du stockage souterrain des déchets radioactifs.

Ceci dit, pour tirer tout l'intérêt pratique et économique d'une implantation souterraine, il ne faut surtout pas transposer directement les dispositions adoptées en surface, mais chercher au contraire à s'en libérer, en explorant d'autres concepts que pourrait suggérer la présence gratuite et en quantité indéfinie d'un massif rocheux résistant et confinant. A titre d'exemple, à partir du moment où le réacteur est protégé par des centaines

Last, in **Israel** the value of an underground nuclear power plant has been publicly underlined by geologist Wes Myer by preference to a surface plant which would dramatically deteriorate the vulnerability of a so cramped and threatened country.

8 - What do rock engineers propose?

With the assistance of rock mechanics specialists, engineers are now able to better respond to the problems raised by the construction of large caverns and better guarantee their stability over the long term. They imagine that the broad brushstrokes of an underground nuclear power plant could be as follows:

- Installation of the reactor and primary exchangers in a large cavern that is generally watertight but which is nevertheless slightly permeable to the groundwater at the extrados (no matter whether the plant is above or below the water table).
- Locate annexe nuclear installations (pools, etc.) and the control room in one or more adjacent caverns.
- Access to underground installations through a shaft as well as a ramp to be able to ensure autonomous access under all circumstances; the surface entrances to these works shall necessarily be concentrated, secure and even armoured.
- Non-nuclear installations (secondary exchangers, turbines, generators, switchyard, etc.) on surface level, as per Chooz and the Ontario Hydro projects. Liquid and gaseous effluents will of course be exclusively discharged on surface level.
- Naturally, water intakes and condensers will also be on surface level, preferably next to a lake or a large reservoir to guarantee a gravity-fed supply of water in case of emergency. It is also necessary to

anticipate a large sump cavern to collect the emergency cooling water (unless, ideally, the power plant can be installed on a mountainside).

About tightness, it would be interesting to fully exploit the experience feedback on Chooz A concerning the hydrogeological and contamination aspects. In certain cases, it seems indispensable to have a drainage network all around the cavities to collect any contaminated water and prevent it from reaching surface outlets (the same problem occurs for surface facilities as no building is totally watertight and a slight contamination of the aquifer is often observed near the sites), just like in the problematics of underground storage of radioactive waste.

Having said this, to take full advantage of the practical and economic interest of an underground site, rather than directly transpose the conditions adopted on surface level, it is, on the contrary, necessary to get away from them and explore other concepts that might be suggested by the free and enormous quantity of a resistant and confining rock mass. For example, as from the moment that the reactor is protected by hundreds of metres of rock, there is no longer any reason to place it within a cylindrical containment covered by a dome able to resist a crashing aircraft. Of course finding a massif answering all the required criteria is not easy, and there are few chances to find one near the centers of consumption; but it certainly exists in most of the large countries as shown by the studies for the deep storage of radioactive waste.

9 - Conclusions

A few months after the Fukushima accident, Charles Fairhurst, former president of the International Society of Rock Mechanics, sent the following

de mètres de rocher, il n'y a plus de raison de le loger dans une enceinte cylindrique coiffée par une coupole à l'épreuve des chutes d'avion... Bien entendu, trouver un massif répondant à tous les critères exigés n'est pas facile, et il y a peu de chances d'en trouver un à proximité des centres de consommation ; mais il en existe certainement dans la plupart des grands pays, comme l'ont montré les études pour le stockage profond des déchets radioactifs.

9 - Conclusions

Quelques mois après l'accident de Fukushima, Charles Fairhurst, ancien président de la Société internationale de Mécanique des roches, a envoyé les recommandations suivantes à ses collègues japonais: « Les événements de Fukushima conduisent déjà le public du monde entier à s'alarmer quant à la sûreté de l'énergie nucléaire, et va certainement conduire certains à recommander de bannir, comme trop dangereuse, cette source d'énergie potentiellement importante et abondante. C'est compréhensible, mais excessif. Un réexamen sérieux du potentiel qu'offrirait des centrales nucléaires souterraines pourrait permettre de démontrer que l'énergie nucléaire peut être développée avec sûreté » [communication personnelle]. De son côté, le président actuel de l'AITES, In-Mo Lee, professeur à l'université à Séoul, a pris officiellement une position analogue en octobre 2011 : dans son discours d'ouverture du congrès de l'AFTES, à Lyon, il a appelé de ses vœux un effort international de recherche sur la faisabilité, la sécurité et l'opportunité de centrales nucléaires souterraines

Les auteurs partagent entièrement les recommandations de Ch. Fairhurst et d'In-Mo Lee. Ils considèrent que, face aux divergences et aux contradictions qui caractérisent le développement du

nucléaire civil dans le Monde, il est urgent de réexaminer à froid, 30 ans après, les conclusions de la conférence de Hanovre. Maintenant que la question de la faisabilité technique de grandes cavernes au rocher est résolue, il conviendrait de réexaminer point par point l'argumentaire développé par les Canadiens (cf. § 4), qui étaient alors les plus avancés dans la voie des réacteurs souterrains.

