

La centrale nucléaire expérimentale de Lucens: description du projet

Autor(en): [s.n.]

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **88 (1962)**

Heft 13: **Centrale nucléaire expérimentale Lucens**

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-771843>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: † J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève

Membres:

Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Groscurin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermaten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »

Président: D. Bonnard, ing.
Membres: M. Bridel; J. Favre, arch.; † R. Neeser, ing.; A. Robert,
ing.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

RÉDACTION

Vacat
Rédaction et Editions de la S. A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 28.—	Etranger	Fr. 32.—
Sociétaires	»	» 23.—	»	» 28.—
Prix du numéro	»	» 1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° II 57 73, Lausanne

Adressez toutes communications concernant abonnement, changements
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,
Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:		
1/1 page	Fr. 320.—	
1/2 »	» 160.—	
1/4 »	» 80.—	
1/8 »	» 40.—	

Adresse: Annonces Suisses S. A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 28. Lausanne et succursales



SOMMAIRE

La centrale nucléaire expérimentale de Lucens: Description du projet.
Bibliographie. — Divers. — Les congrès.
Société vaudoise des ingénieurs et des architectes: Candidatures.
Documentation générale. — Documentation du bâtiment.

LA CENTRALE NUCLÉAIRE EXPÉRIMENTALE DE LUCENS

Description du projet ¹

1. Introduction

L'énergie nucléaire représente une source d'énergie nouvelle qui viendra compléter tôt ou tard les sources actuellement utilisées, le charbon, le pétrole, le gaz naturel ou les forces hydrauliques, pour couvrir les besoins croissants du monde. La Suisse dispose de forces hydrauliques mais leur aménagement sera bientôt achevé, en outre, elle doit importer ses combustibles fossiles. D'autre part, son industrie des machines s'est depuis longtemps acquise une renommée mondiale pour ses équipements de production d'énergie. Il est donc naturel, aussi bien pour élargir la couverture de ses besoins futurs en énergie que pour assurer l'avenir de son industrie, que la Suisse s'établisse dans ce nouveau domaine de la technique.

La centrale nucléaire expérimentale de Lucens représente une première réalisation dans cette voie. Le maître de l'œuvre de la centrale de Lucens est la **Société nationale pour l'encouragement de la technique atomique industrielle (SNA)** créée en 1961 par trois sociétés suisses intéressées à l'énergie nucléaire:

Energie Nucléaire S. A., groupe suisse romand
Suisatom S. A., formée des principales entreprises
électriques
Therm-Atom S. A., groupant des industries de toute
la Suisse

La SNA est en outre ouverte à toute entreprise suisse désireuse de soutenir ses efforts ou de participer au développement des techniques nucléaires.

La SNA a pour but d'organiser un programme de constructions et d'essais de réacteurs de puissance et de centrales nucléaires expérimentales de construction suisse, dont Lucens est pour l'instant le principal objet. Elle bénéficie d'un appui financier de la Confédération de 50 % jusqu'à concurrence de 50 millions de francs.

La SNA a mandaté la **Communauté de travail Lucens (CTL)** pour l'établissement du projet, la direction des travaux et les essais de la centrale.

La CTL est formée des partenaires suivants:

D. Bonnard & A. Gardel, ingénieurs-conseil, Lausanne
Electro-Watt, Entreprises électriques et industrielles
S. A. (avec sa filiale Atomelectra S. A.), Zurich
Société Générale pour l'Industrie, Genève
Therm-Atom S. A., Zurich

¹ Rédigé au nom de la Communauté de travail Lucens, par P. Krafft, ingénieur EPUL, c/o Electro-Watt, Entreprises électriques et industrielles S. A., Talackerstrasse 16, Zurich.

Electro-Watt assume la présidence et la gestion administrative de la CTL.

Therm-Atom sera en outre appelé à fournir la plus grande partie des équipements.

2. Conception de la centrale

La centrale expérimentale de Lucens permettra de réunir des expériences concernant d'une part le réacteur modéré à l'eau lourde, son combustible et son intégration dans une centrale nucléaire et d'autre part l'exploitation d'une telle centrale. La vente de l'énergie électrique qui sera produite permettra de réduire le coût de ces expériences, mais à ce stade il ne saurait être question de rentabilité. Par contre, les résultats acquis avec Lucens doivent permettre la réalisation ultérieure de centrales plus importantes dont l'objectif primaire sera la production d'énergie.

La conception de Lucens est dominée par la nécessité d'obtenir des expériences susceptibles d'extrapolation tout en limitant le coût de l'entreprise.

La puissance thermique du réacteur est fixée à 30 MW. La puissance nominale brute de la centrale est ainsi de 8,5 MW. Après déduction de sa consommation interne, la puissance fournie au réseau est alors d'environ 6 à 7 MW.

La centrale de Lucens présente par rapport aux réalisations étrangères un certain nombre d'originalités.

Tout d'abord, il convient de mentionner la construction en caverne. C'est une solution bien adaptée à la Suisse. Elle présente des avantages au point de vue de la sécurité et de la protection des sites. Elle pose toutefois un certain nombre de problèmes nouveaux, en particulier en ce qui concerne la ventilation qui doit pouvoir évacuer des quantités de chaleur appréciables. De plus, la participation du rocher à l'enceinte de confinement, la barrière qui doit empêcher tout déga-

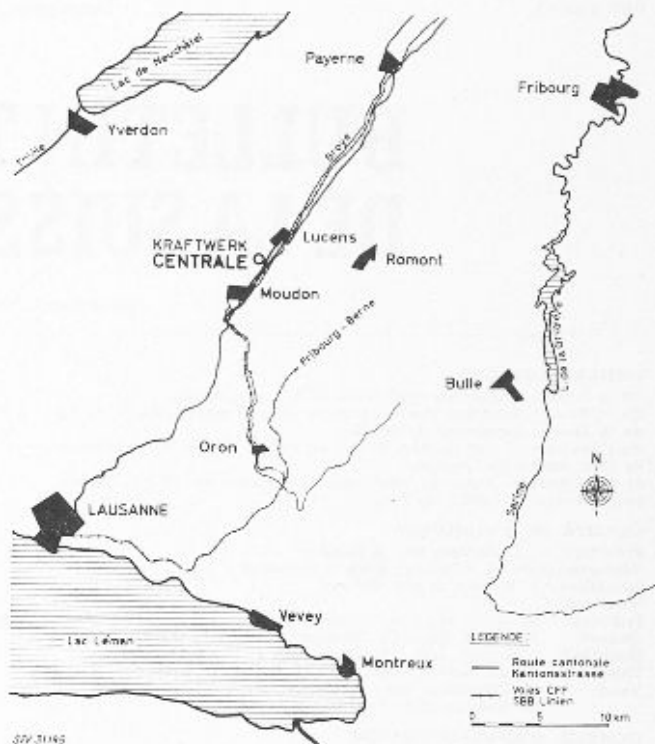


Fig. 1. — Plan général de situation.

gement dangereux de produits radio-actifs en cas d'accident catastrophique, a nécessité une série d'études et d'essais originaux.

