Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 92 (1966)
Heft: 9: Numéro spécial d'architecture industrielle, fascicule no 1

Artikel: La production d'énergie nucléaire
Autor: Gardel, André
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-68358

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

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

Fig. 5 — Centrale thermique de Champagne-sur-Oise.

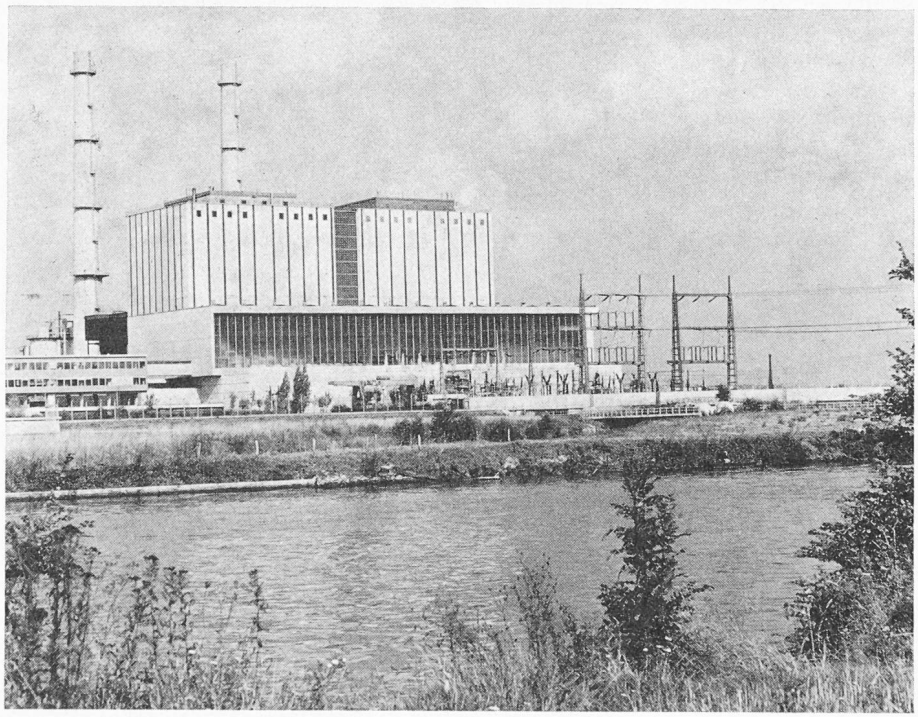

Fig. 6 — Centrale thermique de Champagne-sur-Oise.
500 000 kW de puissance installée.

LA PRODUCTION D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

par ANDRÉ GARDEL, professeur
à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne
Dr ès sc. techn., ingénieur-conseil

Introduction et rappel historique

Lorsque s'ouvrit, il y a onze ans, en août 1955 à Genève, la première Conférence internationale sur les applications pacifiques de l'énergie nucléaire, c'était surtout d'études théoriques et d'installations de laboratoire que les congressistes s'attendaient à discuter, les applications pratiques restant hypothétiques et réservées à un avenir encore lointain. Il ne semblait pas devoir en être autrement puisque la découverte en 1938 du phénomène entièrement nouveau de la fission atomique ne datait alors que de dix-sept ans.

Néanmoins, le très grand intérêt militaire de cette nouvelle source d'énergie avait conduit plusieurs Etats à consacrer des sommes énormes aux recherches la concernant et au développement des techniques qu'elle exigeait. Quoique ces techniques fussent particulièrement difficiles, les progrès furent assez rapides pour qu'une première installation de laboratoire, dégageant

de la chaleur de manière contrôlée et en quantité appréciable, entrât en service à la fin de 1942 : c'était la première pile atomique, due au regretté professeur Fermi, construite à Chicago.

Conscients d'être sur la voie d'une technique qui permettrait bientôt de mettre à disposition de l'énergie exceptionnellement bon marché et soucieux de mettre en valeur les grands investissements faits à titre militaire, tout en s'assurant des positions privilégiées dans un secteur économique particulièrement important, les Etats-Unis poursuivirent activement leur effort dans l'après-guerre. En cela, ils furent suivis par l'URSS et la Grande-Bretagne, puis par la France. Tant et si bien qu'à cette première conférence de Genève de 1955, on comprit que ce n'était pas en décennies qu'il faudrait compter pour le progrès de cette nouvelle énergie, mais seulement en années.

Et, en effet, la technique nucléaire a atteint ces dernières années la maturité qui permet d'assurer la sûreté de fonctionnement de centrales électriques et d'en garantir l'économie. De grandes centrales nucléaires étant désormais plus compétitives que les centrales thermiques (à huile lourde ou charbon) ou hydrauliques, on assiste donc à une évolution importante du mode de production de l'électricité, les centrales actuellement mises en service atteignant ou dépassant 500 MW. C'est une puissance double de celle des grandes centrales hydro-électriques ou thermiques construites dans la dernière décennie.

