



Centrale nucléaire
de Leibstadt

Description technique

Photo: Ivo Stalder



Photo: Ruth Schmid

Chaque jour, la KKL produit de l'électricité pour plus d'un million de personnes.

Sommaire

La KKL: une société en partenariat	4
Notre KKL, votre électricité	5
De l'époque de la construction à aujourd'hui	6
La KKL en bref	7
Comment fonctionne la KKL	8
L'îlot nucléaire de la KKL	9
■ Système de production de vapeur	9
■ Régulation du réacteur	10
■ Arrêt automatique	11
■ Assemblages combustibles	12
■ Auxiliaires nucléaires	14
Schéma en coupe de la centrale	16/17
L'îlot conventionnel de la KKL	18
■ Circuit principal de chaleur	18
■ Groupe turbines	19
■ Alternateur	20
Systèmes de refroidissement	22
■ Système de refroidissement principal	22
■ Système de refroidissement secondaire	23
■ Système de refroidissement de secours	23
Installations électriques	24
■ Transformateurs	24
■ Besoins propres	24
■ Alimentation électrique de secours	25
■ Postes de commande de secours	25
Le combustible de la KKL	26
■ Acquisition du combustible	26
■ Consommation de combustible	26
■ Retraitement	26
Déchets	27
■ Déchets de haute activité	27
■ Déchets faiblement et moyennement actifs	27
■ Conteneurs de transport et de stockage	27
La sûreté à la KKL	28
■ Protection de l'homme, de l'environnement et de l'installation	28
■ Vivre la culture de sûreté au quotidien	29
■ Contrôle des autorités	29
Aspects environnementaux	30
■ Gaz à effet de serre	30
■ Emissions dans l'air et dans l'eau	30

Impressum

Première édition avril 2011

Kernkraftwerk Leibstadt AG, CH-5325 Leibstadt

Responsabilité générale: Barbara Bumbacher, KKL

Concept et rédaction: Ruth Schmid, KKL

Conseil technique: Ulrich Schläppi, KKL

Maquette: Markus Etterich, Bâle

Graphiques: Edith Huwiler, Zurich

Photos: Palma Fiacco, Zurich; Karin Gfeller, KKL;

Peter Graf, KKL; Daniel Schläfli, Kleindöttingen;

Ruth Schmid, KKL; Ivo Stalder, KKL

Impression: Offsetdruck Kramer, Leibstadt



La KKL: une société en partenariat

Située sur la rive suisse du Haut-Rhin, entre Koblenz et Laufenburg et non loin du confluent de l'Aar, la centrale nucléaire de Leibstadt est entrée en service le 15 décembre 1984. D'une puissance de 1245 MW, la cinquième centrale nucléaire de Suisse après Beznau I, Beznau II, Mühleberg et Gösgen, est à la fois la plus jeune et la plus performante du parc nucléaire du pays. Depuis 1984, elle produit avec fiabilité près du sixième de l'électricité consommée en Suisse, soit quelque 29 millions de kilowattheures par jour.

La Kernkraftwerk Leibstadt AG (KKL) est une société anonyme. Au total, sept entreprises de production électrique détiennent des participations plus ou moins importantes dans la centrale nucléaire. Ce sont les sociétés AEW Energie SA, Alpiq SA, Alpiq Suisse SA, Axpo SA, BKW FMB Energie SA, Forces Motrices de Suisse centrale SA (CKW) et Electricité de Laufenbourg SA (EGL). Avec 52,7 % des parts, Axpo Holding SA est majoritaire. La direction de la KKL est assurée par Axpo SA.

La KKL emploie quelque 500 collaborateurs originaires de Suisse et des pays étrangers limitrophes. Plus de 20 % de ses effectifs viennent d'Allemagne. Pour toute la région environnante, la centrale est un lieu de travail et de formation sûr et attractif qui offre des emplois à long terme. Au-delà, l'entreprise représente un partenaire important et une valeur économique solide pour d'innombrables fournisseurs et prestataires de services.

La KKL aimerait continuer de produire de l'électricité de manière sûre, fiable et économique pour le compte et suivant les indications de ses propriétaires, et ce au moins jusqu'en 2045. Protéger l'homme et l'environnement des dangers de la radioactivité et des risques classiques sera toujours son objectif suprême.

La centrale se reflète dans la paroi vitrée du centre d'information.

Notre KKL, votre électricité

De l'électricité pour un million de personnes

L'énergie hydraulique et l'énergie nucléaire sont les piliers de la production électrique de la Suisse. Les cinq centrales nucléaires suisses couvrent environ 40 % des besoins en électricité du pays. La centrale de Leibstadt apporte une contribution considérable à cette importante mission: l'approvisionnement des consommateurs d'électricité. Depuis 1984, elle produit plus de neuf milliards de mégawatt-heures par an, ce qui représente un peu plus de 15 % des besoins en électricité de la Suisse. Et ce, sans relâche, 24 heures sur 24.

La sûreté d'abord

Les systèmes de sûreté redondants, la culture de sûreté élevée ainsi que la compétence professionnelle et sociale du personnel garantissent que la KKL fonctionne avec la fiabilité suisse. Grâce à des améliorations continues dans tous les domaines, la centrale de Leibstadt peut se mesurer aux meilleures du monde. Les procédures de partage des tâches entre homme et machine sont vérifiées régulièrement, les processus optimisés sans cesse. Le réacteur s'arrête automatiquement au moindre franchissement de certaines valeurs limites pendant l'exploitation.

La KKL elle-même, la Confédération et les autorités compétentes garantissent ensemble que les exigences légales en matière de protection de l'homme et de l'environnement sont respectées à tout moment. La sûreté passe toujours avant la rentabilité.

Avantage économique

La KKL est une fabrique d'électricité. Le courant produit est cédé à prix coûtant aux actionnaires qui sont pour la plupart des entreprises en possession des pouvoirs publics. Les cantons et les communes, les entreprises de distribution électrique et les consommateurs particuliers profitent ainsi du prix de revient attractif de l'électricité de la KKL. Depuis des années, celui-ci est de l'ordre de cinq centimes par kilowattheure et se situe donc à un niveau très bas dans la comparaison internationale. Il comprend aussi les coûts de démantèlement du réacteur et d'élimination des déchets (1 ct/kWh). La part relativement faible des coûts de combustible, soit cinq à dix pour cent, garantit que le prix de l'électricité restera bas et stable à long terme. Tout le monde en profite, des PME à la grande industrie, et cela aide le pays à maintenir sa compétitivité malgré des coûts d'infrastructure et des coûts salariaux élevés.

Photo: Ruth Schmid



La tour est surmontée d'un panache constitué de vapeur d'eau pure.

En faveur du climat

Le panache qui s'échappe de la tour de refroidissement de la KKL est seulement constitué de vapeur d'eau. La centrale elle-même ne rejette ni CO₂ ni autres gaz à effet de serre ou polluants atmosphériques. La KKL est aussi respectueuse de l'environnement et du climat pour d'autres raisons: du gisement d'uranium à l'enfouissement géologique en profondeur, toutes les opérations ayant lieu en amont et en aval de la production ne génèrent que de très faibles émissions.

Une garantie d'indépendance

Les centrales nucléaires et hydrauliques locales garantissent que la Suisse reste largement indépendante de l'étranger pour son approvisionnement électrique. L'uranium utilisé comme combustible nucléaire est exploité dans de nombreux pays du monde et a une très forte densité énergétique. Il suffit donc d'en importer des quantités relativement faibles qu'il est facile de mettre en réserve. La KKL peut prévoir son approvisionnement à long terme et de manière sûre.

Ancrage local solide

Lors de la construction de la centrale nucléaire, il a été convenu par contrat que la KKL AG fournirait à la commune de Leibstadt une partie du courant nécessaire à la couverture de ses besoins annuels. Comme la centrale n'a pas vocation à distribuer l'électricité, elle dédommage la commune en lui remettant chaque année la contre-valeur d'un tiers de sa consommation électrique. En outre, la KKL AG verse une contribution annuelle à la «Stiftung Pro Leibstadt», une fondation qui soutient des projets culturels et d'utilité publique dans la commune de Leibstadt. Le centre d'information de la KKL joue aussi un rôle dans la vie sociale de la région en tant que lieu de rencontre et d'échange.

De l'époque de la construction à nos jours

La société «Kernkraftwerk Leibstadt AG» (KKL) a été créée le 26 novembre 1973 et le contrat de partenariat signé initialement par 14 entreprises. A la mise en service de la centrale, à la fin 1984, une vingtaine d'années de travaux d'étude et de construction s'étaient déjà écoulées. Avant la réalisation, le site sur la commune de Leibstadt avait longuement été examiné afin de déterminer son aptitude à l'implantation d'une centrale. Entre autres, il avait fallu prendre en compte la nature du sol, l'évacuation de l'énergie vers le réseau, l'accessibilité aux convois de fort tonnage ainsi que bien d'autres facteurs. La situation au bord du Rhin, qui garantit en permanence une alimentation suffisante en eau de refroidissement était particulièrement intéressante. Un autre argument en faveur du site de Leibstadt était la faible activité sismique qui, par exemple, est bien plus réduite dans la partie septentrionale du plateau suisse que dans l'espace alpin au sens étroit du terme. C'était là un aspect important en termes de sûreté de l'installation, même si la centrale était conçue pour résister à de très forts séismes. Les exigences élevées en matière de protection de l'environnement ont également été prises en considération. Etant donné qu'en 1971, à l'époque de la phase de projet, la Confédération interdisait le refroidissement direct par eau de rivière, il a fallu modifier le système en optant pour une tour de refroidissement.

De nombreux retards étant intervenus pendant l'étude du projet, il a finalement été possible d'augmenter la puissance prévue à l'origine – 960 MW à la mise en exploitation au lieu de 600 MW initialement – et de faire bénéficier la centrale des derniers progrès technologiques. Le coût total de la construction s'est élevé à 4,8 milliards de francs, un investissement d'un montant certes élevé, mais sûr et intéressant à long terme, et qui



Photo: Archives KKL

La construction de la KKL a duré une dizaine d'années.

en vaut la peine sachant que la durée de vie prévisionnelle de la centrale est de 60 ans.

De 1998 à 2003, le fonctionnement de la centrale a continué d'être optimisé pas à pas. La puissance nette est ainsi passée à 1165 MW. Le remplacement de composants lourds comme les turbines basse pression et les transformateurs a également eu lieu dans le cadre des opérations continues de renouvellement et de modernisation. Des améliorations ciblées du rendement ont permis d'accroître la puissance nette qui a atteint 1245 MW en 2010. Pour toutes les optimisations, de vastes rapports démontrant la sûreté des installations ont été soumis à l'autorité de surveillance compétente, à savoir l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN).

Depuis la mise en exploitation, la KKL a déjà investi près de 700 millions de francs dans la sûreté et l'efficacité des installations. La centrale demeure ainsi à la pointe de la technologie.