Le réacteur présente lui aussi de nombreuses caractéristiques intéressantes. Il est modéré à l'eau lourde et refroidi au gaz. Chaque élément combustible est enfermé dans un tube de force supportant la pression du réfrigérant. Ces tubes de force peuvent être démontés avec l'élément qu'ils contiennent. Il est ainsi possible d'es-

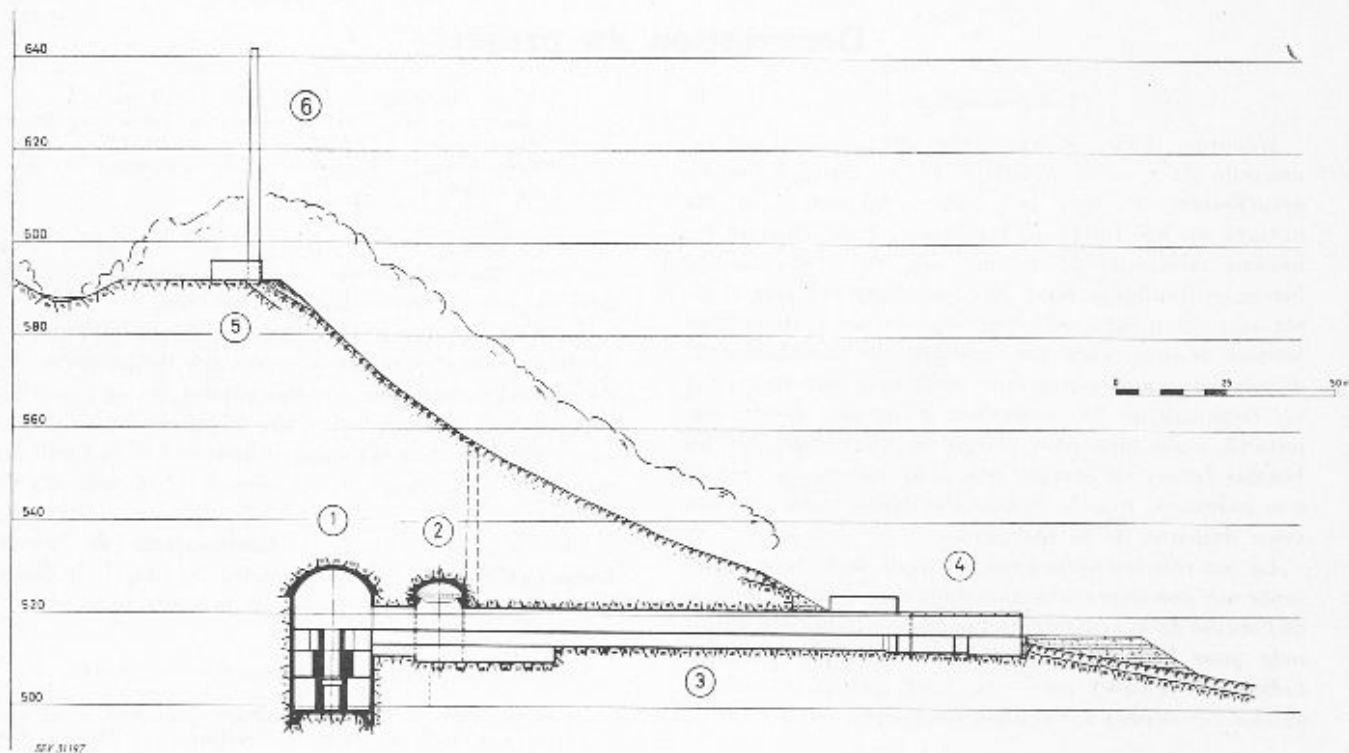


Fig. 2. — Profil en long.

1 Caverne du réacteur 2 Caverne des machines 3 Galerie d'accès 4 Bâtiment de service 5 Station supérieure 6 Cheminée de ventilation

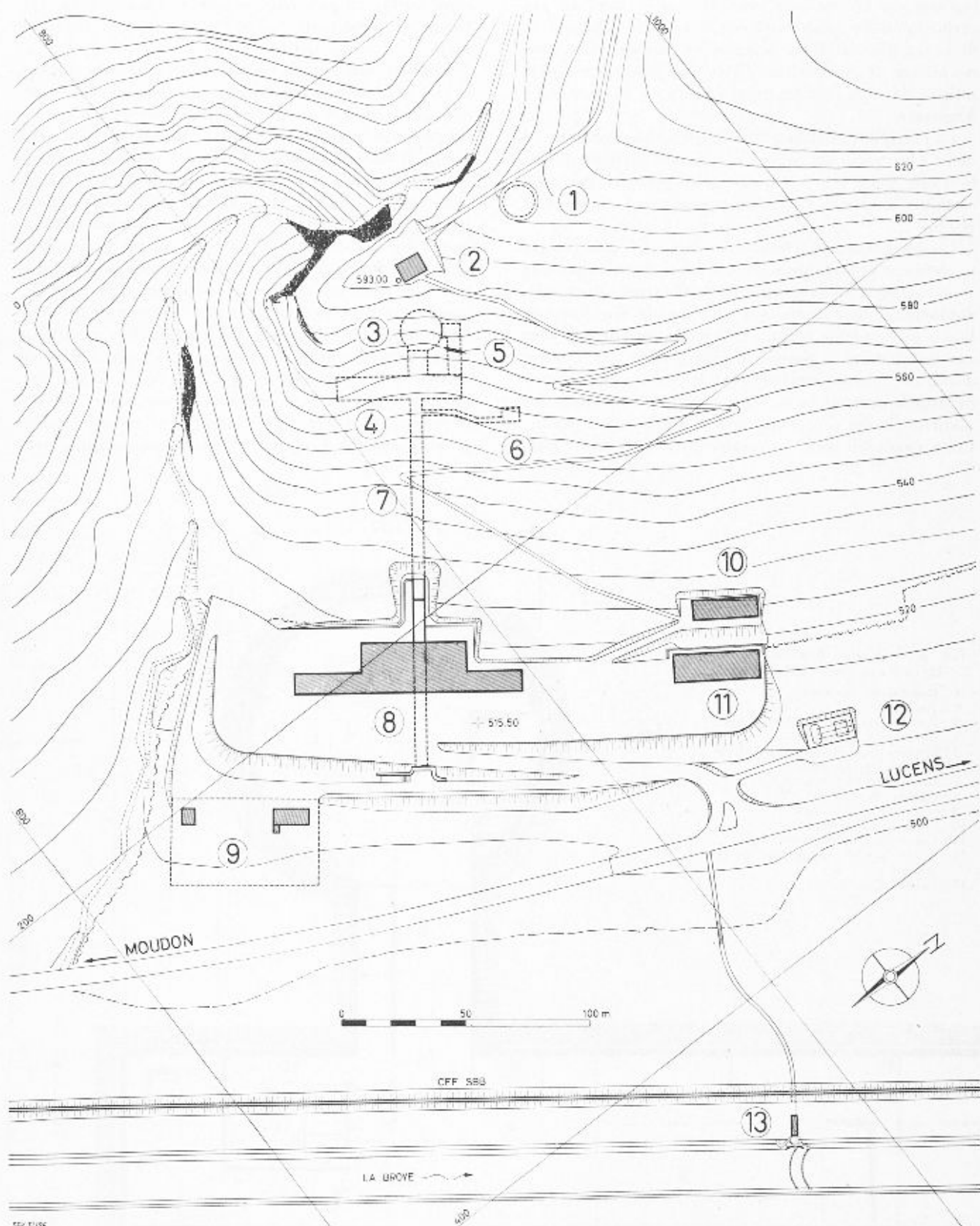


Fig. 3. — Plan de situation.