Plusieurs centaines de réacteurs atomiques sont aujourd'hui en activité, qu'il s'agisse d'installations de recherche et de laboratoires, ou d'unités destinées à la production d'énergie utile. Rappelons en passant le large emploi de l'énergie nucléaire pour la propulsion des navires, ce qui en dit long sur la sûreté de fonctionnement, les exigences à cet égard étant bien plus grandes que pour une installation terrestre.

Après ces quelques propos d'introduction, nous nous permettrons de rappeler très brièvement les bases scientifiques et techniques de la production d'énergie nucléaire. Ce faisant, nous soulignerons les particularités qui ont de l'importance sur la conception générale des centrales, sur leur environnement et, partant, sur leur implantation.

Puis nous reprendrons et préciserons quelques points relatifs au choix des emplacements ; cela nous permettra des comparaisons avec les autres modes classiques de production d'électricité.

Nous nous efforcerons de présenter les choses de manière aussi simple que possible ; on voudra bien nous pardonner les inexactitudes qui résulteront de cette trop grande schématisation.

Bases scientifiques et techniques

Chacun sait que toute matière est formée d'atomes et que ceux-ci sont constitués d'un noyau lourd autour duquel gravite un nuage de particules légères, les électrons. Le nombre de ces électrons varie de 1 à une centaine ; il définit le corps chimique.

Toutes les réactions chimiques depuis les combinaisons les plus simples jusqu'à celles formant les molécules extraordinairement complexes de la matière vivante, des lentes corrosions aux explosions les plus violentes, ne font appel qu'à ces électrons, et même en général seulement à ceux situés à la périphérie du nuage.

C'est au contraire du noyau lui-même que l'on va tirer l'énergie nucléaire. Ce noyau est d'autant plus complexe qu'il s'agit d'un élément plus lourd ; et l'on ne s'étonnera pas que sa fragilité croisse en même temps. Soumis à un choc violent, un tel noyau peut se casser, libérant alors une partie de l'énergie qui avait été utisée à le constituer. C'est cette fracture d'un noyau d'atome lourd qu'on nomme fission et c'est cette énergie libérée dont on va disposer.

Cette fission va s'accompagner de radiations et le lieu où elle se produit, le réacteur, deviendra donc dangereusement radioactif ; il devra être entouré d'un écran de protection épais (3 m de béton par exemple).

En outre, la fission libère deux ou trois particules constitutives du noyau, particules relativement lourdes et sans charge électrique : des neutrons. On disposera ainsi naturellement du moyen de provoquer de nouvelles fissions, ces particules étant suffisamment lourdes, et le fait qu'elles sont électriquement neutres leur permettant de traverser aisément le nuage d'électrons entourant le noyau. La réaction pourra ainsi être entretenue.

Encore faudra-t-il ralentir ces neutrons, leur vitesse initiale étant beaucoup trop élevée. Les noyaux lourds susceptibles de fission, que, par extension de langage, nous appellerons combustible, devront donc être placés dans un milieu approprié ralentissant les neutrons sans les absorber : c'est le modérateur, et c'est un élément constitutif du réacteur. Peu de substances conviennent bien à cet égard : dans certaines conditions, on peut utiliser de l'eau ordinaire, mais ce sera plutôt du graphite, ou mieux encore la fameuse eau lourde.

Quant au combustible, c'est, chacun le sait, l'uranium qui convient le mieux, non seulement parce qu'il est relativement répandu, mais parce qu'étant le plus lourd des corps naturels sa fission est la plus aisée à provoquer. Enfin, le nombre élevé des neutrons émis à chaque fission permet de maintenir plus facilement une réaction entretenue.

Cependant, les morceaux de noyaux résultant des fissions sont autant de nouveaux noyaux d'atomes plus légers ; mais ils n'ont pas immédiatement des structures stables ; ils ne trouveront leur stabilité que par l'émission de radiations diverses et cela au bout de temps plus ou moins longs. On constate donc que ces produits de la fission sont très fortement radioactifs et il sera de toute importance de ne pas les laisser s'échapper ; d'où la nécessité d'envelopper les cartouches de combustible d'un gainage de grande étanchéité. C'est l'un des points techniques délicats.

Où trouve-t-on cette énergie nucléaire ? Pour la majeure partie, elle n'est autre que l'énergie de vitesse des morceaux projetés par l'éclatement du noyau. Pour le reste, ce sont les diverses radiations émises lors de la fission ou ultérieurement par les nouveaux atomes produits. Toute cette énergie se retrouve finalement en chaleur dans le combustible et le modérateur, et pour une moindre part dans les écrans. Il faut refroidir les uns et les autres si l'on veut éviter une élévation de température allant jusqu'à la destruction du réacteur

