**SCIENCES ET TECHNIQUES DU NUCLÉAIRE** LA REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE • JUILLET-AOÛT 2017 • N°4 • 51

Les réacteurs souterrains :

une bonne idée trop vite enterrée ?

*Par* Pierre Duffaut, *ancien ingénieur géologue à EDF puis au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)*

en substance…

Le premier accident nucléaire avec fusion partielle du cœur s’est produit en Suisse dans la petite centrale expérimentale de Lucens, le 21 janvier 1969 ; il n’a été officiellement dévoilé qu’en 2009, car il n’y avait eu aucune conséquence sanitaire ni environnementale, la centrale ayant été placée en souterrain. Plusieurs petits réacteurs en Europe et trois plus importants en Sibérie, tous souterrains, avaient précédé cette installation, ceux-ci longtemps couverts par un secret absolu, grâce à cette position souterraine. En dépit d’un symposium en 1981, de nombreuses recommandations d’experts, et des deux accidents de Chernobyl et Fukushima, cette solution ne semble pas étudiée.

**INTRODUCTION : L’ACCIDENT DE LUCENS**

Lors de la journée d’études de la SFEN sur les accidents nucléaires, le 10 mai 2017, le panorama présenté n’a pas évoqué l’accident de Lucens, en Suisse, en 1969, le premier ayant conduit à une fusion partielle du coeur du réacteur, longtemps avant ceux de Three Mile Island (Pennsylvanie, 1979), Tchernobyl (Ukraine, 1986) et Fukushima (Japon, 2011). La construction avait débuté en 1962 à Lucens (entre Lausanne et Berne) ; un réacteur à eau lourde, refroidi par du dioxyde de carbone, d’une puissance thermique de 30 MW (puissance électrique 6 MW), a été placé dans une caverne en cylindre vertical de 20 m de diamètre et d’une hauteur de 25 m. La figure 1 montre de droite à gauche la caverne réacteur, une caverne allongée analogue à celle d’une centrale hydroélectrique qui accueillait turbines et alternateurs, puis les bureaux et ateliers en surface au pied de la colline, à faible distance du cours d’eau qui fournit la source froide Si cet accident, survenu après une période de mise à l’arrêt, n’a pas échappé à la communauté nucléaire internationale, il n’a été dévoilé à la presse et donc à l’ensemble de la population suisse que quarante ans plus tard ! C’est dire qu’il n’avait donné lieu à aucune évacuation de population, aucune de ces restrictions sur la consommation des produits agricoles qu’on a connues ailleurs plus tard, ni même à aucune conséquence sanitaire sur le personnel d’exploitation.

En effet, le réacteur était dans une cavité souterraine et aucune radioactivité n’avait pu s’en échapper. La caverne a été depuis remplie de béton, et oubliée. Plusieurs petits réacteurs avaient été placés en souterrain peu avant celui de Lucens, de façon officielle en Scandinavie et en France, où Chooz A apparaît comme la tête de série du parc français de réacteurs à eau pressurisée (mise en service en 1967, avec une puissance électrique de 305 MW, elle a fourni 19 TWh jusqu’à son arrêt en 1991 ; elle est en cours de démantèlement) ; et au contraire de façon parfaitement secrète en Sibérie (la publication de Myers, Elkins, 2004, reproduit des images issues d’une brochure locale), alors qu’il s’agissait de puissances beaucoup plus importantes pour alimenter un complexe militaroindustriel et la ville nouvelle Jeleznogorsk où logeaient les personnels (elle-même secrète, sous le code Krasnoyarsk 26) ; ces centrales, dont on sait peu de choses1, seront fermées à la fin du siècle à la suite d’un accord avec les États-Unis sur l’interdiction de fabriquer du plutonium.



Figure 1 : coupe schématique de la centrale expérimentale de Lucens.