- 1 Réservoir
- 2 Station supérieure et cheminée
- 3 Caverne du réacteur
- 4 Caverne des machines
- 5 Caverne de la piscine à combustible

- 6 Caverne expérimentale
- 7 Galerie d'accès
- 8 Bâtiment de service
- 9 Installation de traitement des déchets

- 10 Préparation de l'eau
- 11 Tour de réfrigération
- 12 Poste transformateur
- 13 Station de pompage

sayer dans la même installation plusieurs combinaisons de combustible, de gainage et même de réfrigérant. Le réacteur de Lucens sera refroidi tout d'abord au gaz carbonique. Le combustible de la première charge sera de l'uranium métallique légèrement enrichi, gainé avec un alliage de magnésium. Cette combinaison est déjà utilisée dans de nombreux réacteurs en France et en Angleterre.

La possibilité d'utiliser ultérieurement un refroidissement à la vapeur est prévue moyennant certaines modifications. Cette solution paraît assez prometteuse, mais certains problèmes technologiques doivent encore être résolus.

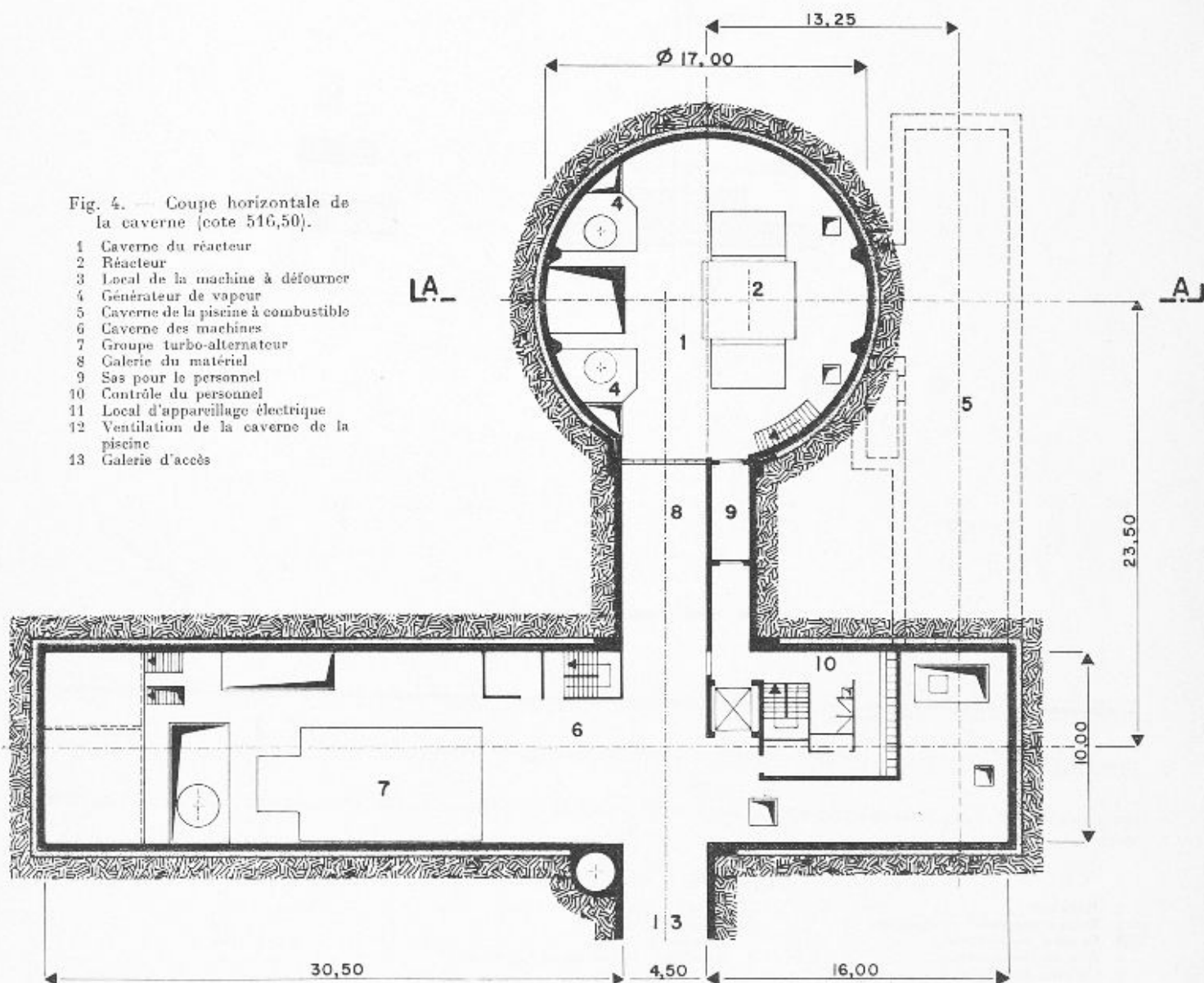
Les caractéristiques favorables de l'eau lourde comme modérateur et l'adoption dans le cœur de matériaux de construction à faible absorption de neutrons (zirconium, aluminium, etc.) donnent à ce type de réacteur une bonne économie de neutrons. Il sera ainsi possible pour des installations à puissance plus grande que Lucens, d'utiliser comme combustible de l'uranium naturel, éventuellement même de renoncer à la récupération des matières fissiles contenues dans le combustible irradié. Cette possibilité peut se révéler particulièrement inté-

ressante, compte tenu des incertitudes politiques et financières qui règnent dans le domaine des cycles de combustible (disponibilité et prix de l'uranium enrichi, valeur du plutonium, coût de la récupération des matières fissiles irradiées).

Les performances du réacteur sont modestes. Il faut, si l'on veut faire des comparaisons avec d'autres réalisations ou projets, tenir compte du fait qu'il s'agit de la première réalisation de ce genre pour l'industrie suisse. Il était raisonnable de ne pas se fixer un but trop ambitieux pour ne pas accumuler les difficultés. Malgré cette réserve, le réacteur de Lucens se trouve en bonne place dans la filière des réacteurs à uranium naturel gainés au magnésium et refroidis au gaz carbonique, grâce à la pression élevée du fluide réfrigérant qui permet une meilleure puissance spécifique. En outre, les possibilités de développement ultérieur se présentent de façon favorable. En effet, si le combustible métallique limite la température, le passage à l'oxyde d'uranium permettrait de monter à 520° C environ, ce qui correspond à des qualités de vapeur comparables à celles de centrales thermiques modernes et même à celles prévues pour les réacteurs à hautes températures, sans

Fig. 4. — Coupe horizontale de la caverne (cote 516,50).