par fusion de ses éléments constitutifs. Il faut bien comprendre qu'en fait de refroidissement, il s'agit d'éviter que la chaleur ne s'élève au-dessus d'une limite estimée dangereuse, par exemple 400°C. Ce sera donc la chaleur du fluide de refroidissement qui constituera l'énergie utile. On parlera donc volontiers de fluide caloporteur et c'est aussi un élément important du réacteur : il doit pouvoir entraîner énormément de chaleur, en absorbant peu de neutrons, et en devenant aussi peu radioactif que possible en traversant le réacteur. Le gaz carbonique CO_2 convient bien à cet effet, mais on utilise aussi de la vapeur, ou de l'eau, ou même exceptionnellement du métal liquide (p. ex. sodium). Dans un grand réacteur, ce fluide entraîne un demi-million de kilocalories à chaque seconde. Une centrale nucléaire est donc une centrale thermique dont la chambre de combustion est remplacée par le réacteur. Comme dans une centrale thermique, la chaleur est ensuite utilisée à produire de la vapeur à haute pression et haute température destinée à faire tourner une turbine, celle-ci entraînant un alternateur, qui débite sur le réseau. Cependant, à l'heure actuelle les température et pression sont un peu moins élevées que dans une centrale thermique et le rendement thermodynamique est ainsi un peu inférieur, ce qui d'ailleurs n'est pas significatif du point de vue économique.

Pour que la réaction soit entretenue, il faut que sur les deux à trois neutrons émis à chaque fission, un, et un seul, provoque une nouvelle fission. Cela impose une stricte économie des neutrons afin de ne pas trop en perdre par capture dans les structures, le gainage du combustible, le modérateur, le fluide de refroidissement, ou dans les écrans à la périphérie. Mais il faut également pouvoir régler exactement le dégagement d'énergie à la puissance voulue. On placera donc dans le réacteur des barres faites d'un matériau absorbant les neutrons, barres que l'on pourra engager plus ou moins pour ralentir la réaction, ou au contraire sortir un peu pour permettre l'accroissement de la puissance. L'engagement rapide et à fond des barres provoque l'arrêt quasi instantané du réacteur. Le réglage est, comme on le voit, beaucoup plus simple que pour une centrale thermique. Le mécanisme de commande de ces barres est également un des éléments les plus importants du réacteur : il doit être sûr, précis et rapide.

Nous avons déjà mentionné le fait que les produits de la fission sont radioactifs ; ils s'accumulent au fur et à mesure de la consommation du combustible. Cette particularité de la centrale nucléaire a plusieurs conséquences importantes, l'une notamment d'ordre économique : certains de ces produits capturent volontiers les neutrons ; leur présence empoisonne donc progressivement le combustible et, au-delà d'un taux limite, la réaction ne pourra plus être entretenue. Le combustible devra être renouvelé, alors même qu'il n'est pas épuisé. Ce renouvellement de la charge de combustible n'a cependant lieu qu'au terme d'un temps relativement long, variant de 6 à 24 mois. Mais pour éviter ces arrêts, la tendance actuelle est de prévoir des dispositifs de recharge continue, en marche.

Une autre conséquence de la présence des produits de fission, conséquence essentielle du point de vue de la sécurité, est qu'une radioactivité importante subsiste après arrêt du réacteur. Or, cela correspond à un appréciable dégagement de chaleur qui, s'il décroît dans le temps, n'en ferait pas moins monter la température de manière dangereuse. Cette chaleur, dite « retardée », doit être impérativement évacuée et l'on doit donc être en mesure de poursuivre un certain refroidissement après l'arrêt, cela pendant plusieurs mois. Une centrale nucléaire doit donc disposer d'organes auxiliaires permettant de garantir absolument le refroidissement quelles que soient les circonstances.

* * *

Pour en finir avec ces questions de base, et pour écarter un malentendu qui apparaît trop souvent, permettez-nous de préciser ici la différence entre fission et fusion nucléaire.

Alors que la fission est, nous venons de le voir, la rupture d'un noyau lourd, la fusion est au contraire la réunion en un seul de deux noyaux d'atomes légers, par exemple d'hydrogène. C'est également un phénomène nucléaire, et non chimique, puisque ce sont les noyaux qui interviennent. Cette fusion libère également beaucoup d'énergie et c'est d'elle que les étoiles tirent leur rayonnement, notre Soleil y compris. La fusion est obtenue si les noyaux légers se rencontrent à très grande vitesse, c'est-à-dire s'ils se trouvent au sein d'un gaz à très haute température, par exemple 100 millions de degrés. C'est pourquoi l'on parle de réaction thermonucléaire et c'est à la fusion que ce terme doit être réservé (par exemple, la bombe atomique tire son énergie de la fission, la bombe à hydrogène de la fusion). Fission et fusion sont donc bien nucléaires toutes deux, mais il s'agit de phénomènes très différents, dans leurs mécanismes scientifiques, comme dans toutes les conséquences pratiques qui en découlent. De nombreux laboratoires travaillent à l'étude de la fusion, mais l'utilisation pratique de cette source d'énergie soulève des problèmes particulièrement difficiles ; il est possible que l'homme parvienne un jour à les dominer, mais tout ce que l'on peut dire ici est que ce n'est pas pour demain.