Photo: Palma Fiacco

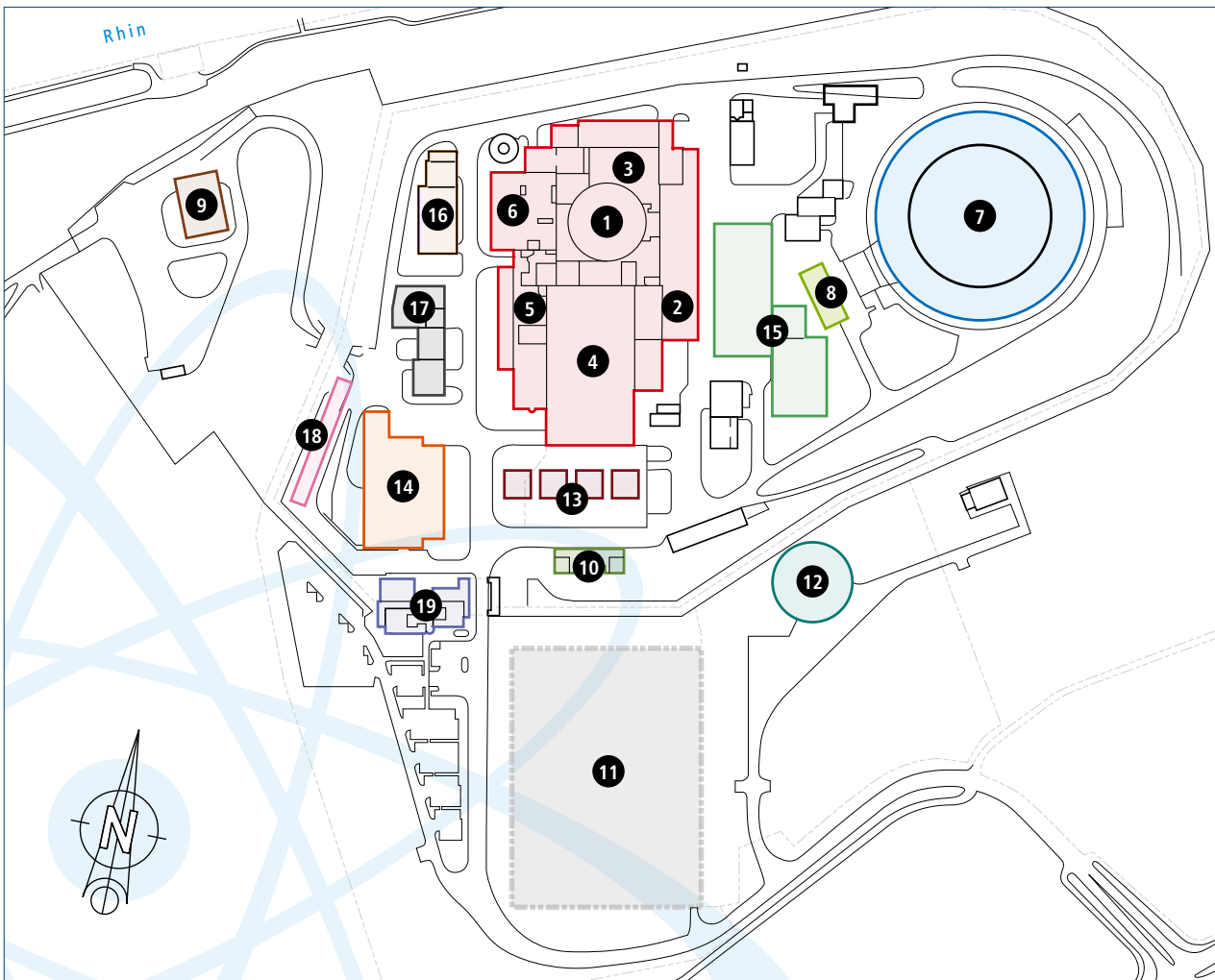
Grâce à des travaux constants d'entretien et de renouvellement, la KKL est à la pointe de la technologie.

La KKL en bref

La KKL est située sur le territoire de la commune de Leibstadt, sur la rive suisse du haut Rhin, non loin du confluent de l'Aar près de Koblenz (Suisse) et Waldshut (Allemagne). L'ensemble du site de la centrale, parkings compris, occupe aujourd'hui 24 hectares de terrain. Compte tenu du fait que la KKL couvre une part considérable (15 %) des besoins de la Suisse en électricité, cette superficie est très faible par rapport à d'autres systèmes de production électrique.

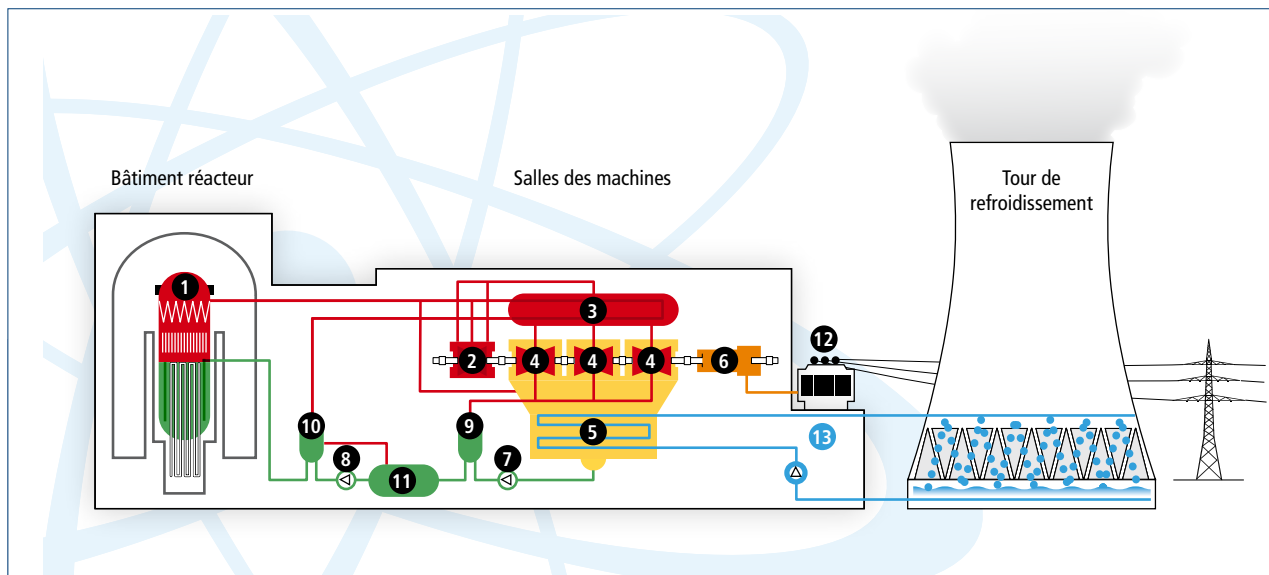
Tous les composants sont réunis dans un périmètre de 12 hectares qui est entouré d'une clôture et surveillé. Les bâtiments les plus importants sont sur fond rouge. Il s'agit du bâtiment de stockage du combustible, du bâtiment réacteur et de la salle des machines. A l'ouest de ceux-ci se

trouvent les bâtiments auxiliaires: bureaux, ateliers et entrepôts, bâtiment d'exploitation ainsi que le bâtiment de traitement des effluents où les déchets d'exploitation sont conditionnés et placés dans des fûts. A l'est, on trouve pour l'essentiel d'autres halles de stockage, l'installation principale de refroidissement avec la salle des pompes et la tour de refroidissement. Pour que ces éléments de la centrale ne soient pas trop dominants visuellement, leur niveau a été abaissé de huit mètres – et même de 15 mètres pour la tour de 144 mètres de haut – au-dessous de celui du terrain. Les composants majeurs de l'installation ont une construction extrêmement robuste, certains sont situés en souterrain. Ils offrent une sûreté maximale pour l'installation et l'environnement.



- | | | |
|---------------------------------------|--|------------------------------|
| 1 Bâtiment réacteur | 8 Salle des pompes (refroidissement principal) | 15 Halles de stockage |
| 2 Atelier | 9 Refroidissement secondaire | 16 Stockage des fûts |
| 3 Bâtiment de stockage du combustible | 10 Poste électrique 50 kV | 17 Bâtiment mock-up |
| 4 Salle des machines | 11 Poste d'évacuation d'énergie 380 kV | 18 Bâtiment d'infrastructure |
| 5 Bâtiment d'exploitation | 12 Centre d'information et de formation | 19 Bâtiment d'accès |
| 6 Bâtiment de conditionnement | 13 Transformateurs | |
| 7 Tour de refroidissement | 14 Atelier, entrepôt | |

Vue d'ensemble de la centrale.



- 1 Réacteur
- 2 Turbine haute pression
- 3 Séparateur-surchauffeur
- 4 Turbine basse pression
- 5 Condenseur
- 6 Alternateur
- 7 Pompe d'extraction des condensats
- 8 Pompe alimentaire
- 9 Réchauffeur basse pression
- 10 Réchauffeur haute pression
- 11 Bâche d'eau alimentaire
- 12 Transformateur
- 13 Circuit de refroidissement principal
- ⊙ Pompes

Dans un réacteur à eau bouillante, la vapeur produite dans le réacteur est amenée directement sur les turbines, puis transformée en eau dans un condenseur. L'eau est ensuite renvoyée dans le réacteur par des pompes. Ce circuit primaire eau-vapeur fermé est totalement séparé du circuit de refroidissement du condenseur provenant de la tour de refroidissement.

Comment fonctionne la KKL

La centrale nucléaire de Leibstadt utilise une technologie qui a fait ses preuves depuis des décennies, celle des réacteurs à eau légère. La plupart des quelque 440 centrales nucléaires en service dans le monde exploitent l'une des deux filières issues de cette technologie : les réacteurs à eau bouillante et les réacteurs à eau pressurisée. Le terme d'eau légère indique que de l'eau ordinaire (H_2O) est utilisée dans le réacteur comme fluide caloporteur et modérateur, par opposition à l'eau lourde (D_2O) qui assure plus rarement cette fonction dans d'autres types de réacteur. La KKL possède un réacteur à eau bouillante.

La fission des noyaux des atomes d'uranium libère de la chaleur dans le réacteur. L'eau contenue dans celui-ci s'échauffe et se vaporise. La vapeur formée est amenée par quatre conduites vers une turbine haute pression, puis vers trois turbines basse pression. Elle actionne les turbines qui, à leur tour, entraînent un alternateur auquel elles sont réunies par un accouplement rigide. Ainsi est-il possible de transformer l'énergie thermique en

énergie mécanique puis, dans l'alternateur, en énergie électrique qui est injectée dans le réseau haute tension via des transformateurs. A la sortie des turbines, la vapeur est refroidie dans un condenseur. L'eau condensée est renvoyée dans le réacteur à l'aide de pompes. Elle circule dans un circuit dit primaire qui est complètement fermé. Le refroidissement du condenseur est assuré par de l'eau provenant de la tour de refroidissement.

La centrale nucléaire est pilotée depuis la salle de commande 24 heures sur 24 par des opérateurs formés pendant de longues années à ce métier. Ils « pilotent » le réacteur, les turbines et l'alternateur et vérifient régulièrement le bon fonctionnement de tous les systèmes et composants de l'installation. Les opérateurs sont contrôlés par l'IFSN et doivent renouveler leur licence tous les deux ans. Pour cela, ils s'entraînent sur le simulateur de la centrale aux situations d'exploitation normale ainsi qu'aux scénarios d'incidents possibles pendant un nombre d'heures déterminé.