Cet exercice doit être impérativement pluridisciplinaire et intégrer les nombreuses évolutions qui ont marqué depuis 30 ans les méthodes de calcul, de construction et d'exploitation des centrales électronucléaires, ainsi que les coûts et bénéfices correspondants. Les points d'application rapidement envisageables se situent bien sûr dans les pays neufs, aux besoins énergétiques énormes et grandissants, mais nul ne sait si (et dans combien de temps) la perspective de la future catastrophe climatique ne pourrait pas conduire ailleurs à un retournement de l'opinion.

Dans l'immédiat, nul doute que la simple idée de lancer de telles recherches rencontrera une opposition virulente, au moins en Europe, comme ce fut le cas pour le stockage géologique des déchets radioactifs et la recherche de sites adaptés à cette fin. Mais si l'objection de conscience est légitime, elle n'exclut pas que se développe par ailleurs une réflexion fondée sur des bases rationnelles. Ces études devraient être typiquement confiées à de jeunes ingénieurs libres d'engagement, non compromis par les options passées, et qui puissent ainsi travailler sans contrainte ni parti-pris. Bien entendu, les conclusions devront ensuite être validées par des instances scientifiques indépendantes, si possible au niveau international. Il appartiendra alors aux autorités politiques de chaque pays concerné de prendre position, car elles seules sont

recommandations to his Japanese colleagues: "The events at the Fukushima nuclear power plants are already leading to public alarm world-wide over the safety of nuclear power, and will certainly lead some to recommend that this potentially important and abundant source of energy be simply banned as too dangerous. This is understandable, but misguided. A serious re-examination of the potential of underground location of nuclear power plants could help demonstrate that nuclear power can be developed safely" [a personal communication]. The current ITA president, In-Mo Lee, professor at the University of Seoul, officially adopted a similar position in October 2011: during his opening speech at the French Tunnelling and Underground Space Association conference in Lyon, he called for an international effort to examine the feasibility, safety and advisability of underground nuclear power plants.

The authors fully share the recommendations made by Ch. Fairhurst and In-Mo Lee. They consider that faced with the divergences and contradictions characterising the development of civil nuclear power across the world, it is urgent to take a fresh and objective look at the conclusions of the Hanover conference. Now that the issue of the technical feasibility of large caverns excavated from rock is resolved, it would be worthwhile examining point by point the arguments developed by the Canadians (cf. § 4) who, at that time were the most advanced in terms of underground nuclear reactors.

This exercise must necessarily be multidisciplinary and integrate the large number of changes that over the last 30 years have marked the methods for calculating, building and operating nuclear power plants, including costs and benefits. The rapidly conceivable application points are obviously in new emerging economies with vast and ever-growing energy

needs, but no one knows if (and when) the prospect of a future climate catastrophe might not lead to a reversal of opinion.

In the immediate future, it is clear that just the fact of launching this type of research will encounter virulent opposition, at least in Europe, as was the case for the geological storage of radioactive waste and the research into sites adapted to this purpose. But while conscientious objection is legitimate, it should not exclude the development of thinking on the issue founded on rational bases. These studies should typically be placed in the hands of young engineers free from commitments, uncompromised by past options and who can thus work without constraints or bias. Naturally, the conclusions then need to be validated by independent and preferably international scientific bodies. It would then be up to the political authorities of each concerned country to assume a position, given that these are the only bodies authorised to decide whether to build nuclear power plants and whether they should be built underground.

After all, what is the role of the civil engineer? Admittedly, E. Teller, already cited (cf. § 2), said that: "Scientists have no right to use their prestige to influence political decisions". Perhaps... In any event, it is clearly up to them to demonstrate or invalidate the technical feasibility of a solution, quite simply because no one else could legitimately do it in their place. It could even be argued that it is their duty to inform the general public and the authorities concerning this matter, in the same way that in construction law, the civil engineer has a duty to advise his client, even when he has not been mandated to do so. It is in this spirit that the authors have written this article, while at the same time being clearly aware that, no matter

habilités à décider de construire ou non des centrales nucléaires, et de le faire éventuellement en souterrain.