La centrale nucléaire

Des bâtiments et constructions, nous soulignerons tout d'abord les grandes dimensions, celles-ci provenant des puissances élevées, 300 à 800 MW pour un réacteur, souvent deux réacteurs par centrale. Si la disposition générale n'est pas sans analogie avec celle d'une centrale thermique, relevons que le bâtiment du réacteur — qui remplace la chaufferie — est d'un volume plus compact ; il peut avoir de 40 à 60 m de hauteur. S'il s'agit de réacteurs utilisant de l'uranium dit enrichi et de l'eau comme modérateur, la sécurité intrinsèque un peu moins élevée peut exiger que le réacteur et ses auxiliaires soient enfermés dans une construction étanche et résistant à la surpression qui ferait suite à un accident majeur. C'est ainsi que diverses constructions sphériques ont vu le jour. Les progrès techniques ont permis d'en restreindre la nécessité car il s'agit évidemment de réalisations onéreuses et dont le volume intérieur est d'une

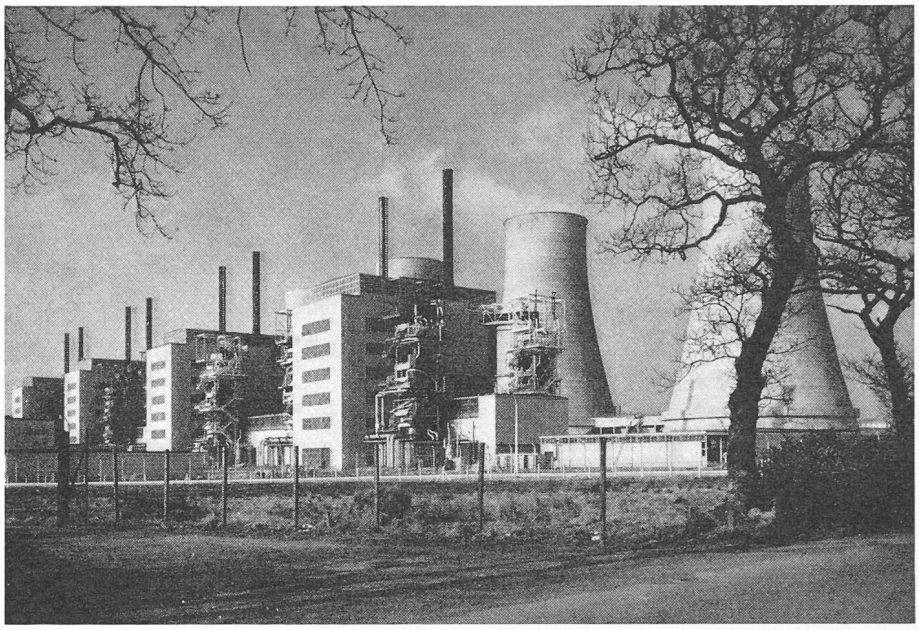

Fig. 7 — Centrale nucléaire anglaise de Chapelcross (Ecosse), comprenant quatre réacteurs (dont les grands bâtiments cubiques, bien visibles, sont entourés chacun de quatre échangeurs de chaleur construits « out door »). A l'arrière-plan, les quatre tours de réfrigération. Salle des machines de huit groupes turbo-alternateurs en partie visible à gauche.
Entrée en service 1959/60.
Puissance électrique totale nette : environ 160 MW.

Fig. 8 — Centrale nucléaire anglaise de Bradwell (Essex), comprenant deux réacteurs (dont les bâtiments sont visibles à l'arrière-plan et sont entourés chacun de six échangeurs « in door »).
Au premier plan, à gauche, la salle des machines de six turbo-alternateurs.
Entrée en service : 1961/62.
Puissance électrique totale nette : environ 300 MW.

Remarque : On notera l'augmentation de la puissance, la diminution du nombre des réacteurs et des groupes turboalternateurs et la simplification générale de l'architecture ; il n'y a pas de tour de réfrigération, le refroidissement étant assuré directement par l'eau de mer.