- 1 Caverne du réacteur
- 2 Réacteur
- 3 Local de la machine à défournor
- 4 Générateur de vapeur
- 5 Caverne de la piscine à combustible
- 6 Caverne des machines
- 7 Groupe turbo-alternateur
- 8 Galerie du matériel
- 9 Sas pour le personnel
- 10 Contrôle du personnel
- 11 Local d'appareillage électrique
- 12 Ventilation de la caverne de la piscine
- 13 Galerie d'accès



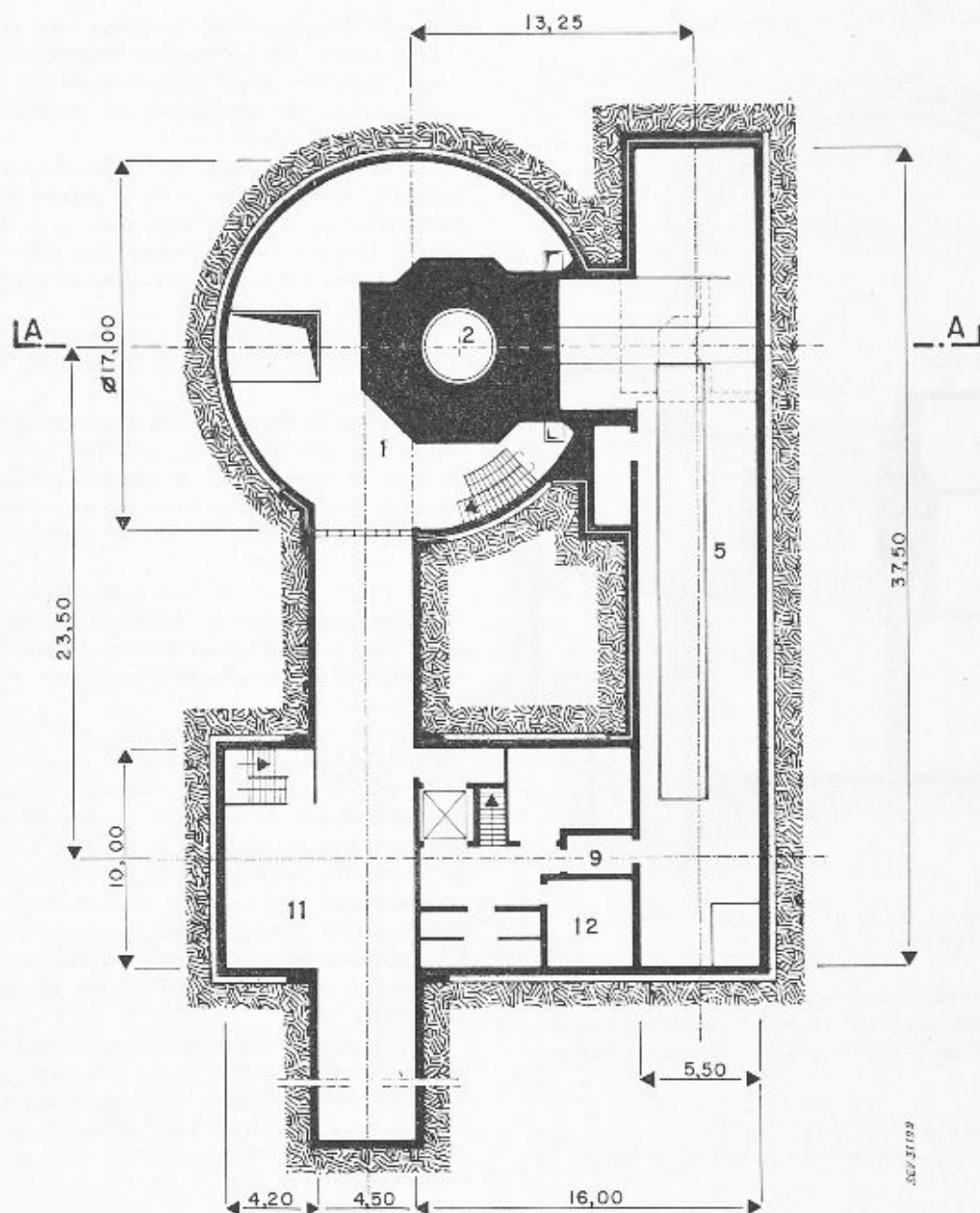


Fig. 5. — Coupe horizontale de la caverne (cote 508,30).

- | | | |
|-----------------------|---------------------------------------|--|
| 1 Caverne du réacteur | 5 Caverne de la piscine à combustible | 11 Local d'appareillage électrique |
| 2 Réacteur | 9 Sas pour le personnel | 12 Ventilation de la caverne de la piscine |

faire appel à des techniques nouvelles. En même temps la puissance spécifique pourrait être environ doublée, au prix il est vrai d'un certain enrichissement. Enfin, si les problèmes technologiques peuvent être résolus, l'usage de la vapeur d'eau pour l'extraction de la chaleur permettrait de simplifier considérablement l'installation et de réduire le prix du kW installé. Les estimations faites jusqu'ici montrent que ce dernier serait, pour de grandes puissances, comparable à celui de la plupart des réacteurs à neutrons thermiques expérimentés jusqu'ici.

3. Disposition des ouvrages

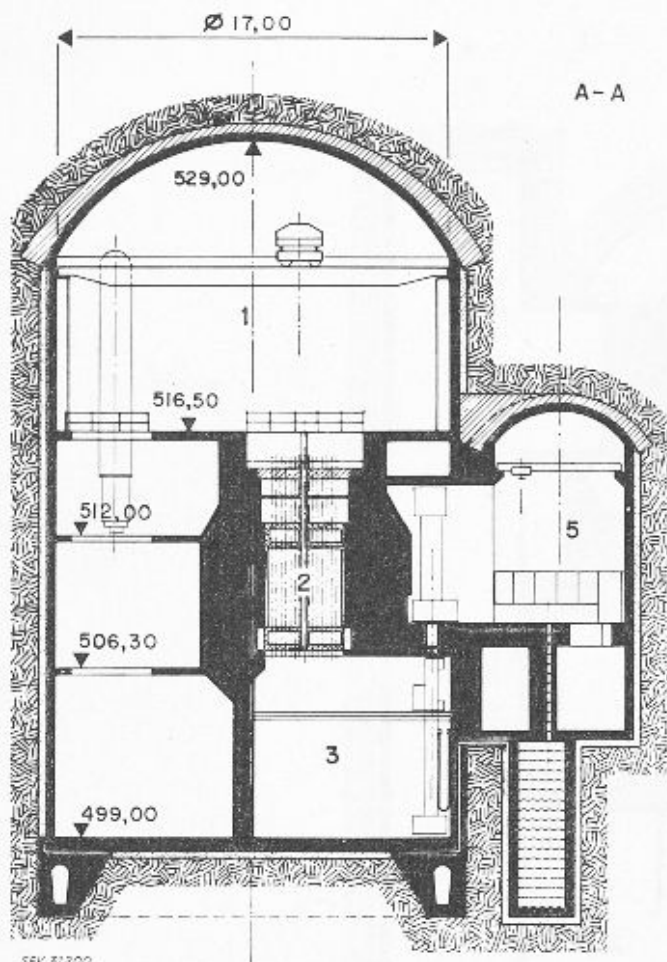
3.1 Emplacement de la centrale de Lucens