En fin de compte, quel est le rôle de l'ingénieur civil ? Certes, E. Teller, déjà cité (cf. § 2), disait que « Les scientifiques n'ont pas le droit d'user de leur prestige pour influencer les décisions politiques ». Voire... Quoi qu'il en soit, c'est bien à eux qu'il appartient de démontrer ou d'infirmer la faisabilité technique d'une solution, car qui pourrait valablement le faire à leur place ? On peut même avancer qu'il est de leur devoir d'éclairer le grand public et les autorités à ce sujet – de même qu'il existe dans le Droit de la

construction un devoir de conseil de l'ingénieur civil vis-à-vis de son maître d'ouvrage, quand bien même il ne serait pas mandaté à cet effet. C'est dans cet esprit que les auteurs ont écrit le présent article, tout en ayant clairement conscience que, quelles que soient leurs convictions personnelles, ils n'ont pas vocation à se prononcer quant à une éventuelle réalisation. ♦

Remerciements :
les auteurs remercient pour leurs contributions les collègues de l'AFTES et de l'ABTUS qui ont bien voulu relire et commenter leur texte, en particulier Bernard Côme, Gilbert Castanier, Didier De Bruyn, Daniel Drissenne et Jean-Louis Giafferi.

what are their personal convictions, it is not their task to decide whether or not a power plant should be built underground. ♦

Acknowledgements :
the authors thank for their contribution all colleagues from AFTES and ABTUS who accepted to read and comment their draft, particularly Bernard Côme, Gilbert Castanier, Didier De Bruyn, Daniel Drissenne and Jean-Louis Giafferi.

Références / References

- K.H. Abraham, St. Barth, F. Bräutigam, A. Hereth, L. Müller, A. Pahl, O.J. Rescher (1974) – Vergleich von Statik, Spannungsoptik und Messungen beim Bau der Kaverne Waldeck II. *Rock Mechanics*, suppl. 3, pp. 143-166.
- M.B. Watson, W.A. Kammer et al. (1975) – *Underground Nuclear Power Plant Siting. Nuclear engineering & Design*, N° 33, pp. 269-307.
- *Nuclear Power Plants in Mined Caverns; Conceptual Design and Estimated Cost – Report to the Gov. of California. Executive Summary published by Underground Space*, 1979, Vol. 3, N° 5, pp. 253-257, Pergamon Press.
- R.C. Oberth, C.F. Lee (1979) – *Underground Siting of CANDU Power Stations – Underground Space*, Vol. 4, N° 1, pp. 17-27, Pergamon Press.
- Willet D. (1980) – *Underground Nuclear Power Plant Siting after Three Mile Island. USNC Tunneling Technology Newsletter*, N° 29.
- P. Duffaut (1981) – *Compte rendu de la réunion sur l'implantation souterraine de centrales souterraines (Hanovre, mars 1981) – Rapport BRGM n° 81SGN 478GEG.*
- A. Pahl, H.J. Schneider (1981) – *Unterirdische Bauweise von Kernkraftwerken ; ein Resume über das internationale Symposium in Hannover – ISMR Symposium, Aachen, 1982, Balkema.*
- A. Sakharov (1990) – *Memoirs. Alfred Knopf Ed., New York, p. 612.*
- E. Teller (2001) – *Memoirs: a Twentieth-Century Journey in Science and Politics. Perseus Ed., Cambridge MA, p. 565.*
- D. De Bruyn, H.A. Abderrahim, C. Ramaeckers, A. Van Cotthem (2004) – *Techniques de construction d'une grande structure enterrée dans des sables aquifères : cas du projet MYRRHA à Mol (Belgique). Tunnels & Ouvrages Souterrains*, N° 182, pp. 77-83.
- P. Duffaut (2007) – *Safe nuclear power plants shall be built underground – 11th ACUUS Conf., Athens, Kaliampakos & Benardos ed., pp.207-212.*
- P. Duffaut (2008) – *Pour être sûres, les centrales nucléaires doivent être souterraines. Tunnels & Ouvrages Souterrains*, n° 205, janv. 2008, pp. 1-5.
- J. Piraud (2009) – *Utiliser et aménager l'espace souterrain – Dossier spécial : Les 10 enjeux des géosciences – Géosciences*, éd. BRGM, Orléans, pp. 102-110.
- Duffaut P., Naves-Souhail F. (2012) – *Les atouts du sous-sol pour la mitigation des risques – Journées nationales Géologie-Géotechnique, juillet 2012, rap. n° 133, pp. 927-934, Univ. Bordeaux.*
- Myers W., Elkins N., (2004), *Underground Nuclear Parks and the Continental SuperGrid, SuperGrid Conf. Los Alamos National Laboratory, 25-27 Oct.*