L'îlot nucléaire de la KKL

■ Le système de production de vapeur

Le réacteur est le cœur de toute centrale nucléaire. A Leibstadt, c'est un réacteur à eau bouillante de type BWR-6 du groupe américain General Electric qui sert à produire de la vapeur. La présence de pompes de recirculation est caractéristique de ce mode de construction. Le réacteur a des dimensions relativement réduites par rapport à l'ensemble de l'installation. La cuve qui l'entoure mesure six mètres de diamètre et 22 mètres de haut. Réalisée en acier de 15 cm d'épaisseur, elle renferme les assemblages combustibles, le séparateur d'eau, le sécheur de vapeur et les barres de contrôle.

Le cœur du réacteur est constitué de 648 assemblages composés de 96 crayons combustibles regroupés 10 par 10. Les crayons combustibles sont remplis de pastilles d'oxyde d'uranium enrichi. La conception du cœur permet d'obtenir une puissance thermique de 3600 MW avec une densité de puissance moyenne de $62,7 \text{ kW/dm}^3$.

La cuve du réacteur en fonctionnement se trouve à une pression de 73,1 bar. Le point d'ébullition de l'eau est alors de 286° C . En traversant le cœur brûlant du réacteur, l'eau absorbe de la chaleur qui se transforme en vapeur. Ce mélange de vapeur humide qui s'élève en sortie du réacteur passe dans un séparateur. L'eau extraite dans celui-ci est renvoyée dans le circuit de recirculation qui se trouve entre la cuve et le cœur du réacteur,

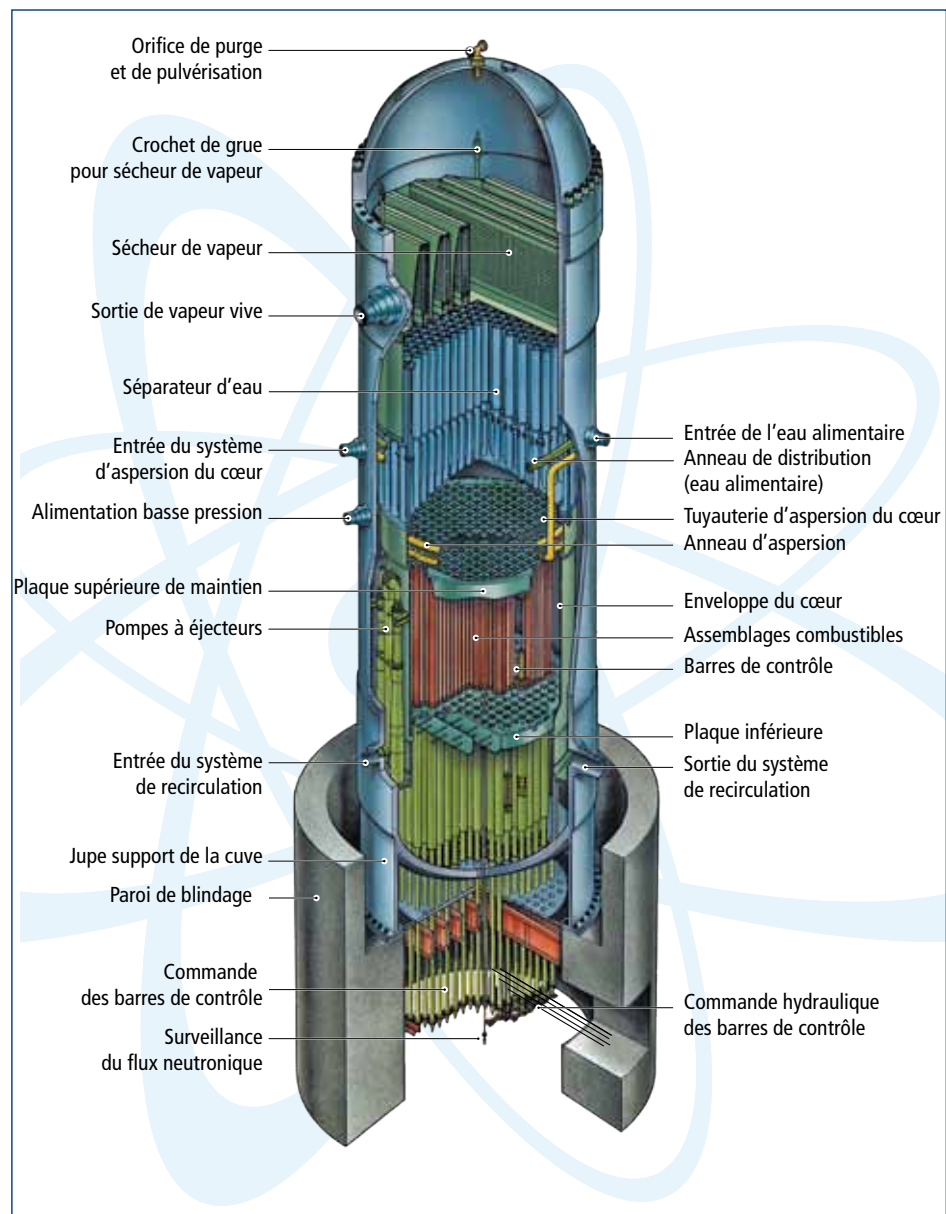




Photo: Daniel Schläfli

Pendant les travaux de révision, le crocodile gonflable rend bien visible la surface de l'eau transparente du réacteur – une mesure de sécurité simple et efficace.

puis elle est pompée à nouveau dans le cœur. De son côté, la vapeur sortant du séparateur est séchée dans le sécheur de vapeur et amenée sur les turbines par des conduites. Comme cette vapeur est légèrement radioactive, la zone des turbines n'est pas accessible pendant le fonctionnement du réacteur. Le rayonnement disparaît toutefois au bout de quelques minutes après l'arrêt du réacteur.

La fission nucléaire, source de chaleur

La fission des noyaux atomiques produit de l'énergie dans le réacteur. Lorsqu'un neutron heurte le noyau d'un atome d'uranium 235, celui-ci se scinde en deux noyaux (et plus) plus légers en libérant de la chaleur et de la radioactivité. La fission du noyau libère aussi deux à trois neutrons qui peuvent provoquer à leur tour de nouvelles fissions. Lorsque chaque fission est suivie d'une nouvelle, on parle de réaction en chaîne auto-entretenue. L'eau contenue dans le réacteur assure aussi la fonction de modérateur, c'est-à-dire qu'elle freine les neutrons rapides libérés lors de la fission en ramenant leur vitesse de 20 000 km/s (tour de la terre en 2 s!) à 3 km/s. Seuls des neutrons ralentis («neutrons thermiques») peuvent provoquer efficacement des nouvelles fissions.

■ Régulation du réacteur

La puissance du réacteur peut être régulée en modifiant la quantité d'eau recirculée ainsi qu'en montant et descendant les 149 barres de contrôle. Ces barres mobiles à commande hydraulique sont introduites dans le cœur du réacteur par le bas et peuvent être déplacées individuellement ou par groupes suivant un programme de pilotage. Le carbure de bore contenu dans les barres de contrôle capture les neutrons thermiques. Plus les barres sont enfoncées dans le cœur du réacteur, plus il y a de neutrons absorbés et moins il se produit de fissions. La puissance diminue en conséquence. Si, par contre, on extrait les barres de contrôle du cœur du réacteur, les neutrons sont plus nombreux à provoquer des fissions et la puissance augmente.

Les deux pompes externes de recirculation renvoient l'eau à l'intérieur du cœur du réacteur au moyen de 20 pompes à éjecteur (jet pump). Jusqu'à 11 m³ d'eau par seconde sont ainsi recirculés. Si le débit de recirculation est élevé, il se forme moins de bulles de vapeur et celles-ci sont en outre éliminées plus rapidement du cœur. Il en résulte que la modération des neutrons et la puissance augmentent. À l'inverse, la puissance diminue lorsque le débit de recirculation est réduit. La quantité de bulles augmente dans lesquelles aucune modération n'est possible, puisque la vapeur ne freine pas les neutrons.

Un régulateur de pression électronique à trois canaux influe sur la position des vannes d'entrée des turbines et assure une pression constante dans le réacteur. Si, au démarrage de la turbine ou à l'arrêt de l'installation, le

Afin de prévenir la formation de fissures par corrosion dans la cure du réacteur, depuis 2008, on injecte de l'hydrogène mélangé avec du platine, un métal précieux qui joue le rôle de catalyseur. Cela aide à prolonger la durée de vie de la cuve, un peu à la manière d'un vaccin, et permet un fonctionnement sûr de l'ensemble de l'installation pendant au moins 60 ans.

réacteur vient à produire davantage de vapeur que la turbine ne peut en absorber, un système de bipasse régule la pression du réacteur: il réduit l'arrivée de vapeur vive sur la turbine en la dirigeant vers le condenseur.

Ce bipasse dimensionné pour laisser passer 70 % de la quantité normale de vapeur vive est à même d'absorber 110 % pendant une courte durée. Si besoin est, la turbine peut ainsi être déchargée instantanément sans qu'il y ait d'arrêt automatique du réacteur (par exemple en cas de panne de secteur). Comme le réacteur reste en fonctionnement, il est ensuite possible de remettre rapidement l'installation en service.

■ Arrêt automatique

Un système automatique de mise à l'arrêt rapide du réacteur protège l'installation en cas de sollicitations excessives. Il réduit l'impact des incidents d'exploitation de manière à ce qu'il n'y ait pas de danger et aide à prévenir l'endommagement de certains composants, par exemple des gaines de combustible. D'innombrables dispositifs surveillent l'installation: dès que les seuils fixés sont atteints, le système déclenche un arrêt d'urgence de manière entièrement automatique (scram). Pour cela, les barres de contrôle sont insérées dans le cœur du réacteur en deux secondes, ce qui interrompt immédiatement la fission nucléaire. Chacun des mécanismes de commande des barres possède à cet effet un accumulateur d'azote comme réserve d'énergie. Après le scram, les turbines sont mises à l'arrêt et l'alternateur est séparé du réseau. Le réacteur continue d'être refroidi et la chaleur résiduelle dégagée par la désintégration des produits de fission dans les crayons combustibles est évacuée. Le réacteur est donc maintenu dans un état sûr.

Un coup d'œil dans le réacteur ouvert révèle les assemblages combustibles neufs que l'on reconnaît à leur brillance.