La centrale de Lucens est implantée sur la rive

gauche de la Broye, à 2 km de Lucens. Elle est située à 25 km environ de Lausanne et à environ 60 km de Berne. Une voie de chemin de fer et la route cantonale Lausanne-Berne longent la rivière et passent à proximité de la centrale (fig. 1).

Cet emplacement a été choisi parmi plusieurs autres en tenant compte au mieux de nombreuses conditions souvent contradictoires concernant la situation géographique, la topographie et la météorologie locales, les qualités du rocher et les disponibilités en eau de refroidissement.

Le terrain sur lequel sera construite la centrale est caractérisé par la présence d'un glacier d'une largeur de 200 m environ suivi d'un escarpement boisé dont le sommet est à plus de 100 m au-dessus de la rivière.



SVV 31200

Fig. 6. — Coupe verticale de la caverne du réacteur. (Légende : voir figure 4.)

Cet escarpement, dans lequel sera disposée la partie souterraine des ouvrages, est constitué de grès molasiques très homogènes disposés en couches presque horizontales.

3.2 Disposition générale (fig. 2 et 3)

Le réacteur, l'équipement producteur d'énergie et

une série d'équipements auxiliaires sont groupés dans trois cavernes. Les autres installations, dont la disposition sous terre n'est nécessitée ni par des raisons techniques ni par des raisons de sécurité, sont construites à l'extérieur.

Les déblais provenant de l'excavation des cavernes forment, devant l'entrée de la galerie d'accès, une plate-forme sur laquelle sont disposés le bâtiment de service, la station de traitement des effluents, la tour de réfrigération et le poste transformateur relié au poste de couplage de Lucens.

Sur le cours de la Broye, une prise d'eau et une station de pompage prélèvent le débit d'eau nécessaire à la centrale.

Au-dessus de l'escarpement est construite la station supérieure, qui abrite les installations d'évacuation de l'air de ventilation. A proximité s'élève la cheminée de ventilation, haute de 50 m environ. Un peu plus haut, le réservoir de 500 m³ constitue la réserve d'eau de la centrale.

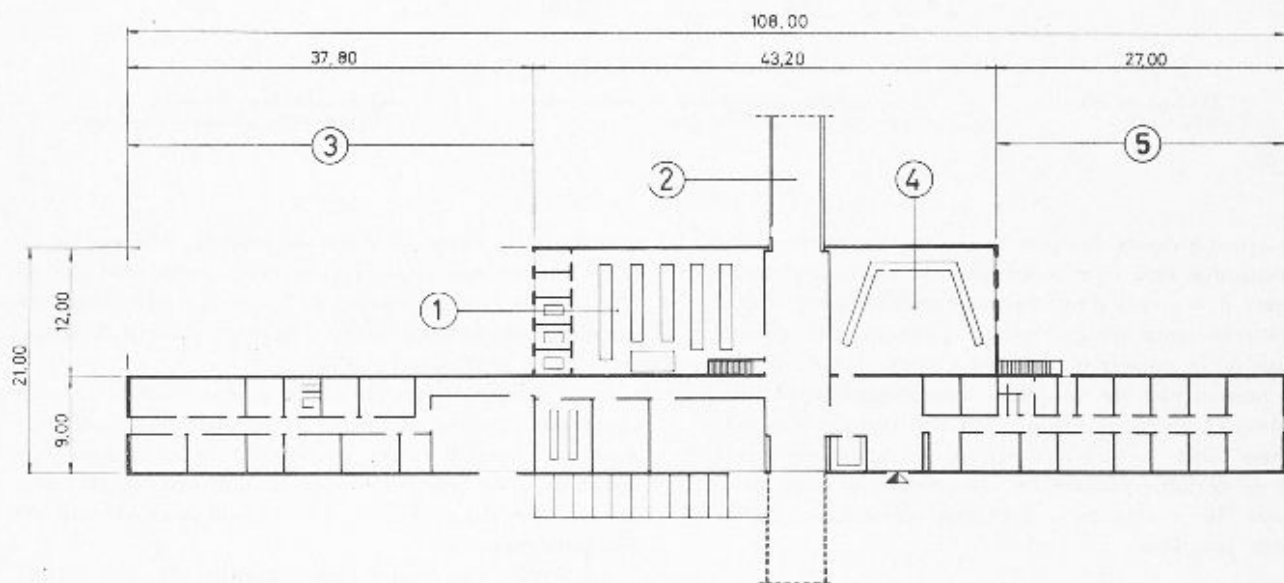
Des routes et des chemins permettent l'accès à ces différents ouvrages et les relient à la route cantonale d'une part, à une route secondaire (Lucens-Bussy), passant au nord de la centrale, d'autre part.

3.3 Les ouvrages souterrains (fig. 4, 5 et 6)

Les ouvrages souterrains sont répartis dans trois cavernes : la caverne du réacteur, la caverne des machines et celle de la piscine à combustible. Cette disposition présente, du point de vue de l'exploitation et de la sécurité, l'avantage d'une nette séparation d'une zone nucléaire et d'une zone conventionnelle.

Une galerie d'accès à deux étages relie ces ouvrages au bâtiment de service situé à l'extérieur. L'étage inférieur de cette galerie est réservé aux conduites et aux câbles.

Le réacteur, le circuit primaire, les deux générateurs de vapeur, les installations de défournement du combustible et les auxiliaires du réacteur se trouvent dans la caverne du réacteur. Une galerie de liaison munie d'un sas la relie à la caverne des machines.



SVV 31201

Fig. 7. — Plan du bâtiment de service.

1 Installations à courant fort 2 Galerie d'accès 3 Bloc des ateliers et laboratoires 4 Salle de commande 5 Bloc administratif

Dans l'aile sud-ouest de la caverne des machines sont disposés le groupe turbo-générateur et ses auxiliaires et des équipements de ventilation. Au milieu et au sous-sol se trouvent diverses installations électriques. L'aile nord-est est réservée aux installations de contrôle du personnel, de décontamination et de purification de l'eau de la piscine à combustible. A l'étage inférieur se trouve l'accès au local de la piscine. Un passage spécial permet de transférer les éléments combustibles de la caverne du réacteur à celle de la piscine.

Un puits vertical servant avant tout à la ventilation relie la caverne des machines avec la station supérieure située sur la colline.