L’accident de la centrale américaine de Three Mile Island, près de Harrisburg, Pennsylvanie, est resté lui aussi sans conséquences sanitaires, l’enceinte en béton précontraint ayant joué son rôle, mais il a nettement ralenti les mises en chantier de centrales nucléaires dans le monde. En outre, il a introduit le doute en Allemagne où l’on craignait des bombardements en cette période de guerre froide : le gouvernement a convoqué un symposium international en 1981 au nucléaire souterrain (Bender, 1981, Duffaut, 1981) ; un rapport de l’Institut national suisse d’études nucléaires recense en détail les cinq réalisations connues et les nombreux projets mondiaux (Pinto, 1979). Malheureusement, lors des accidents postérieurs, les réacteurs RBMK et BWR de Tchernobyl et Fukushima étaient dans des bâtiments légers, facilement détruits par la moindre explosion, d’où les conséquences désastreuses.

**RAPPEL SUR LA CENTRALE FRANCO-BELGE CHOOZ A**

Pourquoi Chooz A a-t-elle été souterraine ? Un élément psychologique a dû jouer : une certaine

discrétion était de mise puisque le Général s’opposait au remplacement de la filière française UNGG (uranium naturel- graphite-gaz) par un matériel américain ; c’est une filiale franco-belge d’EDF et d’Electrabel, SENA, Société nucléaire des Ardennes, qui a commandé un réacteur Westinghouse à eau pressurisée et l’a placé avec ses auxiliaires dans un cylindre



Figure 2 : photo d’une galette prélevée à la partie supérieure d’un câble de précontrainte

vertical : les vides du coulis primaire, gris, dus à la ségrégation, sont mis en évidence par un coulis secondaire coloré en rouge.1. Il s’agissait de gros réacteurs plutonigènes à uranium naturel – graphite, refroidis à l’eau ordinaire, d’une puissance de 1 800 MW thermique chacun : démarrage en 1958 (réacteur « AD »), 1961 (réacteur ADE-1), et 1964 (réacteurs ADE-2). Les deux premiers étaient refroidis à l’eau en circuit ouvert et le troisième en circuit fermé. 2. Chooz A était un réacteur de type REP, 305 MWe. 3. Colline de grès et schiste ; parois en béton de 40 cm ancrées au rocher par boulons et armées d’un quadrillage métallique. Voûte béton de 80 cm. deux cavernes proches de la frontière, au bord de la Meuse, dans la « pointe de Givet » (portée de 15 et 18 m, hauteur 31 et 34 m).

L’élément majeur était technique : la précontrainte verticale des bâtiments réacteurs classiques était menacée par la corrosion des acierssuite à la ségrégation gravitaire dans les coulis de protection des câbles verticaux de grande hauteur (*figure 2*). EDF a mené de longues études pour définir la composition des coulis et les procédures d’injection des gaines avant d’accepter les enceintes en béton précontraint (les câbles horizontaux, dans les ponts par exemple, échappent à cette menace). La solution souterraine bénéficie d’une précontrainte naturelle gratuite3. En Allemagne c’est la protection contre les bombardements qui a conduit à étudier l’option souterraine (ou simplement le tumulus, butte de remblai couvrant une centrale plus ou moins enfoncée dans le sol) et on constate évidemment que la protection joue dans les deux sens : elle évite ou retarde les pollutions radioactives de l’environnement en cas d’accident interne à la centrale ; depuis l’accident de Fukushima, c’est cet argument qui semble le plus important.

**FAISABILITÉ D’UNE CAVERNE DE GRANDE PORTÉE**

Les hydrauliciens français ont été les pionniers des grandes cavernes industrielles ; pourtant, comme s’il y avait un tabou sur les grandes portées, ils se sont longtemps montrés timorés dans la largeur des cavernes de leurs usines souterraines : l’une des premières a été placée au pied du barrage du Sautet (Isère) où l’étroitesse de la gorge ne pouvait accepter qu’une petite partie du bâtiment ; la portée de cette caverne, 36 m pour loger deux rangées de machines, ne devait plus jamais être atteinte ; la portée maximale est de 25 m à La Bathie, Savoie, alors que l’Allemagne osera 33 m à Waldeck II, grâce à une section ovoïde et un soutènement par boulons et ancrages (cette caverne a été copiée très exactement à Imaichi au Japon quelques années plus tard et la Chine a fait mieux depuis). Par une expérience remarquable, la Norvège a balayé le tabou : après la petite centrale nucléaire de Halden, l’entreprise spécialiste de travaux souterrains (défensifs), *Fortifikasjon*, a voulu étudier une centrale de grande puissance ; à titre de démonstration elle a proposé un projet de patinoire souterraine dans un massif granitique proche d’Oslo (portée jugée convenable pour un réacteur de l’ordre de 1 000 MW). Comme le pays a abandonné l’énergie nucléaire, ce projet est resté lettre morte. Vingt ans après, l’entreprise a pu le proposer pour les Jeux olympiques d’hiver de Gjøvik 994. La caverne a été acceptée, et exécutée avec succès – en huit mois, pour un coût d’environ 1 000 couronnes le mètre cube (y compris les accès et aménagements intérieurs).portée 60 m sans aucun support intermédiaire.