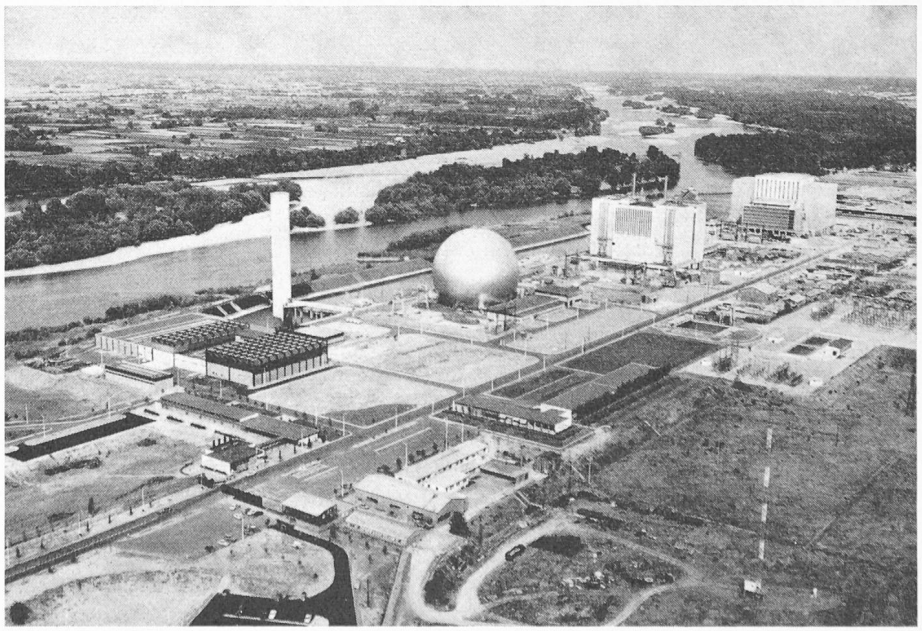

Fig. 9 — Centrale nucléaire française EDF-1, 2, et 3, au bord de la Loire, à Chinon.
Au centre, la sphère de la centrale EDF-1 (contenant le réacteur et l'échangeur) ; immédiatement devant : un groupe turbo-alternateur « out door ».
Entrée en service : 1962.
Puissance électrique totale nette : environ 68 MW.

Plus à droite, la centrale EDF-2 (un bâtiment contenant au centre un réacteur et de part et d'autre les échangeurs) ; immédiatement devant : deux groupes turbo-alternateurs « out door ».
Entrée en service : 1963.
Puissance électrique totale nette : environ 200 MW.

A l'arrière-plan, à droite : centrale EDF-3 ; même disposition que EDF-2, mais puissance électrique nette de 480 MW.
Entrée en service : 1964.

utilisation difficile. Mais des constructions cylindriques restent opportunes dans nombre de cas, et la tendance actuelle est de les réaliser non plus en acier, mais en béton précontraint.

Pour ce qui est de la salle des machines, mentionnons que la recherche de la meilleure rentabilité conduit à prévoir des groupes turbine-alternateur de puissances unitaires croissantes. Si la puissance normale est actuellement en France de 250 MW par groupe, on y met au point des groupes de 500 et 600 MW en une seule ligne d'arbre qui peut ainsi atteindre 60 m de bout en bout. Une salle qui comporte deux groupes de cette puissance, disposés à la suite l'un de l'autre, atteint donc environ 150 m de long. C'est l'occasion de signaler l'intérêt qu'il peut y avoir à placer de tels groupes « out-door », si les conditions climatiques s'y prêtent ; encore l'économie qui en résulte n'est-elle généralement pas aussi notable qu'on pourrait le croire (1 à 2 % du coût de la centrale) et doit-elle être appréciée compte tenu des incidences sur la facilité d'exploitation.

En plus des bâtiments ou corps de bâtiments traditionnels abritant les services administratifs, les ateliers et les locaux à caractère social, la centrale nucléaire comporte des constructions particulières tant pour le stockage temporaire du combustible après utilisation que pour le traitement des divers déchets radioactifs qui peuvent résulter de l'exploitation ou de la décontamination nécessaire à la suite d'un accident. C'est ici l'occasion de préciser que dans tous les locaux de la centrale où l'on peut craindre la libération de substances radioactives ensuite d'accidents tels que rupture de canalisation ou pertes d'étanchéité diverses, les parois sont revêtues de peintures spéciales dans le but de faciliter la décontamination ultérieure par simple lavage.

Conditions du choix de l'emplacement

Que l'emplacement de la centrale doive être choisi aussi proche que possible des centres de consommation peut paraître une vérité de La Palice. Cependant, c'est déjà là qu'apparaît une des principales différences séparant les centrales thermiques et nucléaires des centrales hydro-électriques. Pour ces dernières, c'est la situation des cours d'eau, les possibilités d'exploiter une chute, qui fixent la zone des ouvrages, le détail des emplacements étant déterminé par les conditions topographiques, géologiques, d'accessibilité, etc. Il reste ensuite à transporter l'électricité produite jusqu'aux consommateurs, c'est-à-dire parfois à relativement grande distance.

Cet impératif topographique de disponibilité de chutes d'eau n'existe évidemment plus pour les autres centrales. A vrai dire, il subsiste cependant une importante exigence de nature hydraulique : les lois de la thermodynamique rendent nécessaire la présence d'une source froide, à laquelle on puisse céder la moitié environ de la chaleur produite par le réacteur, mais cela à basse température, c'est-à-dire sous une forme dégradée de l'énergie. Cette condition est identique pour les centrales nucléaires ou pour les centrales thermiques. Elle peut être satisfaite le plus simplement si la centrale est située à proximité d'un cours d'eau important, d'un lac ou de la mer. Leur eau sera alors mise à contribution pour refroidir le condenseur de la turbine à vapeur : on parle de refroidissement direct. Il y aura lieu d'examiner attentivement les conséquences de cette importante évacuation de chaleur ; on pourra, par exemple, craindre qu'une élévation de 1 ou 2 °C de la température de l'eau de la rivière ne gêne par trop la faune, ou, à l'opposé, n'en favorise la flore ! Un tel dispositif de refroidissement direct peut exiger, pour une grande centrale, le pompage dans le lac ou le cours d'eau d'un débit de 20 ou 30 m^3/s, ce qui impose des ouvrages relativement importants de prise d'eau et de restitution.

Mais on ne dispose pas toujours de telles quantités d'eau et la nécessité d'évacuer la chaleur subsiste. On peut réduire le débit nécessaire à 5 ou 10 % du précédent par le recours à une tour de réfrigération. On parle alors de refroidissement indirect.