3.4 Les ouvrages extérieurs

Le bâtiment de service (fig. 7) est disposé sur la plateforme principale à la sortie de la galerie d'accès. Il est formé d'un bloc administratif au nord-est, d'un bloc électro-mécanique au centre et d'un bloc des ateliers et laboratoires au sud-ouest.

Le bloc central comporte un rez-de-chaussée et un sous-sol. Les principaux éléments mécaniques qu'il abrite sont l'installation de production d'air comprimé, l'installation de stockage du CO_2 et l'installation d'appoint d'eau. Ces équipements sont groupés dans la moitié sud-ouest du bloc central dans laquelle on trouve encore les installations électriques à courant fort à 6 kV et à 380/220 V ainsi que l'alimentation de secours, Diesel et batteries. La moitié nord-est du bloc central est réservée aux installations à courant faible et à la salle de commande.

La plupart des installations pour le traitement des déchets radio-actifs se trouvent sur un terre-plein en contrebas et au sud-ouest de la terrasse principale. Leur disposition à l'extérieur de la caverne présente de nombreux avantages et ne pose pas de problème particulier de sécurité. Le traitement des déchets est une opération routinière qui ne présente aucun danger.

4. Réacteur

4.1 Description générale (fig. 8 en hors-texte)

Le réacteur de Lucens est modéré à l'eau lourde, refroidi au gaz carbonique (CO_2) et utilise comme combustible des barreaux d'uranium métallique gainés d'un alliage de magnésium et disposés dans des tubes de force.

Du point de vue constructif, le réacteur comporte deux systèmes indépendants : le modérateur d'une part, et le combustible et son système de refroidissement d'autre part.

Le modérateur est contenu dans une cuve cylindrique en aluminium de 3100 mm de diamètre et 3160 de hauteur; 73 tubes de 145 mm de diamètre intérieur en aluminium également sont soudés aux fonds supérieur et inférieur. Ils ménagent au travers du cœur et parallèlement à l'axe de la cuve autant d'espaces libres dans lesquels viendront s'insérer les éléments combustibles. En outre, 12 tubes analogues mais de diamètre plus faible permettent le passage des barres de réglage. La disposition de ces tubes est visible sur le schéma du réseau (fig. 9).

La température de l'eau lourde ne dépasse pas 80°C et elle se trouve sous une faible surpression. Dans ces conditions, l'aluminium s'impose comme matériau de construction grâce à sa bonne transparence aux neutrons.

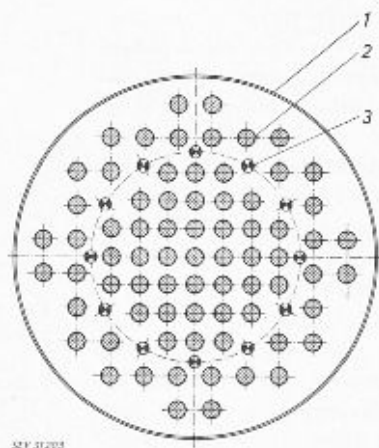
Le système des tubes de force, du combustible et de son refroidissement est fixé à un caisson métallique disposé au-dessus de la cuve du modérateur. Ce caisson, rempli d'eau, sert en même temps d'écran contre les radiations. Il est constitué de manière analogue à la cuve du modérateur. Dans chaque tube correspondant à un élément combustible se trouve une tête de raccord à la partie inférieure de laquelle les tubes de force sont suspendus par une fixation à baïonnette. Ces tubes de force plongent dans les tubes de la cuve du modérateur, laissant un espace annulaire en atmosphère de CO_2 qui sert d'isolant thermique. A la partie supérieure des têtes de raccord aboutissent les tuyauteries de CO_2 qui relie chaque élément combustible aux collecteurs d'arrivée du gaz froid et de départ du gaz chaud. Des vannes permettent de doser individuellement le débit de réfrigérant de chaque élément combustible.

La cuve du modérateur est entourée d'écrans cylindriques en acier, disposés à l'intérieur de l'écran biologique formé d'une paroi de béton d'environ 2,8 m d'épaisseur. Vers le bas, un caisson inférieur protège contre les radiations le local de la machine à défourner. La cuve du modérateur repose sur le caisson inférieur, et l'ensemble est construit de manière à pouvoir descendre la cuve dans le local de la machine à défourner pour permettre d'éventuelles réparations.

Le local de la machine à défourner n'est pas accessible pendant la marche du réacteur. Par contre, le plancher supérieur doit pouvoir être accessible pour un temps limité. C'est la raison pour laquelle un écran supplémentaire est disposé au-dessus des tuyauteries de distribution du CO_2 . Sur ce plancher est disposé l'outil déconnecteur destiné à manœuvrer les fixations à baïonnette attachant les tubes de force aux têtes de raccord. On y trouve également les treuils de manœuvre des barres de réglage.

Le local de la machine à défourner, les espaces entre les écrans en acier et l'écran biologique et le local des tuyauteries de distribution communiquent et sont en atmosphère de CO_2 stagnant en légère surpression pour empêcher toute entrée d'air. En service, la température de la chambre inférieure est d'environ 50°C , celle de la chambre des tuyauteries de distribution atteint 300°C .

Fig. 9.
Schéma du réseau.
1 Cuve du modérateur
2 Élément de combustible
3 Barre de contrôle



4.2 Tubes de force et éléments combustibles (fig. 10)

Une des caractéristiques les plus originales du réacteur de Lucens est constituée par ses tubes de force démontables. Ils forment avec l'élément combustible qu'ils contiennent une unité qui est défournée d'un bloc. Cette solution donne au réacteur sa flexibilité, il est en effet possible d'utiliser, même simultanément, des éléments de différents types.

Les tubes de force supportent la pression du réfrigérant, qui est en moyenne de 60 ata. Ils sont balayés intérieurement par le CO₂ « froid » entrant dans l'élément à une température nominale de 220° C. Le seul matériau offrant une résistance mécanique suffisante jointe à une bonne tenue à la corrosion et une faible absorption de neutrons est le zircaloy-2 (un alliage à base de zirconium). Les tubes de force sont fermés à leur extrémité inférieure, le réfrigérant descend le long des parois intérieures du tube et remonte au travers de l'élément combustible proprement dit. A la jonction avec la tête de raccord, le réfrigérant circule dans deux canaux concentriques. Le joint extérieur seul est soumis à la pression totale. Un système à ressort assure une pression régulière et constante et garantit l'étanchéité de ce joint. Le joint intérieur n'est soumis qu'à la faible différence entre les pressions à l'entrée et à la sortie de l'élément. En outre, la tolérance d'étanchéité est assez large. Ce joint est réalisé par deux emboîtements à faible jeu, un volume annulaire entre ces emboîtements servant à la fois de labyrinthe et d'isolant thermique.

L'élément combustible proprement dit se compose d'un support de graphite inséré dans le tube de force et verrouillé au fond par un dispositif à baïonnette. Il est percé de 7 canaux dans lesquels sont insérés 7 barreaux d'uranium. Le support sert à la fois à guider le réfrigérant et à soutenir les barreaux de combustible.