Les hydrauliciens français ont été les pionniers des grandes cavernes industrielles ; pourtant, comme s’il y avait un tabou sur les grandes portées, ils se sont longtemps montrés timorés dans la largeur des cavernes de leurs usines souterraines : l’une des premières a été placée au pied du barrage du Sautet (Isère) où l’étroitesse de la gorge ne pouvait accepter qu’une petite partie du bâtiment ; la portée de cette caverne, 36 m pour loger deux rangées de machines, ne devait plus jamais être atteinte ; la portée maximale est de 25 m à La Bathie, Savoie, alors que l’Allemagne osera 33 m à Waldeck II, grâce à une section ovoïde et un soutènement par boulons et ancrages (cette caverne a été copiée très exactement à Imaichi au Japon quelques années plus tard et la Chine a fait mieux depuis). Par une expérience remarquable, la Norvège a balayé le tabou : après la petite centrale nucléaire de Halden, l’entreprise spécialiste de travaux souterrains (défensifs), Fortifikasjon, a voulu étudier une

centrale de grande puissance ; à titre de démonstration elle a proposé un projet de patinoire souterraine massif granitique proche d’Oslo (portée jugée convenable pour un réacteur de l’ordre de 1 000 MW). Comme le pays a abandonné l’énergie nucléaire, ce projet est resté lettre morte. Vingt ans après, l’entreprise a pu le proposer pour les Jeux olympiques d’hiver de Gjøvik 994. La caverne a été acceptée, et exécutée avec succès – en huit mois, pour un coût d’environ 1 000 couronnes le mètre cube (y compris les accès et aménagements intérieurs).



Figure 3 : creusement de la caverne de la patinoire souterraine à Gjøvik, Norvège, portée 60 m sans aucun support intermédiaire.

*Wikipédia* a depuis « oublié » cette filiation, reniant ainsi l’allusion à un projet antérieur nucléaire ; l’auteur la tient pourtant du concepteur, l’ingénieur Jan Rygh. Assurément la Norvège avait une longue expérience en ouvrages souterrains, des tunnels aux cavernes, des centrales hydroélectriques aux salles de sport, celles-ci utilisables aussi comme abris de défense passive. Le problème a été réactivé par les astrophysiciens, qui souhaitent piéger des neutrinos à l’abri des rayons cosmiques, dans des cavernes de grand volume sous grande couverture rocheuse (Duffaut, 2006). Une caverne de 69 000 m3 en cylindre vertical a été mise en service au Japon à près de 1 000 m de profondeur au sein de la mine de Kamioka, et des études s’y poursuivent pour des volumes plus importants.

**PROJETS MODERNES**

Le parc nucléaire souterrain associé au projet Geogrid :

Sur le modèle du Wipp (*Waste Isolation Pilot Plant*) qui abrite des déchets nucléaires au sein d’une épaisse formation de sel gemme du Nouveau Mexique, et en liaison avec le projet d’un super réseau de distribution d’électricité, Myers et Elkins (2004) ont proposé un *« parc nucléaire souterrain »* qui abriterait côte à côte des réacteurs et le stockage de leurs déchets, éventuellement des note la concentration locale de la usines de traitement. Grâce au Wipp, l’exécution est classique, à un coût modeste.Parmi les avantages du projet, on production et l’absence de transit des déchets en surface. Le recours aux réacteurs modulaires SMRj Depuis que les industriels proposent des réacteurs normalisés de puissance inférieure à 500 MW, les petits réacteurs modulaires