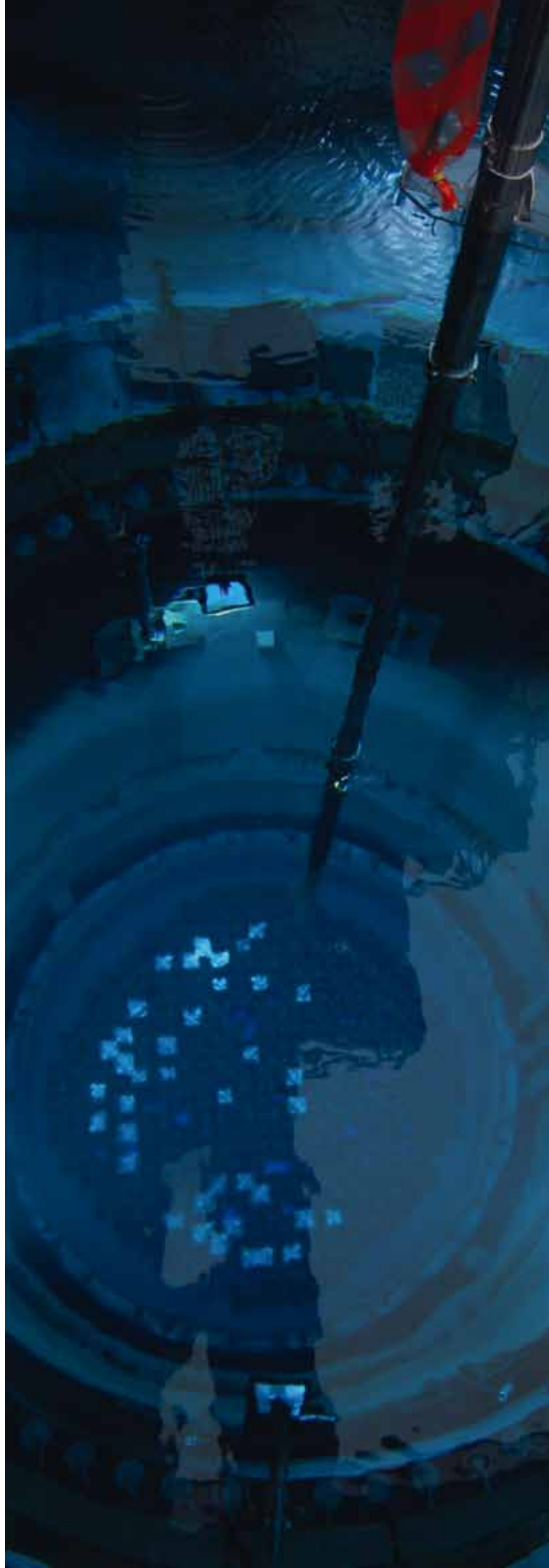




Photo: Palma Fiacco

Pendant la révision annuelle, le couvercle de la cuve du réacteur est soulevé à l'aide d'une grue spéciale.

Le système de protection du réacteur comprend une alimentation électrique propre, des convertisseurs de mesure et la logique de déclenchement de l'insertion rapide des barres de contrôle. Quatre canaux de déclenchement indépendants les uns des autres garantissent que le réacteur peut toujours être mis à l'arrêt de manière sûre, même en cas de panne de courant. Un scram (arrêt d'urgence) peut aussi être déclenché manuellement.

■ Assemblages combustibles

Le combustible utilisé dans le réacteur se présente sous forme de dioxyde d'uranium (UO_2). Il est comprimé dans des pastilles, cuit au four et introduit dans des gaines minces en Zirkaloy, un alliage du zirconium qui a une forme très stable, même à haute température et permet un flux neutronique élevé. Une centaine de crayons combustibles liés en faisceau constitue un assemblage. Le cœur du réacteur contient au total 648 assemblages combustibles dont chacun à 4,5 m de long et pèse 300 kg.

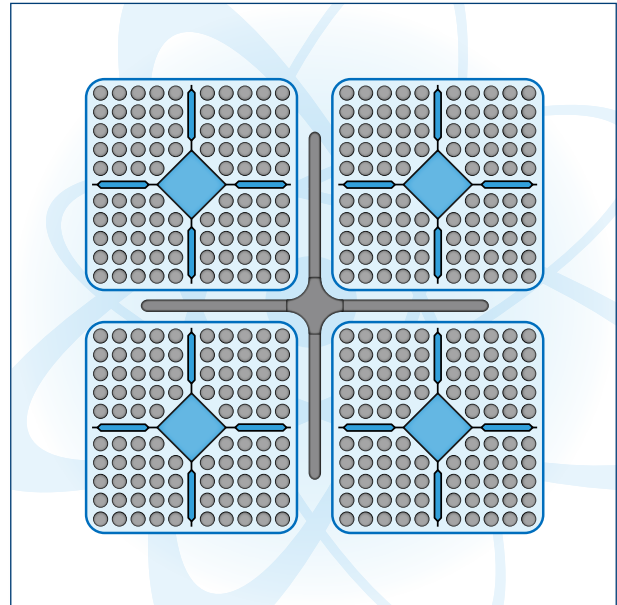
Les assemblages combustibles neufs provenant de l'usine de fabrication sont livrés à la KKL dans des caisses de transport conventionnelles.

Comme les assemblages combustibles n'émettent aucun rayonnement avant d'être utilisés dans le réacteur, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à des mesures de radioprotection particulières. Une fois à la KKL, les assemblages sont examinés pour déceler les éventuels dommages survenus pendant le transport.

Le renouvellement des assemblages a lieu chaque année en été, au moment où la demande d'électricité est la plus faible. Le réacteur est alors mis à l'arrêt. Dans le cadre de la révision annuelle d'une durée de trois à cinq semaines, près du cinquième des 648 assemblages combustibles est remplacé par des assemblages neufs.

Les autres sont déplacés de manière à assurer un taux de combustion régulier et optimal. Simultanément, de nombreux travaux de maintenance, d'inspection et de renouvellement sont réalisés dans l'ensemble de l'installation.

Avant de renouveler les assemblages combustibles, on démonte le couvercle de la cuve du réacteur. Le sécheur de vapeur et le séparateur d'eau sont démontés et entreposés sous eau. Les assemblages usés sont ensuite extraits du réacteur par un bras télescopique et transférés, toujours sous eau, dans la piscine d'entreposage du combustible usé où ils restent pendant plusieurs années. Une fois que leur radioactivité et la chaleur résiduelle ont suffisamment décru, ils sont transportés dans des conteneurs spéciaux au dépôt intermédiaire tout proche de Würenlingen. Jusqu'au moratoire de dix ans entré en vigueur à la mi-2006, ils étaient aussi transportés vers une usine de retraitement.



Chacune des barres de contrôle est insérée entre quatre assemblages combustibles. Sur la coupe transversale, on peut voir dans l'assemblage les canaux d'eau en forme de losange. Dans le cœur du réacteur, l'eau circule aussi entre les assemblages et les crayons combustibles.



Photo: Daniel Schläfli

Un bras de déchargement permet de déplacer les assemblages dans la piscine de stockage.



■ Auxiliaires nucléaires

L'îlot nucléaire de l'installation est complété par différents dispositifs auxiliaires. Le bâtiment des auxiliaires nucléaires abrite tous les équipements nécessaires pour assurer le maintien du refroidissement lorsque le réacteur est à l'arrêt. Trois postes de commande de secours indépendants les uns des autres en font aussi partie.

Dans le bâtiment de stockage des assemblages combustibles se trouve la piscine de désactivation où est entreposé le combustible usé. Un système spécial assure le refroidissement et la purification de l'eau de la piscine. Les barres de contrôle usées se trouvent dans la même piscine. Après décroissance de la radioactivité, elles sont démantelées mécaniquement sous protection d'eau, emballées dans un conteneur de stockage définitif puis, comme les assemblages combustibles, transportées au dépôt intermédiaire de Würenlingen.

Un système spécial de manutention des assemblages relie la piscine de désactivation à l'enceinte de confinement. C'est à l'aide d'un tube de transfert que les assemblages sont amenés du cœur du réacteur à la piscine et que les assemblages neufs sont transportés dans le réacteur.

Le bâtiment de conditionnement abrite l'installation de traitement et de conditionnement des effluents radioactifs solides et liquides. C'est là que sont traités et stockés dans des fûts les déchets faiblement et moyennement actifs issus de l'exploitation en vue de leur élimination de façon appropriée. Une installation de compactage ainsi que de conditionnement et de traitement des effluents est à disposition à cet effet. Ces effluents liquides à faible taux de matières en suspension sont filtrés afin de pouvoir être réutilisés dans l'installation après contrôle en laboratoire. C'est aussi dans le bâtiment de conditionnement que se trouvent le vestiaire et le contrôle d'accès à la zone du réacteur ainsi que les systèmes d'amenée et d'extraction d'air de l'ensemble de la zone contrôlée.

Le matériel de travail, les appareils et les composants de petite taille sont débarrassés des particules radioactives dans l'installation de décontamination de manière à ce que la dose individuelle de radiations reçue pendant les travaux de maintenance reste faible et que le matériel puisse être amené si nécessaire hors de la zone contrôlée. Un atelier actif sert à l'entretien ou à la réparation des pièces faiblement radioactives. Un bâtiment spécial (mock-up) est à disposition du personnel, leur permet-

L'une des trois pompes du circuit d'eau alimentaire, dont deux refoulent respectivement 50 % d'eau vers le réacteur.

tant de s'entraîner aux interventions sur les composants de l'installation. La durée de présence dans la zone dite contrôlée et par conséquent l'irradiation, peuvent ainsi être minimisées pendant le temps de travail effectif.

Une installation de dessalement permet d'obtenir de l'eau déminéralisée («déionisée») d'une extrême pureté pour le circuit d'eau d'appoint du réacteur et des turbines ainsi que de leurs systèmes auxiliaires, mais aussi pour la laverie de la centrale. L'installation de purification de l'eau du réacteur filtre et déminéralise en permanence l'eau extrêmement pure du circuit primaire, éliminant ainsi les particules d'usure et les produits de corrosion actifs qui risqueraient de se déposer sur les assemblages combustibles – comme le tartre dans une bouilloire – et diminueraient le transfert de chaleur à l'eau.

La centrale nucléaire possède aussi une laverie spécialisée. Pendant le fonctionnement normal, celle-ci traite chaque jour quelque 200 kg de chaussures et vêtements de protection du personnel travaillant dans la zone contrôlée. Pendant la révision annuelle, cette quantité peut atteindre 2,7 t. Le changement de vêtements permet d'assurer qu'aucune substance radioactive n'est véhiculée hors de la zone contrôlée. L'eau de lavage est purifiée et contrôlée en laboratoire avant que son rejet dans le Rhin ne soit autorisé. Les résidus contaminés sont éliminés de façon appropriée avec les déchets faiblement radioactifs.

Les travaux de couture sur les combinaisons sont effectués à l'intérieur de l'entreprise.



Photo: Palma Fiacco



Photo: Ivo Stalder

Le port d'un équipement de protection est obligatoire pour nettoyer les objets contaminés par la radioactivité.



Photo: Palma Fiacco

Le lavage des vêtements portés dans la zone contrôlée nécessite des machines à laver performantes.





mande

Alternateur

Transformateurs

Poste
d'évacuation d'énergie

L'îlot conventionnel

■ Le circuit principal de transmission de chaleur

La vapeur vive sort du réacteur à la température de 286 °C. Elle est amenée sur la turbine haute pression par quatre conduites débitant près de 2000 kg de vapeur par seconde. En amont de la turbine se trouvent de part et d'autre deux soupapes de sûreté et vannes d'arrêt combinées.

La vapeur arrive avec une pression de 64 bar sur la turbine où elle est détendue à 11,6 bar et refroidie à 186 °C. Elle traverse ensuite les deux séparateurs-surchauffeurs où elle est séchée et chauffée à nouveau pour être portée à la température de 263 °C, opération pour laquelle on utilise 8,5 % de la vapeur provenant du réacteur. La vapeur surchauffée est alors dirigée vers les trois turbines basse pression où elle se détend jusqu'à 0,1 à 0,2 bar avant d'être condensée dans le condenseur. L'eau récupérée dans les séparateurs, et celle provenant des surchauffeurs, sont réinjectées dans le circuit d'eau alimentaire afin de récupérer la chaleur résiduelle.