Chaque barreau de combustible est un assemblage de 2,765 m de longueur obtenu en vissant quatre segments l'un sur l'autre. Les barreaux sont solidaires du support en graphite à leur extrémité inférieure. Ils sont libres de se dilater vers le haut dans leur canal.

Les segments sont constitués par un cylindre d'uranium faiblement allié de 17 mm de diamètre et 650 mm de longueur enfermé dans une gaine étanche aux gaz de 1,75 mm d'épaisseur en alliage de magnésium. Cette gaine est munie d'ailettes destinées à améliorer le transfert de chaleur.

4.3 Les barres de réglage

Les barres de réglage sont constituées par deux tubes concentriques enfermant dans l'espace annulaire qui les sépare un alliage de cadmium-argent qui est opaque aux neutrons. Elles sont refroidies à l'intérieur et à l'extérieur par un courant de CO₂. Elles sont suspendues à des câbles manœuvrés par des treuils situés sur le plancher supérieur du réacteur. Les barres sont constamment guidées dans leur mouvement. Elles sont munies d'interrupteurs de fin de course, d'indicateur de tension du câble, d'amortisseurs, etc. Il est possible de les démonter au moyen de la machine à défourner.

4.4 Physique du réacteur

Le réacteur de Lucens est conçu comme la première réalisation d'une filière de réacteurs à uranium naturel,

modérés à l'eau lourde et utilisant des tubes de force. Il doit permettre d'éprouver en service des équipements et des éléments combustibles; l'accent n'a pas été porté sur l'optimisation physique du cœur. On a plutôt cherché à obtenir dans un réacteur de dimension et de coût réduits des conditions d'exploitation comparables à celles d'un réacteur à grande puissance utilisant de l'uranium naturel.

Il convenait en particulier de rechercher une densité de puissance relativement forte. Pour le réacteur de Lucens, dont la puissance thermique n'est que de 30 MW, cela conduit à un volume modeste du cœur pour lequel les fuites neutroniques sont importantes (13 % $\Delta k/k$ environ). Cela implique un facteur de multiplication k_{∞} relativement élevé, qu'on ne peut atteindre qu'en enrichissant légèrement le combustible.

Une série d'études paramétriques a montré qu'un élément combustible formé d'une grappe de 7 barreaux permet la meilleure utilisation des neutrons, pour une densité de puissance maximum dans le cœur voisine de 6 MW/m³ et des conditions thermiques du circuit primaire données.

Pour augmenter encore la densité de puissance moyenne, on a recherché un aplatissement radial du flux neutronique en divisant le cœur en deux zones de pas différents.

L'investissement minimum en uranium et en eau lourde est obtenu pour un pas de 24 cm dans la zone centrale et de 29 cm dans la zone extérieure, et un rapport du rayon de la zone centrale au rayon du cœur voisin de 0,6.

Le réseau finalement adopté est représenté dans la figure 9. Il comporte un réflecteur annulaire entre les deux zones dans lequel

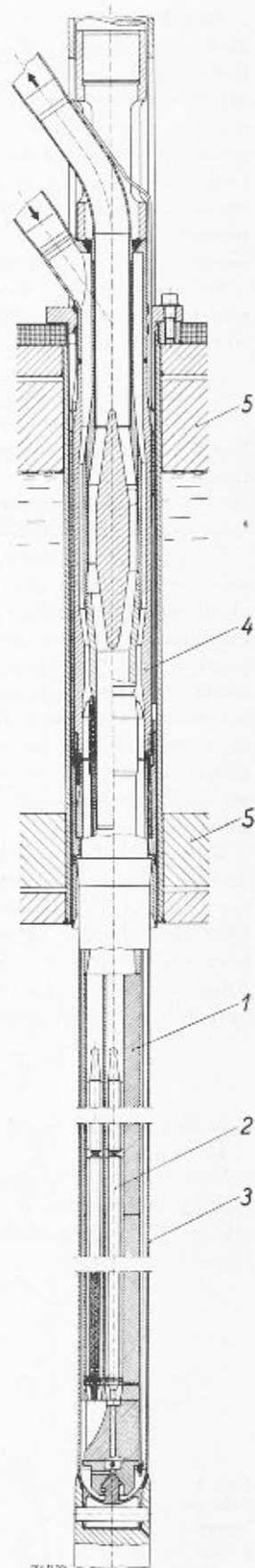
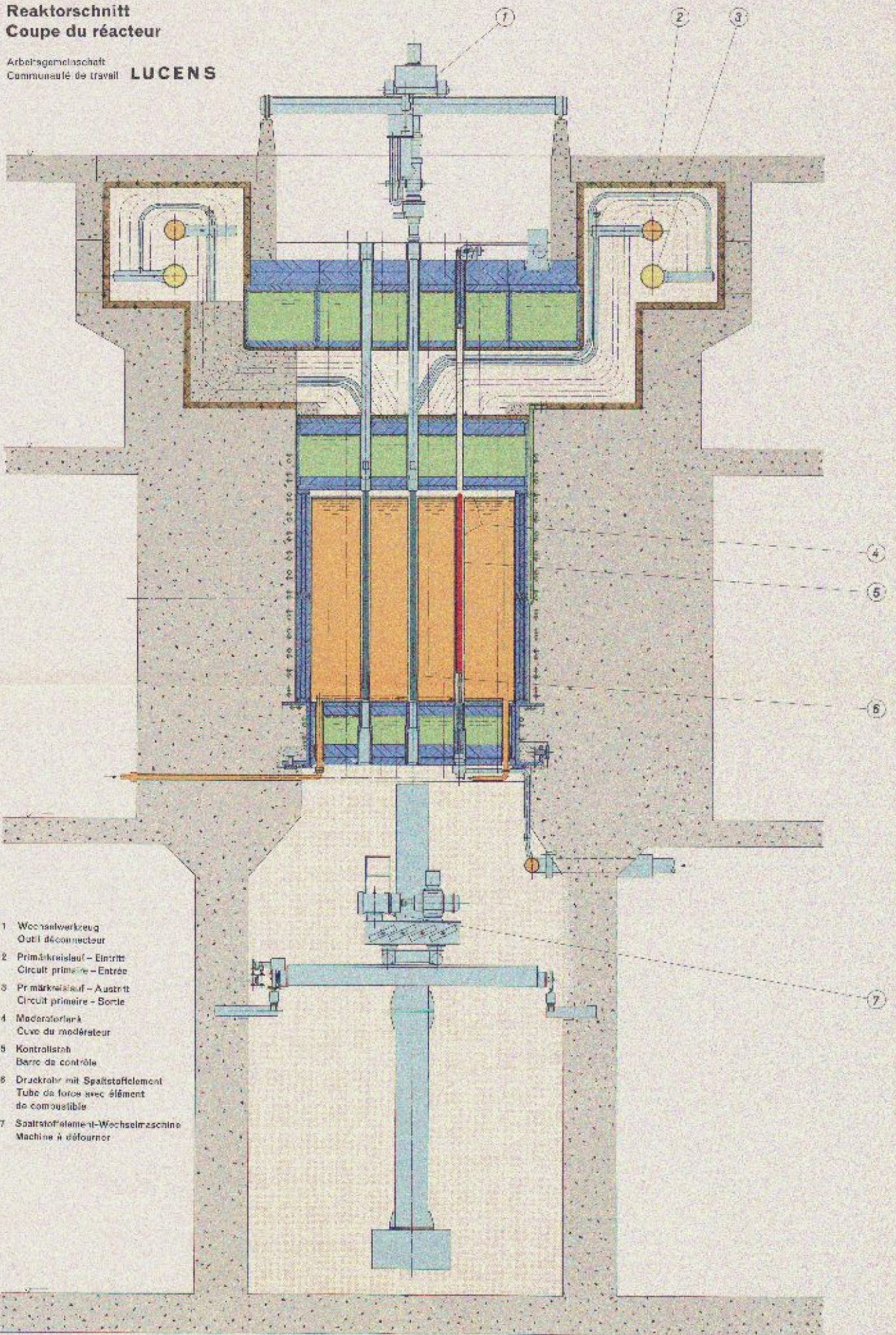