Une telle tour est une construction dans laquelle l'eau à refroidir s'égoutte sur des lattis, placés dans un contre-courant d'air. Une faible partie de l'eau s'évapore ainsi et est entraînée par l'air humide dans l'atmosphère ; la chaleur de vaporisation de cette eau est prélevée sur le reste de l'eau qui est ainsi refroidie à volonté. Constatons que c'est alors l'atmosphère qui joue le rôle de la source froide et que le système consomme un peu d'eau (par opposition au cas précédent du refroidissement direct). Mais notons aussi qu'il faudra élever l'eau à refroidir à 10 ou 15 m de hauteur, ce qui consomme de l'énergie. Le refroidissement indirect sera donc plus onéreux, par la construction de la tour et des installations annexes d'une part, par le coût d'exploitation d'autre part.

Si le contre-courant d'air n'est pas le fait de ventilateurs mais provient simplement du tirage naturel, on aboutit à ces grands hyperboloïdes que l'on trouve parfois à côté des centrales thermiques. Il peut s'agir de constructions très importantes puisque la hauteur en est de 60 à 90 m avec des diamètres de 30 à 50 m, que la forme en hyperboloïde ne correspond à aucune nécessité thermodynamique, mais résulte de considérations statiques, d'économie de matériaux et... d'esthétique. Ces tours de réfrigération ont toutefois l'inconvénient d'être la source, par temps froid, d'un panache de vapeur résultant de la condensation de l'humidité entraînée. Il convient de s'en préoccuper au moment où l'on en choisit l'emplacement.

Si donc la centrale nucléaire exige, tout comme la centrale thermique, une installation de refroidissement qui est une sujétion importante quant au choix de l'emplacement, elle n'impose par contre aucune condition relative à l'approvisionnement en combustible. Là où une centrale thermique requiert plusieurs milliers de tonnes de charbon ou d'huile par jour, la centrale nucléaire ne demande que 2 ou 3 t par semaine ou même moins, et cela d'un combustible vingt fois plus dense, ce qui ne fera que quelques dizaines de m^3 par an.

C'est donc un avantage important de la centrale nucléaire de ne poser aucun impératif local quant à l'approvisionnement en combustible ou quant au stockage de celui-ci. Nous le soulignons, car cela peut poser de sérieux problèmes dans le cas d'une centrale thermique, qu'elle utilise de l'huile lourde ou du charbon. En effet, qu'il s'agisse de l'encombrement des voies

de transport qui en résulte, de la surface exigée par le parc de stockage, par ailleurs peu esthétique, ou des risques potentiels parfois notables que celui-ci comporte, la centrale thermique a des exigences dont on doit tenir compte.

Qu'en est-il du risque de pollution des eaux ? Dire que du fait d'une centrale nucléaire cette pollution est nulle serait inexact, mais elle doit être faible et contrôlée. Elle a deux sources, la première étant l'évacuation occasionnelle d'effluents légèrement radioactifs ; cela ne peut être admis que si l'accroissement de radioactivité est insignifiant. La seconde source est le rejet de réactifs chimiques divers, notamment de ceux utilisés à la déminéralisation de l'eau utilisée à produire la vapeur. Là également, il s'agit de quantités connues, à évacuer dans des conditions déterminées et qu'il est aisé de vérifier. Cette seconde source de pollution se retrouve identiquement pour les centrales thermiques.

Examinons enfin ce qu'il en est des risques de pollution de l'air. En marche normale, une centrale nucléaire ne produit évidemment ni cendres, ni produits de combustion d'aucune sorte. A cet égard, la pollution de l'air est donc rigoureusement nulle.

Cependant, et ainsi que nous l'avons précisé antérieurement, certains locaux sont étanches de manière à conserver dans la centrale les produits radioactifs qui seraient libérés en cas d'accident (rupture de gainage de combustible, rupture de conduite du fluide caloporteur, etc.) ; en marche normale, ces locaux sont ventilés et les fuites de ces circuits sont relâchées à l'extérieur, sous contrôle, et à condition bien entendu que le taux de radioactivité reste insignifiant. Dès l'apparition de radioactivité anormale, la sortie d'air est fermée et la ventilation ne se poursuit plus qu'en circuit fermé. On ne peut donc pas non plus parler ici de pollution de l'air.