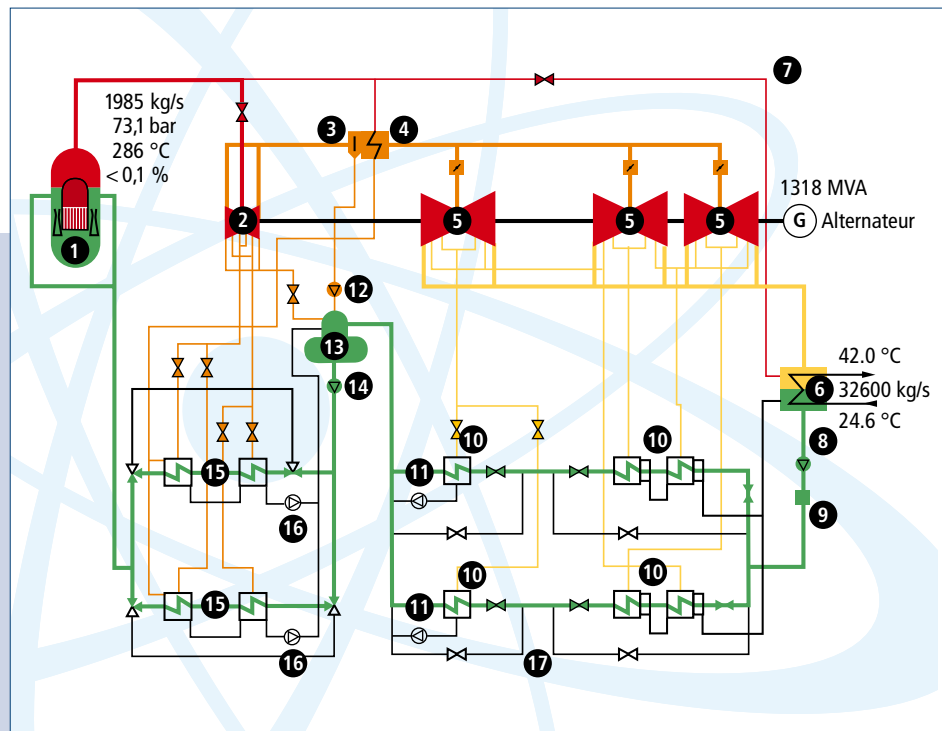
Le condenseur partiel à faisceau tubulaire est placé perpendiculairement à l'axe de la turbine. Il est parcouru par l'eau du circuit de refroidissement principal et possède quatre compartiments d'eau séparés les uns des

autres. Ce mode de conception permet de localiser des fuites éventuelles, d'isoler la partie correspondante du condenseur et de continuer d'actionner les turbines à puissance réduite.

La pression de 0,1 à 0,2 bar qui règne dans le condenseur est inférieure de 0,8 à 0,9 bar à la pression ambiante, ce qui améliore le rendement de l'installation. De plus, aucune radioactivité provenant de la vapeur du circuit primaire ne peut contaminer l'eau de refroidissement s'il se produit une fuite au niveau du condenseur.

Deux pompes principales d'extraction des condensats – une troisième est disponible à titre de réserve – entraînent les condensats dans une installation de purification où sont éliminées les impuretés telles que chlorures et résidus de corrosion afin de donner à l'eau la pureté élevée nécessaire. Le condensat est ensuite pompé dans la bûche d'eau alimentaire au travers de deux réchauffeurs basse pression. Ces appareils à trois étages travaillent avec la vapeur chaude provenant de la turbine basse pression. Le condensat à température élevée formé dans les deux premiers étages de préchauffage est ramené dans le condenseur tandis que

- 1 Réacteur à eau bouillante
- 2 Turbine haute pression
- 3 Séparateur d'eau
- 4 Surchauffeur
- 5 Turbine basse pression
- 6 Condenseur
- 7 Tuyauterie de dérivation (turbines)
- 8 Pompes à condensats
- 9 Purification des condensats
- 10 Réchauffeurs basse pression 1-3
- 11 Pompe réchauffeurs basse pression
- 12 Pompe séparateur d'eau
- 13 Bûche alimentaire
- 14 Pompe alimentaire
- 15 Réchauffeurs haute pression 5+6
- 16 Pompe réchauffeurs haute pression
- 17 Tuyauterie de dérivation (réchauffeurs)



Le schéma illustrant les échanges de chaleur montre que la vapeur vive passe dans le condenseur et revient dans le réacteur. De la vapeur est soutirée au niveau de la turbine pour réchauffer l'eau alimentaire.

celui provenant du troisième étage est pompé dans la bache d'eau alimentaire.

Celui-ci, qui sert de réchauffeur-mélangeur, est chauffé par de la vapeur d'échappement à haute pression ainsi que par la chaleur résiduelle des condensats issus des séparateurs d'eau et des réchauffeurs haute pression. L'eau alimentaire est ensuite renvoyée dans la cuve du réacteur par des pompes au travers de deux réchauffeurs haute pression. La vapeur chaude qui alimente ces réchauffeurs à deux étages provient de la turbine haute pression. Le condensat ainsi obtenu est amené dans la bache d'eau alimentaire. En exploitation normale, deux pompes d'alimentation fonctionnent avec un débit de 50 % chacune, tandis que la troisième reste en réserve.

Les gaz non condensables qui se forment pendant le fonctionnement du réacteur s'accumulent dans le condenseur puis sont amenés dans l'installation de purification des effluents gazeux par des pompes à éjecteurs.

Groupe de turbines

Le groupe de turbines comprend une turbine haute pression et trois turbines basse pression fournies par la société française Alstom. La turbine haute pression génère 40 % de la puissance totale de la KKL, les trois turbines basse pression produisent ensemble les 60 % restants.

Le groupe de turbines est à double flux. La partie haute pression possède neuf étages, chacune des turbines basse pression en a six. Le palier axial entre la turbine haute pression et la première turbine basse pression fixe l'arbre de turbine de 33 m de long horizontalement. Entre les carters des différents rotors basse pression se trouve un palier radial sur lequel tourne l'arbre. Au total, sept paliers radiaux soutiennent l'arbre qui a une longueur de 52 m dans son ensemble, rotor de l'alternateur compris.

Le rotor de turbine se dilate au maximum de 38 mm sous l'action de la chaleur. De la vapeur inactive provenant d'échangeurs de chaleur séparés assure l'étanchéité du rotor vis-à-vis de la carcasse des turbines. Ce système empêche que de la vapeur radioactive puisse s'échapper dans la salle des machines au niveau des joints d'étanchéité des rotors ou d'admission des vannes.

De la vapeur est soutirée en différents points de la carcasse des turbines pour le chauffage des réchauffeurs

La turbine doit satisfaire aux exigences les plus strictes en termes de précision et de qualité.



de l'eau alimentaire. Un système de bipasse permet d'amener directement du réacteur au condenseur pendant une courte durée l'ensemble de la vapeur formée.

Alternateur

L'alternateur bipolaire est accouplé de manière rigide à la partie basse pression de la turbine. La puissance mécanique des turbines de la KKL est gigantesque (1,7 million de chevaux). Elle est transmise par l'arbre de turbine à l'arbre de l'alternateur qui tourne à une vitesse de 50 tours par seconde. Dans la carcasse de quatre mètres de haut et dix mètres de long de l'alternateur se cache un stator de huit mètres de long pesant 520 t, ce à quoi

s'ajoutent les 95 t du rotor. Pour une tension aux bornes de 27 kV, l'alternateur a une puissance apparente nominale de 1318 MVA.

L'alternateur doit être refroidi pendant son fonctionnement. On utilise pour cela le refroidissement mixte habituel pour les gros générateurs: refroidissement par hydrogène pour le bobinage rotorique, l'entrefer et le circuit du stator et par circulation d'eau dans les barres constituant le bobinage du stator. Un système statique à éléments semi-conducteurs (thyristors) sert à l'excitation et à la régulation de l'alternateur. La puissance d'excitation est prélevée directement sur l'alternateur via un transformateur adaptateur. Trois lignes électriques refroidies à l'air transportent le courant de l'alternateur aux transformateurs.

Photo: Palma Fiacco



Les turbines haute et basse pression sont montées sur le même axe que l'alternateur. Séparateurs d'eau et surchauffeurs sont positionnés à droite et à gauche.



Photo: Archives KKL

Lorsque le rotor est démonté, on peut voir dans l'alternateur l'extrémité de l'enroulement et les raccords du système de refroidissement à eau.



Photo: Archives KKL

Après la maintenance, la carcasse du support des aubes est montée à nouveau sur la turbine basse pression.



Photo: Peter Graf

Le rotor démonté d'une turbine basse pression présente des traces très nettes de corrosion dues à l'usure.