**SMR**

SMR, le montage sur site est limité à quelques branchements et les opérations de rechargement disparaissent : les réacteurs sont livrés en état de marche et sont renvoyés à l’usine pour recharge. La taille modeste est favorable à des installations souterraines ; la modularité permet d’ajouter des unités au fur et à mesure des besoins ; la desserte de lieux à faible consommation est au premier rang des arguments techniques ; bien évidemment, et la fabrication en série permet d’abaisser

le coût

**DISCUSSION**

La réduction des risques est l’argument majeur en faveur des solutions souterraines (*tableau 1*) : dans des installations aussi complexes que les réacteurs nucléaires, soumises aux aléas naturels mal connus et aux erreurs humaines, le risque d’accident doit être réduit autant que possible. Seule la mise en souterrain peut procurer la barrière supplémentaire alors nécessaire en dernier ressort. Un surcoût probable de 10 à 20 % est peu face aux dépenses engagées après les accidents les plus graves.

D’où vient donc cette opposition générale à l’idée même de réacteurs souterrains ? L’auteur pense que tous les problèmes technologiques sont surmontables, mais qu’une crainte diffuse imprègne les responsables nucléaires, en raison de l’insuffisance de *« culture du souterrain»*. Les visites de mines des étudiants de première année étaient autrefois conduites dans de « vieux quartiers » effondrés où il fallait ramper au milieu de boisages brisés ou de cadres métalliques tordus…

C’était un paradoxe apparent puisque, devenus incapables d’efforts, ces bois ou cintres n’avaient plus besoin d’en fournir : en les écrasant le terrain avait épuisé le besoin de déformation indispensable pour qu’il accepte la cavité. L’absence désormais de mines souterraines en France prive les étudiants de terrains d’acclimatation ; hors des Écoles des Mines, plus rien ne rappelle cette expérience qui a fondé la confiance des ingénieurs mineurs d’autrefois, sans même qu’ils en aient toujours eu conscience.

Le réacteur souterrain serait-il utopique ? Selon Benjamin Franklin et Théodore Monod, notamment, l’utopie est *« ce qui n’a pas encore été essayé »* ; les réacteurs souterrains on (l’USS Nautilus date de 1955), ou de brise-glace (depuis le russe nommé Lénine, 1957).

Après avoir réussi hier à petite échelle, essayons maintenant en vraie grandeur !

Tableau 1 : liste schématique d’arguments pour et contre la mise en souterrain des réacteurs.

|  |  |
| --- | --- |
| Favorables | Défavorables |
| **›**› Élimination des rejets radioactifs gazeux et/ou liquides en cas d’accidents internes graves.  **›**› Quasi invulnérabilité face aux agressions humaines  (terrorisme, chute d’avions, etc.) et atmosphériques (foudre, ouragans…).  **›**› Faible surface occupée au sol et indépendance relative  par rapport aux occupations du sol.  **›**› Grande facilité du contrôle d’accès.  **›**› Excellente fondation rocheuse.  **›**› Élimination d’une précontrainte coûteuse.  **›**› Économies sur l’habillage extérieur.  **›**› Élimination des ondes sismiques de surface.  **›**› Élimination possible d’enceinte en acier.  **›**› Facilité d’arrosage par gravité en urgence.  **›**› Moindre coût de fermeture et démantèlement.  **›**› etc. | **›**› Augmentation du coût et du délai de construction.  **›**› Incertitude du fait de surprises géologiques.  **›**› Difficulté à identifier des sites concrets.  **›**› Difficulté et coût des démarches pour obtenir le licenciement d’une formule nouvelle.  **›**› Tendance du projeteur à maximiser les surcoûts et incapacité à bénéficier des avantages.  **›**› Difficulté d’intervention.  **›**› Crainte que la pression du public exige que tout réacteur soit souterrain.  **›**› Difficulté à justifier la stabilité par le calcul comme on sait faire en génie civil. |