Si toutefois l'on se préoccupe des conditions atmosphériques lors du choix d'un emplacement de centrale nucléaire, c'est parce qu'il est d'usage d'étudier dans le détail les conséquences qu'aurait, cas échéant, le plus grave accident concevable, baptisé « accident hypothétique maximal ». On doit alors supposer un ensemble de circonstances accidentelles simultanées, frisant l'invraisemblable, telles qu'il en résulte la perte de contrôle du réacteur, la rupture des principaux circuits et la fusion de tout ou partie du combustible nucléaire, accompagnée de libération de produits de fission hautement radioactifs. On admet que toutes précautions doivent être prises d'avance pour être certain que l'on restera néanmoins maître de la situation, les conséquences de l'accident étant restreintes à la centrale elle-même. Dans de telles circonstances et pour pouvoir pénétrer à nouveau dans la centrale accidentée, on peut désirer relâcher sous contrôle certains gaz à l'extérieur ; après quelques jours ou semaines d'attente, la radioactivité aura d'elle-même beaucoup diminué, mais encore faut-il que le site retenu présente suffisamment souvent des conditions atmosphériques permettant de tels relâchements sans danger. C'est pourquoi l'on préfèrera des emplacements un peu ventés. Il est cependant nécessaire de ne pas surestimer cette question dont l'importance a bien diminué au cours des années et varie par ailleurs avec le type du réacteur. Ce problème n'empêche pas, par exemple, de prévoir une centrale nucléaire de 1 million de kW en pleine ville de New-York.

Il est juste de dire ici qu'on ne pose pas les mêmes exigences dans les constructions hydro-électriques ; elles auraient sans doute permis d'éviter plusieurs des plus graves accidents survenus avec de tels aménagements de production d'énergie.

Si nous avons traité de manière un peu plus complète la question de la pollution de l'air, c'est qu'on rencontre là une des différences caractéristiques entre centrales nucléaires et centrales thermiques. Si ces dernières consomment de l'huile lourde, chacun sait qu'il est difficile d'éliminer le soufre et que les anhydrides sulfureux et sulfuriques qui résultent de sa combustion sont des poisons auxquels non seulement l'homme mais surtout les plantes sont extrêmement sensibles. Si le combustible est du charbon, ce qui conduit à de l'énergie électrique généralement plus chère, il faudra en outre dominer le problème des cendres : tout d'abord en retenir le plus possible dans la centrale, puis écouler les énormes quantités ainsi récoltées. Il s'agit là de problèmes si sérieux qu'ils suffisent souvent à eux seuls à faire écarter les centrales thermiques.

Si nous récapitulons les principaux points abordés, nous constatons que la centrale nucléaire comporte de grandes constructions, souvent analogues à celles d'une centrale thermique. Comme pour cette dernière, une installation de refroidissement doit être prévue, utilisant l'eau d'une rivière ou d'un lac, éventuellement un refroidissement indirect avec tour de réfrigération.

Par contre, la centrale nucléaire n'impose pas de conditions relatives à l'approvisionnement du combustible, ni quant à son stockage. Elle n'est pas non plus exigeante du point de vue météorologique, ni gênante en ce qui concerne la pollution de l'air. On voit donc que son emplacement pourra être choisi plus librement que pour une centrale thermique. C'est un avantage également, compte tenu des difficultés sans cesse croissantes que l'on rencontre à trouver des cheminements pour les lignes à haute tension qui, partant de la centrale, doivent débiter son énergie dans la contrée avoisinante.

Aspects économiques

On ne saurait cependant marquer ainsi une préférence pour la production nucléaire de l'électricité, sans se préoccuper également de son aspect économique. Nous nous permettrons toutefois de ne traiter cette question que de manière sommaire, car elle sort peut-être un peu du cadre de l'exposé.

Du point de vue économique, le critère principal est celui de la rentabilité, c'est-à-dire en définitive celui du coût du kWh produit. Encore faut-il tenir compte de la valeur marchande de l'électricité : celle-ci est la plus élevée s'il s'agit d'une énergie disponible à la demande, par exemple aux heures de pointe de consommation, ainsi que c'est le cas pour des usines hydro-électriques à accumulation. La valeur est la plus basse si l'énergie doit être prise au gré du débit naturel d'une rivière, plus élevé en été alors que la consommation est au contraire plus faible. Mais pour des centrales thermiques ou nucléaires on cherche à produire beaucoup de kWh de manière que les charges financières annuelles, provenant du capital investi, soient réparties sur la plus grande production possible. C'est pourquoi on parle volontiers de centrales de base.

Si l'on admet des coûts à la production de 6 ou même 7 c/kWh pour de l'énergie de qualité, de l'énergie de base ne doit pas revenir à plus de 4 c/kWh, et même moins. Pour de grandes centrales, nous entendons de l'ordre de 500 MW, il est actuellement admis que la rentabilité s'améliore en passant des centrales à charbon à celles à huile lourde, puis de ces dernières à des centrales nucléaires. Selon les conditions d'intérêt, d'amortissement, de durée annuelle d'exploitation, on atteint finalement des coûts de 2,5 et même 2 c/kWh, toutes charges comprises.

Il apparaît donc ici un nouvel avantage de l'énergie nucléaire : son prix bas, s'il s'agit de grandes puissances.

Enfin, l'expérience de ces dernières années a fait ressortir la meilleure disponibilité des centrales nucléaires, qui sont d'une exploitation plus souple. Il en résulte que l'on commence à les préférer aux centrales thermiques pour le réglage de certains grands réseaux américains.

Pour des pays se trouvant dans la situation de la Suisse, c'est-à-dire devant importer de toute manière tout le combustible consommé, l'uranium présente en outre un avantage d'un autre ordre : l'investissement en devises étrangères y est, par kWh produit, de l'ordre de 0,5 c/kWh, soit deux à trois fois plus faible que pour du charbon ou de l'huile.