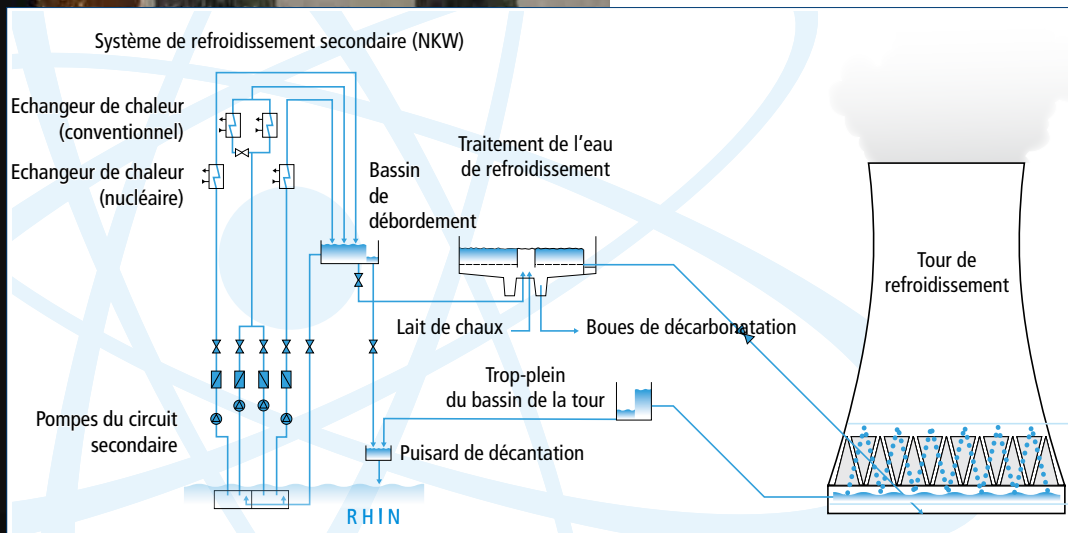
Les systèmes de refroidissement

■ Système principal de refroidissement à l'eau

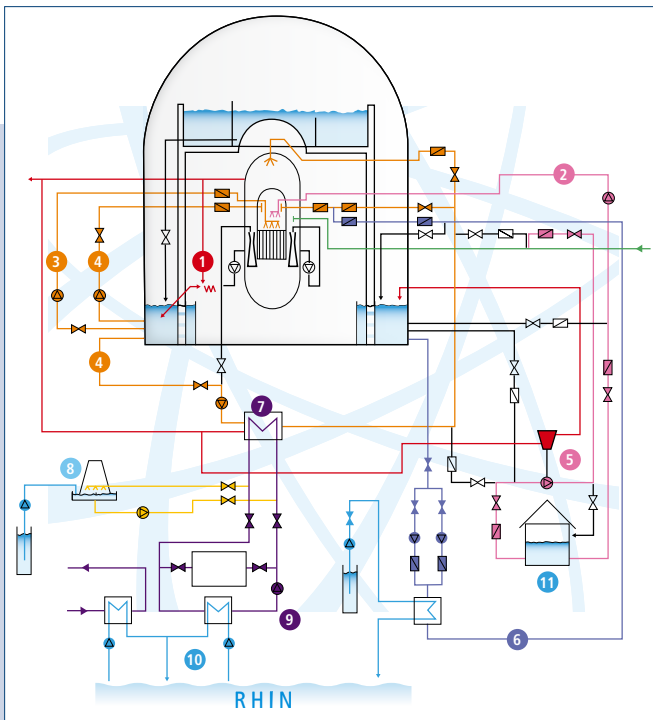
La tour de refroidissement haute de 144 m est l'élément le plus visible du circuit secondaire qui sert au refroidissement du condenseur. Quatre pompes (quatre fois 25 % de puissance) aspirent l'eau de refroidissement (33 m³/s) dans le bassin de la tour et la refoulent par des tuyauteries souterraines jusqu'au condenseur de la salle des machines où elle s'échauffe à un peu plus de 45°C. De là, l'eau retourne dans la tour où elle est répartie par de fines canalisations et pulvérisée en fines gouttelettes sur des plaques de ruissellement. Un fort courant d'air ascendant la refroidit à environ 30°C. De plus, il absorbe une partie de l'eau et forme au-dessus de la tour un nuage exclusivement constitué de vapeur d'eau. La forme et la taille de ce panache dépendent des conditions météorologiques du moment. Une telle tour à tirage naturel n'a pas besoin de ventilateurs ni d'autres auxiliaires techniques. La puissance de refroidissement est de l'ordre de 2350 MW.

Les pertes par évaporation dans la tour de refroidissement représentent en moyenne 720 kg/s. Cette eau doit être remplacée. Pour cela, on prélève en moyenne 915 kg/s d'eau dans le Rhin. L'eau du Rhin servant au refroidissement doit être traitée de manière à ce qu'elle n'encrasse pas le condenseur malgré l'épaississement dû à l'évaporation. L'eau en excès (env. 200 kg/s) est rejetée dans le Rhin dans le respect des conditions en vigueur pour la protection des cours d'eau. Lors du traitement de l'eau du Rhin, les matières en suspension sont éliminées par addition d'agents flocculants. L'eau est ensuite lentement décarbonatée au lait de chaux. Les boues de décarbonatation obtenues – environ 30 t par jour après séchage – sont actuellement utilisées par les paysans de la région et épandues sur les champs du sud de la Forêt noire pour améliorer la fertilité du sol.

L'eau de refroidissement ruisselle dans le bassin de la tour en formant un rideau scintillant.



L'eau du Rhin est utilisée pour refroidir les circuits de refroidissement intermédiaire de la centrale et pour compenser l'évaporation d'eau dans la tour de refroidissement. Au total, cela représente au maximum 4 m³ par seconde. A titre de comparaison, le Rhin a un débit voisin de 1000 m³ d'eau par seconde.



- 1 Système de dépressurisation automatique (ADS)
- 2 Système d'aspersion HP du cœur (HPCS)
- 3 Système d'aspersion BP du cœur (LPCS)
- 4 Système d'injection de réfrigérant BP (LPCI)
- 5 Système de refroidissement de l'isolation du cœur (RCIC)
- 6 Système de refroidissement de secours (SEHR)
- 7 Système d'évacuation de la chaleur résiduelle (RHR)
- 8 Eau de refroidissement d'urgence (ESW)
- 9 Eau de refroidissement intermédiaire (ZKW)
- 10 Eau de refroidissement secondaire (NKW)
- 11 Réservoir de condensats froids (KAKO)

Des systèmes à redondance multiple assurent que le cœur du réacteur peut également être refroidi dans les situations d'urgence.

■ Système secondaire de refroidissement à l'eau

Les besoins supplémentaires en eau de refroidissement pour le fonctionnement de la centrale sont couverts par un système secondaire. Celui-ci alimente les refroidisseurs intermédiaires du bâtiment auxiliaire du réacteur et de la salle des machines par deux colonnes séparées. Les deux circuits intermédiaires fermés permettent, entre autres, d'évacuer la chaleur issue du refroidissement des locaux, de l'alternateur et de diverses pompes, de la piscine de stockage du combustible usé ainsi que la chaleur résiduelle du réacteur à l'arrêt (*Residual Heat Removal System RHR*). La puissance de réfrigération du système secondaire est de 50 MW. On utilise pour cela environ 2500 kg/s d'eau du Rhin.

Une partie de l'eau réchauffée reflue dans le bassin de débordement commun est traitée pour servir d'eau d'appoint pour la tour de refroidissement. Le reste s'écoule dans le Rhin après avoir traversé un puisard de décantation. La température de l'eau rejetée dans le fleuve ne doit pas excéder 30°C.

■ Systèmes de refroidissement d'urgence

S'il s'avère impossible de recourir à l'eau du Rhin, par exemple en l'absence d'électricité pour alimenter les pompes, c'est le système de refroidissement d'urgence qui entre en action. Avec ses trois propres tours de refroidissement, il assure la fonction de système de refroidissement auxiliaire et dissipe la chaleur résiduelle du réacteur via le système RHR. Les canalisations d'eau menant aux

agrégats de refroidissement ainsi que les lignes électriques de commande sont posées et protégées en conséquence. L'eau qui provient de la nappe phréatique est refoulée par des pompes dont l'alimentation électrique est assurée par cinq groupes électrogènes de secours à moteur diesel à démarrage rapide indépendants les uns des autres.

En cas de perte de réfrigérant dans le circuit primaire, il a été prévu plusieurs systèmes indépendants les uns des autres qui entrent automatiquement en action pour alimenter le cœur du réacteur en eau et le refroidir. Ce sont les systèmes d'aspersion haute pression et basse pression du cœur HPCS (*High Pressure Core Spray*), LPCS (*Low Pressure Core Spray*) ainsi que le système d'injection basse pression LPCI (*Low Pressure Core Injection*) à triple redondance. Ces systèmes de refroidissement d'urgence disposent d'une alimentation électrique indépendante protégée contre les séismes et les inondations, de tours de secours et d'un refroidissement en retour par l'eau de la nappe phréatique.

Le système SEHR (*Special Emergency Heat Removal*) est un autre système de refroidissement d'urgence qui est constitué de deux chaînes redondantes et se met automatiquement en service si cela s'impose. Le système SEHR garantit que le réacteur pourra être refroidi de manière sûre pendant des heures sans intervention de l'équipe d'exploitation. Pour assurer la protection contre les agressions externes, le système SEHR est aménagé en souterrain.

Pour pratiquement tous les systèmes de refroidissement d'urgence, l'eau de refroidissement est prélevée dans le bassin d'eau du système de dépressurisation.

Installations électriques

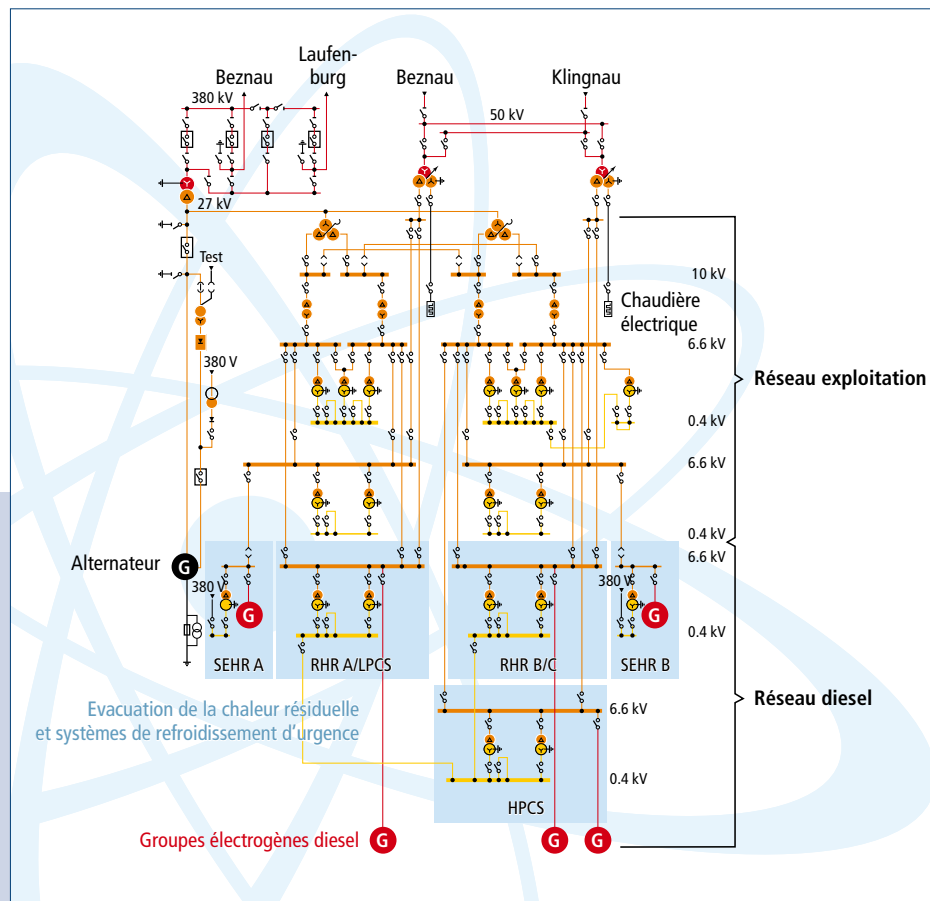
Des centaines d'instruments surveillent l'état des installations en permanence.

■ Transformateurs principaux

L'électricité produite par l'alternateur est amenée aux transformateurs fournis par la société néerlandaise SMIT. Chacun des trois transformateurs monophasés d'un poids voisin de 320 t a une puissance nominale de 500 MVA et augmente la tension de 27 à 380 kV. Un quatrième transformateur sert de réserve. A la sortie des transformateurs, l'électricité est amenée au poste de distribution. Celui-ci relie la KKL par lignes aériennes, d'une part au poste électrique du centre européen de gestion du réseau de transport d'électricité tout proche de Laufenburg, centre névralgique de l'approvisionnement électrique de la Suisse, et de l'autre au poste électrique de Beznau et au réseau haute tension 380 kV.

■ Besoins propres

La KKL a besoin de 55 MW de la puissance électrique qu'elle produit pour couvrir ses propres besoins énergétiques, dont 35 MW pour les seules pompes des systèmes d'alimentation en eau, de traitement des condensats et de refroidissement en l'eau. La couverture de ces besoins est assurée par deux systèmes indépendants l'un de l'autre appelés «divisions». Chacun d'eux est alimenté par son propre transformateur triphasé (passage de 27 à 10 kV). Si l'alternateur est à l'arrêt, la centrale est alimentée sur le réseau 380 kV externe. En cas de mise hors circuit du poste électrique 380 kV en raison de travaux de maintenance ou de perturbations sur le réseau, deux lignes de 50 kV indépendantes l'une de l'autre et



Le schéma représente le circuit électrique qui assure la couverture des besoins de la KKL ainsi que le raccordement au réseau haute tension (380 kV).

dotées de leurs propres transformateurs ont été prévues pour assurer l'alimentation de la centrale. L'une de ces lignes mène directement au poste de distribution de la centrale hydroélectrique de Klingnau, l'autre est connectée à la ligne 50 kV Beznau-Klingnau existante. Grâce à ces alimentations 50 kV, le groupe turbines peut être mis à l'arrêt sans risque d'endommagement, même en cas de défaillance du réseau 380 kV.

■ Alimentation électrique d'urgence

En cas de défaillance du réseau électrique externe, deux groupes électrogènes indépendants l'un de l'autre garantissent l'alimentation en électricité de la centrale. Trois gros groupes électrogènes diesel V20 cylindres turbo-compressé de l'entreprise allemande MTU permettent d'arrêter le réacteur et de le refroidir de manière sûre à tout moment. Chacun d'eux a une puissance continue de 4595 kW (6250 chevaux). De plus, deux groupes électrogènes de secours de plus petite taille de V12 cylindres sont disponibles dans le système SEHR bunkérisé. Ils ont une puissance de 2200 kW (3000 chevaux) chacun. D'autres consommateurs de courant continu importants

Tous les groupes électrogènes diesel de secours sont préchauffés en permanence et il leur suffit de quelques secondes pour passer à pleine charge après le démarrage. Des tests sont réalisés chaque mois pour s'assurer de leur parfait état de fonctionnement.

comme l'électronique de commande, les instruments de mesure, les entraînements spéciaux des pompes, certaines vannes et l'éclairage de secours doivent continuer d'être alimentés sans interruption, même en cas de panne de secteur. C'est la raison pour laquelle ils sont aussi connectés à cinq systèmes de batteries indépendants 220 V.

Photo: Ruth Schmid



Les trois transformateurs principaux constituent un bloc, un quatrième, placé à gauche, sert de réserve.

Les dispositifs du système de contrôle-commande sont alimentés en énergie par sept batteries 24 V distinctes.

■ Postes de commande de secours

Tous les systèmes nécessaires au fonctionnement de la centrale sont pilotés automatiquement ou, si l'on veut, manuellement depuis la salle de commande principale. En cas de défaillance de celle-ci, il est possible d'utiliser les postes de commande de secours se trouvant dans le bâtiment auxiliaire du réacteur. Le système de secours SEHR possède lui aussi ses propres postes de commande, il fonctionne de manière autonome et entièrement automatique.

Photo: Palma Fiacco



Moteur à 20 cylindres d'un groupe électrogène diesel de secours.

Le combustible de la KKL



Photo: US NRC

L'uranium est commercialisé sous forme de poudre jaune ou noire (U_3O_8).

■ Acquisition du combustible

Le combustible de la centrale est acheté par Axpo SA qui assure aussi la direction de la KKL AG. A l'heure actuelle, l'uranium utilisé par la KKL provient de Russie tandis que les assemblages combustibles sont fabriqués en Europe occidentale. L'approvisionnement en combustible est garanti par contrat pour de nombreuses années. La KKL attend de ses fournisseurs et sous-traitants qu'ils déploient autant d'efforts qu'elle-même pour assurer la sûreté nucléaire. Ainsi on veille à ce que tous les partenaires impliqués dans la fourniture du combustible soient sous la surveillance des autorités. Il est exigé par ailleurs que les producteurs adoptent une démarche environnementale progressiste (ISO 14001 ou équivalent), qu'ils respectent les normes internationales de sécurité au travail (référentiel OHSAS 18001 ou équivalent) et qu'ils s'engagent à se conformer aux normes internationales en matière de droits de l'homme (ONU, OIT).

■ Consommation de combustible

Pour pouvoir utiliser l'uranium dans le réacteur de la KKL, il faut augmenter la teneur d'uranium 235 de 0,7 % à 4,25 % en moyenne. Cet uranium enrichi est utilisé dans les assemblages combustibles sous forme de dioxyde d'uranium (UO_2). Chaque année, la KKL consomme 128 assemblages dont chacun contient 205 kg de dioxyde d'uranium enrichi. Cette quantité annuelle totale de plus de 26 t de dioxyde d'uranium est extraite de 190 t

L'uranium est un métal lourd dont il existe trois isotopes dans la nature. Les isotopes se distinguent par le nombre de neutrons présents dans le noyau de l'atome : uranium 234 (92 protons + 142 neutrons = 234 particules nucléaires), uranium 235 (143 neutrons). L'uranium naturel ne contient que des traces d'uranium 234 et environ 0,7 % d'uranium 235. Il est constitué en majeure partie d'uranium 238 (99,3 %). Seul l'uranium 235 est facilement fissile.

d'uranium naturel et correspond à 980 kg d'uranium 235 fissile. L'uranium est très lourd et a une forte densité énergétique. Les 26 t de dioxyde d'uranium consommées annuellement par la KKL ont un volume de 2,5 m³ seulement et pourraient facilement être transportés dans une fourgonnette de livraison. En partant de cette petite quantité de combustible, la KKL produit chaque année de l'électricité pour plus d'un million de personnes!

■ Retraitement

Jusqu'à l'entrée en vigueur du moratoire de dix ans à la mi-2006, la KKL faisait retraiter une partie du combustible usé dans lequel se trouve encore du plutonium utilisable ainsi qu'environ 0,6 % d'uranium 235 non consommé. Le retraitement consiste à recycler certains composants en les séparant des déchets afin de les utiliser dans de nouveaux combustibles qui sont appelés URE (uranium de recyclage enrichi) et MOX (de l'anglais *Mixed Oxides*, combustible composé d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium). Tous les déchets sont traités et renvoyés à la KKL, ou plutôt au dépôt intermédiaire Zwiilag qui est cofinancé par la KKL. Les déchets de haute activité, tels que les produits de fission (sous-produits radioactifs à vie courte issus du processus de fission) et les actinides (isotopes radioactifs à vie longue formés par captures de neutrons et désintégrations successives), sont vitrifiés dans l'installation de retraitement et conditionnés dans des fûts en acier. Le volume et la radioactivité des déchets ultimes de haute activité sont considérablement diminués par le retraitement.

La KKL n'a pas utilisé jusqu'ici de combustible recyclé provenant du retraitement de son propre combustible. Le plutonium extrait du combustible usé de la KKL a déjà été employé sous forme de MOX à la centrale nucléaire de Beznau. L'uranium retraité peut également y être utilisé, aussi bien qu'à la KKL.

Les déchets

■ Déchets de haute activité

Les assemblages combustibles usés sont fortement radioactifs. Ils dégagent beaucoup de chaleur et doivent être entreposés pendant quelques années dans une piscine de refroidissement avant d'être transportés au site de stockage intermédiaire.

Aujourd'hui, la KKL doit éliminer chaque année 12 m³ d'assemblages usés, soit un tiers de moins qu'au début de la production, comparativement à la quantité d'électricité produite. Cela s'explique par les avancées techniques significatives qui ont permis d'améliorer l'efficacité du combustible nucléaire et par conséquent de la centrale. La durée de vie de chaque assemblage combustible s'est accrue d'un tiers, et la consommation de matière (uranium, zirconium) dans les assemblages a diminué bien que la puissance du réacteur ait progressé de 15 %. Ainsi est-il possible de produire encore plus d'électricité avec encore moins d'uranium.

■ Déchets faiblement et moyennement actifs

Les déchets d'exploitation (notamment les chiffons, feuilles plastiques, vêtements de zone, couvercles de protection, emballages et autre matériel de maintenance) sont des déchets faiblement et moyennement radioactifs. Une partie de ces déchets est compactée à la centrale et placée dans des fûts de 200 litres. Après avoir été transportés au dépôt intermédiaire de Würenlingen

Photo: Ivo Stalder



Les fûts de couleur jaune sont destinés à recueillir les déchets d'exploitation de faible et moyenne activité.

(Zwilag), les déchets y sont incinérés dans un four à plasma et coulés dans une masse de verre. Les scories contenues dans ces «coquilles» sont ensuite confinées dans des fûts en acier, puis emballées dans une matrice de ciment. D'autres déchets issus du processus de production tels que résines, concentras, boues et filtres des circuits de ventilation sont directement placés dans des fûts et enrobés dans du béton à la KKL. Les déchets faiblement et moyennement actifs ne dégagent pas de chaleur ou sinon en quantités négligeables.

La quantité des déchets de faible et moyenne activité a elle aussi sensiblement diminué au fil des ans grâce à l'optimisation des installations, à la formation du personnel et à des concepts de minimisation. C'est ainsi qu'aujourd'hui les déchets de cette catégorie ne représentent plus qu'un volume de 40 m³ après leur conditionnement final, soit 30 % de moins qu'il y a 20 ans.

Toutes ces améliorations vont dans le sens des exigences du développement durable. Elles permettent de préserver les ressources naturelles et aident à réduire à un minimum les déchets radioactifs et leur impact sur l'environnement.

Photo: Ivo Stalder



■ Conteneurs de transport et de stockage

Pour transporter les assemblages combustibles usés au Zwilag, il faut les conditionner dans des conteneurs spéciaux qui servent en même temps au stockage. Chaque conteneur comprend environ 70 assemblages et mesure six mètres de longueur et environ trois mètres de diamètre. Ces conteneurs robustes de conception complexe ont des parois extrêmement épaisses et sont conformes à la norme de l'AIEA. Ils offrent une protection optimale contre l'irradiation et résistent à des chutes de grande hauteur, au feu et même au crash d'un avion de chasse. Lors du transport au Zwilag, le personnel est soumis à des radiations plus faibles que les pilotes effectuant un vol transatlantique.

Les assemblages combustibles usés sont transportés et stockés au dépôt intermédiaire dans des conteneurs extrêmement robustes jusqu'à leur enfouissement en couche géologique profonde.

La sûreté à la KKL

L'exploitation d'une centrale nucléaire exige un niveau maximal de sûreté du réacteur et de radioprotection. La démarche de sûreté nucléaire a donc pour objectif d'assurer que les installations et dispositifs sont les plus fiables et les moins sensibles aux incidents possible et qu'ils garantissent une exploitation sûre. La surveillance permanente et la maintenance préventive des équipements en sont des éléments essentiels. Au premier plan des mesures de sûreté, figure la protection de la population et des personnes travaillant à la centrale contre les effets nocifs de la radioactivité. Le haut niveau de sûreté de la KKL se fonde sur la sûreté passive, en général intégrée dans des dispositions constructives, ainsi que sur des barrières techniques de sécurité active redondantes, le tout étant complété par une culture de sûreté vécue au quotidien.