Quant aux investissements totaux, bornons-nous à dire qu'ils se situent aux alentours de 800 à 1000 fr/kW installé, c'est-à-dire entre la centrale thermique un peu meilleur marché, et la centrale hydraulique deux à trois fois plus chère.

Les considérations qui précèdent ont fait ressortir certaines particularités et divers avantages de la production d'énergie nucléaire. Pour apprécier l'avenir de ce mode de production, il faut avoir aussi présente à l'esprit l'extraordinaire évolution de la consommation d'énergie, cela partout dans le monde. C'est à la fois une condition et une conséquence du rapide développement économique et industriel auquel nous assistons.

Si l'on se souvient que le travail mécanique qu'un homme peut fournir en une année s'établit à un peu plus d'une centaine de kWh, et que l'Européen moyen de 1860 consommait environ 1000 kWh par an (le travail de sept à huit hommes), on appréciera le fait que le même Européen consomme 15 000 kWh aujourd'hui. Il en demandera 100 000 à 150 000 à la fin du siècle. Il est révélateur à cet égard qu'un petit pays comme la Suisse doive se préparer à mettre en chantier une grande centrale nucléaire chaque année !

Mode de collaboration avec les architectes et conclusion

On a donc passé en un quart de siècle d'une découverte de physique pure, la fission atomique, à des applications d'une puissance dépassant toutes les réalisations antérieures. Il n'existe probablement pas dans la technique d'autre exemple d'une évolution aussi importante en si peu d'années.

L'énergie nucléaire oblige donc celui qui s'y intéresse, qu'il soit physicien, ingénieur ou architecte, à réviser constamment ce qu'il croit acquis. Certes, il n'y a là rien de particulier dans un monde où les données techniques et économiques paraissent se modifier de plus en plus vite. Toutefois, l'ampleur et la rapidité des changements sont ici remarquables. Reconnaissons que si c'est souvent une épreuve, c'est aussi un puissant stimulant ! Mais que de principes que l'on pense pouvoir admettre une fois pour toutes et dont il faut changer, de solutions que l'on croit durables et qu'il faut complètement modifier à peine conçues !

Aussi bien, une technique si jeune et en si rapide évolution n'a-t-elle pas conduit à des solutions que l'on pourrait dès à présent se permettre de qualifier de « classiques ». C'est, au contraire, la diversité des réalisations qui frappe, le temps n'ayant pas encore suffisamment provoqué la nécessaire sélection des meilleures solutions. Les dispositions types sont donc beaucoup plus nombreuses que pour des centrales hydrauliques ou thermiques, et ces dispositions sont en outre généralement moins fixées. Il en résulte naturellement que la construction d'une centrale nucléaire est tout particulièrement une œuvre d'équipe, équipe comprenant comme déjà indiqué des personnes de toutes formations. Nous n'en donnerons qu'un petit exemple : le choix d'une porte séparant deux locaux de types différents va immédiatement soulever les questions du degré d'étanchéité nécessaire, éventuellement du blindage aux radiations, des surpressions possibles en cas d'accident, de l'accessibilité à autoriser et du contrôle de celle-ci, etc. Pour obtenir des réponses à ces questions, l'on devra s'adresser à tous les spécialistes de l'équipe, physiciens, chimistes, thermiciens et responsables de la sécurité ; l'architecte devra donc s'intégrer dans cette équipe faute de quoi il devrait se cantonner dans une position de simple exécutant, au détriment de la qualité finale de l'œuvre. Car la centrale sera exploitée par des hommes qui devront y vivre et travailler dans les meilleures conditions possibles, et à cet égard la contribution de l'architecte est indispensable. Elle l'est bien entendu tout autant en ce qui concerne l'esthétique et l'aménagement général. Mais là également, l'architecte ne sera écouté que s'il a fait l'effort d'assimiler au moins les données générales des problèmes, de manière que ses propositions ne soient pas incompatibles, et cela de manière évidente, avec ces données.

Si nous nous sommes permis d'insister sur la nécessité pour l'architecte également de ce travail d'équipe, c'est que l'on entend nombre d'ingénieurs se plaindre de la difficulté qu'ils rencontrent à imposer à l'architecte les impératifs de leurs techniques, comme l'on entend des architectes regretter parfois de se voir réduits à des tâches d'habillage de construction conçues en dehors d'eux. Cette question dépasse sans doute largement le cadre de l'énergie nucléaire, mais peut-être pas celui de ce séminaire. Nous sommes convaincus, expérience faite, que la séparation traditionnelle de l'architecte de ceux qu'il appelle — parfois avec une nuance de condescendance ! — les spécialistes est bien souvent une erreur. Qu'il nous soit permis de dire ici qu'à notre avis la coopération des uns et des autres doit être amorcée dès le début d'une étude et poursuivie sans imaginer qu'il existe des différences de valeur dans les apports respectifs. Ainsi sera conçue une œuvre bien intégrée et présentant un harmonieux équilibre des diverses nécessités techniques, économiques et humaines.