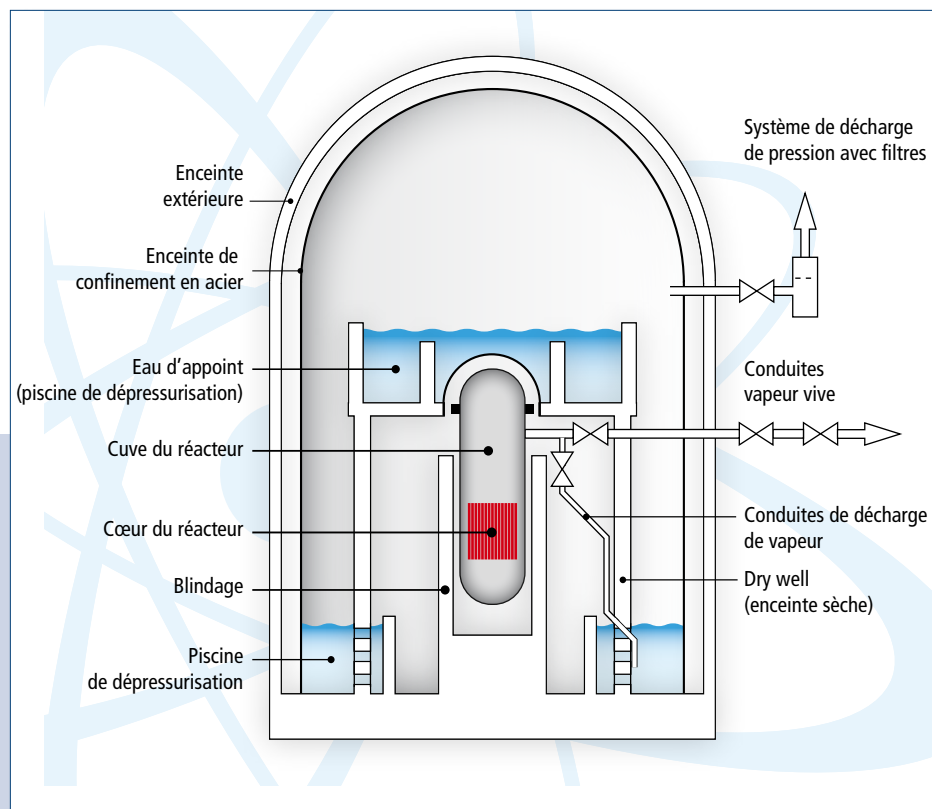
■ Protection de l'homme, de l'environnement et de l'installation

L'environnement est protégé de la radioactivité présente dans le système de génération de vapeur de la centrale nucléaire par plusieurs dispositifs conçus suivant le principe des barrières multiples («pelure d'oignon»). Les pastilles de combustible sont constituées d'oxyde d'uranium fritté, c'est-à-dire cuit au four pour donner une structure céramique dure. Des matières solides ne peuvent

donc s'en échapper. Les pastilles-mêmes sont soudées dans les gaines des crayons combustibles qui sont étanches aux gaz et retiennent les produits de fission à l'état gazeux. Les assemblages combustibles sont enfermés dans la cuve du réacteur, construite en acier de 15 cm d'épaisseur, qui fait écran à une grande partie du rayonnement. La cuve est entourée du dry well, un mur en béton armé épais de 1,5 m, qui se trouve lui-même dans l'enceinte de confinement constituée d'une enveloppe en acier de 3,8 cm d'épaisseur. Celle-ci est protégée par le mur extérieur du bâtiment réacteur qui est construit en béton fortement armé de 1,2 m d'épaisseur.

L'enceinte de confinement fait obstacle de manière optimale à la sortie de produits de fission et de matières contaminées, aussi bien pendant l'exploitation normale que dans le cas très invraisemblable d'un incident grave. La dépression qui règne dans l'espace séparant le bâtiment réacteur de l'enceinte en acier permet une surveillance sûre et empêche que la radioactivité présente dans l'air s'échappe à l'extérieur. Des vannes d'isolement à fermeture automatique garantissent, si besoin est, la séparation complète de l'enceinte de confinement du reste de l'installation. De plus, un système de décharge de pression avec filtres a été prévu au cas où la pression augmenterait de façon excessive dans l'enceinte.

Afin d'assurer la protection contre les agressions extérieures, la KKL a été construite de manière particulièrement



Le schéma en coupe du bâtiment réacteur révèle le système de barrières multiples qui protège le réacteur des agressions extérieures et l'environnement des radiations.



Photo: Ruth Schmid

La signalisation claire des dangers et des instructions est fondamentale pour la sécurité du personnel de la centrale.

robuste. Ainsi, par exemple, le mur du bâtiment réacteur a été réalisé dans un béton spécial qui contient deux fois plus de ciment que celui utilisé pour la construction des tunnels alpins. Les calculs de structure des bâtiments ont été effectués sur la base des critères de sûreté s'appliquant aux centrales nucléaires. Les situations spécifiques liées au site (risques de séisme, d'inondation et de chute d'un avion) ont été prises en compte dans la conception de la centrale. En cas de crash d'un avion gros porteur moderne, l'enveloppe externe du bâtiment réacteur ne serait que légèrement endommagée et il n'y aurait aucune incidence sur l'enceinte de confinement et sa fonction protectrice.

■ Vivre au quotidien la culture de sûreté

La sûreté s'améliore en permanence grâce à l'optimisation des interactions homme-machine. Les échanges en ce sens au sein de la filière nucléaire permettent de tirer des enseignements des erreurs des autres. La sûreté passe en outre par une modernisation incessante de l'installation et par son adaptation à l'évolution technologique. La KKL est une centrale moderne qui est exploitée par un personnel bien formé et contrôlé. Les opérateurs, par exemple, doivent s'entraîner plusieurs fois par an sur simulateur à différentes procédures d'exploitation et scénarios d'incident et comme les pilotes d'avion, renouveler leur licence tous les deux ans. Un système de contrôle technique de gestion de la qualité soutient les processus de travail et la surveillance des

*Dans sa **Charte de sûreté nucléaire**, la KKL s'engage elle-même à prendre sous sa propre responsabilité les mesures nécessaires pour améliorer en permanence la sûreté sur le plan de l'exploitation de la centrale et de la radioprotection. Sa démarche se fonde sur le respect des exigences légales. La Charte sert de base à tous les collaborateurs de la KKL dans l'accomplissement de leurs tâches quotidiennes.*

normes de sécurité tandis que les vérifications des contrôles périodiques procédées par les autorités favorisent le perfectionnement permanent dans ce domaine.

■ Contrôle des autorités

A côté des mesures de construction et d'un haut niveau de culture de sûreté, de multiples lois et réglementations ont pour objet de protéger la santé de la population, du personnel de la centrale et de l'environnement de la radioactivité. En effet, la KKL émet de la radioactivité, même si la quantité rejetée se situe bien en dessous des seuils autorisés et atteint généralement au maximum 10 % des limites légales. Comme ces rejets représentent moins de 1 % de la dose d'irradiation naturelle, aucune élévation du niveau de rayonnement n'est mesurable à Leibstadt. Grâce à la planification détaillée des travaux et à de nombreuses mesures de radioprotection, la dose moyenne d'irradiation annuelle reçue par chaque travailleur n'est que de 0,5 mSv tandis que la dose individuelle maximale s'élève en règle générale à environ 50 % du seuil légal de 20 mSv. A titre de comparaison, la dose de rayonnement naturel dans la Forêt noire (station thermale de Menzenschwand) est de 20 mSv par personne et par an.

Tout un réseau de stations de mesure situées dans les environs proches et lointains de la centrale, y compris dans la zone frontalière allemande, surveille en permanence les émissions de la centrale dans l'atmosphère, les eaux et les sols ainsi que le rayonnement direct. Les résultats de ces mesures sont contrôlés par la KKL elle-même, par le réseau MADUK de l'autorité nationale de surveillance IFSN (publication des valeurs actuelles sur le télétexte de la télévision suisse) et par les sondes NADAM de la Centrale nationale d'alarme CENAL (valeurs actuelles de la radioactivité sur le site www.naz.ch). L'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux (EAWAG) et la section Surveillance de la radioactivité (SUER) de l'Office fédéral de la santé publique possèdent également des stations de mesure.

La centrale nucléaire est protégée contre les intrusions.

Photo: Ruth Schmid





Photo: Karin Gfeller

Les faucons pèlerins se sentent bien dans l'environnement naturel qui entoure la KKL et font leur nid depuis des années sur la paroi de la tour de refroidissement de la centrale.

Aspects environnementaux

■ Gaz à effet de serre

L'exploitation de la KKL ne génère pratiquement aucun gaz à effet de serre. Comme aucun combustible fossile n'est brûlé, il n'y a aucun rejet de CO₂ pendant la production d'électricité, contrairement à toutes les autres centrales thermiques. Si l'on prend en compte tous les processus ayant lieu en amont et en aval de la KKL et les sources d'énergie mises en jeu depuis l'extraction de l'uranium jusqu'à l'élimination des déchets, le bilan des émissions de gaz à effet de serre demeure excellent, à savoir seulement huit grammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure d'électricité produit. A titre de comparaison, les centrales thermiques au charbon brun (lignite), telles qu'on en trouve encore en Allemagne par exemple, ont un équivalent CO₂ de 1231 g/kWh. L'équivalent CO₂ des centrales au gaz est de 644 g/kWh et même une centrale à cycle combiné au gaz rejette encore 426 g de CO₂ par kWh.

Le mix électrique suisse actuel est pratiquement imbattable en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Grâce à 40 % d'énergie nucléaire et à 55 % d'énergie hydraulique également respectueuse du climat, la production d'électricité ne représente que 2,3 % du total des gaz à effet de serre rejetés en Suisse alors que la moyenne mondiale se situe autour de 40 %.

■ Emissions dans l'air et dans l'eau

Globalement, la KKL ne génère quasiment pas d'émission dans l'atmosphère. L'ensemble des rejets gazeux de la centrale est filtré, ce qui permet de retenir les particules radioactives (aérosols). Les gaz radioactifs stockés dans le bâtiment de traitement des effluents gazeux pendant

près de 50 jours, jusqu'à ce que leur radioactivité ait largement diminué. Seule une faible quantité de gaz rares (krypton et xénon) est rejetée avec l'air filtré par la cheminée d'évacuation des rejets gazeux de la centrale.

Tous les rejets radioactifs dans l'air et dans l'eau ne représentent qu'une fraction des seuils réglementaires très bas autorisés par les autorités.

La KKL produit aussi des effluents liquides radioactifs. Il s'agit d'eaux usées issues d'opérations de purge et de drainage ainsi que des laboratoires et de la buanderie de la centrale. La totalité des eaux provenant de la zone contrôlée est traitée par évaporation ou purifiée dans des centrifugeuses. Le distillat est compacté et stocké dans des fûts. L'eau décontaminée est contrôlée et renvoyée dans le Rhin après enregistrement des données. Ainsi, seule une infime quantité de radioactivité pénètre dans le fleuve.

Un ouvrage marquant

Afin de n'affecter en rien la température et l'équilibre biologique du Rhin, la KKL a été dotée d'une tour de refroidissement à tirage naturel au lieu d'un refroidissement direct par l'eau du fleuve. La chaleur et la vapeur s'échappant de la tour n'ont aucun impact sur le climat local. En raison de la taille du panage, il y a cependant un effet d'ombre sensible dans certaines conditions météorologiques.

Verso:
Des lignes électriques refroidies à l'air acheminent
l'électricité de l'alternateur aux transformateurs.



Photo: Palma Fiacco

Centrale nucléaire de Leibstadt AG, centre d'information, CH-5325 Leibstadt