Fig. 10.
Elément de combustible.

- 1 Support en graphite
- 2 Segment de combustible
- 3 Tube de force
- 4 Conduite extérieure
- 5 Caisson supérieur

Reaktorschnitt Coupe du réacteur

Arbeitsgemeinschaft
Communauté de travail **LUCENS**



- 1 Wechselwerkzeug
Outil déconnecteur
- 2 Primärkreislauf - Eintritt
Circuit primaire - Entrée
- 3 Primärkreislauf - Austritt
Circuit primaire - Sortie
- 4 Moderatorwanne
Cuve du modérateur
- 5 Kontrollstab
Barre de contrôle
- 6 Druckrohr mit Spaltstoffelement
Tube de force avec élément
de combustible
- 7 Spaltstoffelement-Wechselmaschine
Machine à défournir

Seite / page

leer / vide /
blank

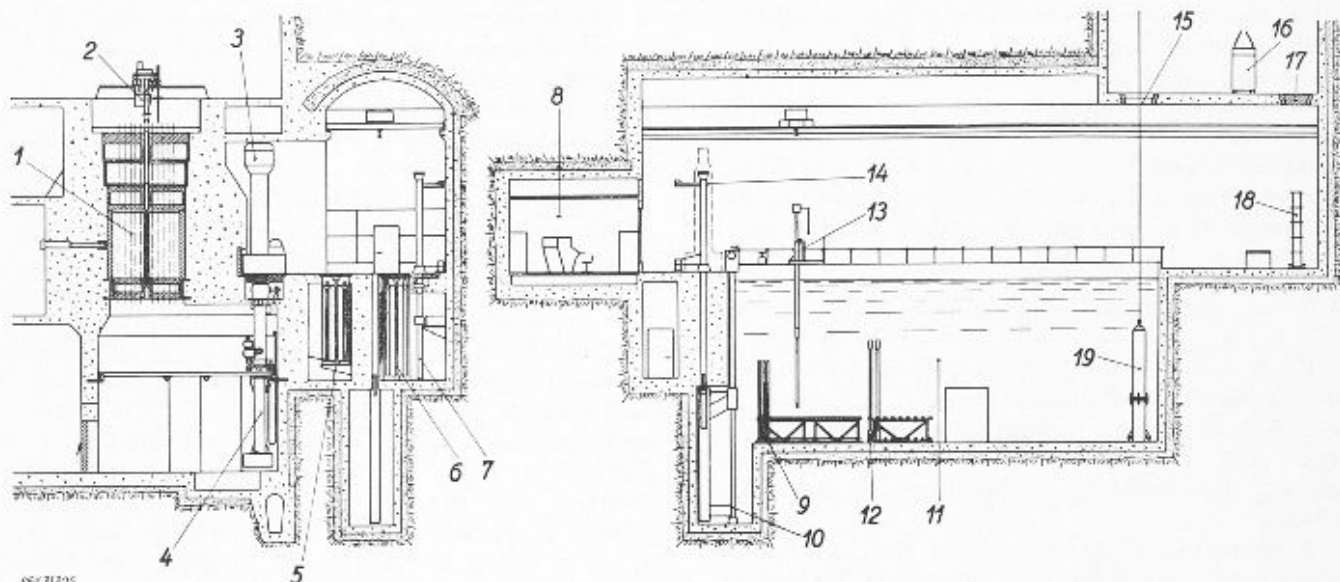


Fig. 11. — Installations de manutention du combustible.

- 1 Réacteur
- 2 Outil déconnecteur
- 3 Hotte de transfert
- 4 Machine à défourner
- 5 Carrousel de stockage des éléments neufs
- 6 Carrousel de stockage des tubes de force de réserve
- 7 Dispositif de dénoyage des tubes de force
- 8 Salle de commande du défournement
- 9 Éléments irradiés
- 10 Manipulateur

- 11 Piscine à combustible
- 12 Éléments irradiés défectueux
- 13 Pont roulant
- 14 Dispositif de séchage des tubes de force
- 15 Passage pour la sortie des éléments irradiés
- 16 Container pour le transport d'éléments neufs
- 17 Passage pour l'entrée des éléments neufs
- 18 Dispositif d'assemblage des éléments
- 19 Hotte de transfert des éléments irradiés défectueux

sont disposées les barres de réglage, ainsi qu'un réflecteur extérieur.

Le cœur étant ainsi défini, les calculs neutroniques permettent d'en déterminer les caractéristiques constructives. Toutefois, l'enrichissement définitif ne sera fixé qu'en tenant compte des résultats d'un programme expérimental actuellement en cours.

Parmi les problèmes particuliers qui se posent, le principal est sans doute celui que soulève la présence dans le cœur des canaux de refroidissement et des espaces entre tube de force et tube de la cuve du modérateur qui se comportent du point de vue neutronique comme des vides. Il en résulte que les coefficients de diffusion du réseau sont notablement plus élevés que ceux du modérateur. En outre, ces vides étant disposés suivant une même direction, la diffusion des neutrons sera anisotrope et les coefficients de diffusion se dédoublent en une composante axiale et une composante radiale. Enfin, les chances de fuites de neutrons par vol direct aux extrémités des canaux sont accrues.

Les dimensions relativement grandes de l'élément combustible par rapport au cœur rendent difficile l'appréciation du degré de précision des équations de la théorie à deux groupes.

Une série d'études et d'essais permettra de tirer au clair ces questions. Il s'agit en particulier d'essais sous-critiques dans l'assemblage de l'Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs à Wurenlingen et d'essais critiques qui seront effectués probablement à l'étranger.

Les calculs effectués pour l'instant se basent sur les conditions suivantes :

Combustible : Alliage d'uranium avec 1 % de Mo.
 Densité, 18,5 g/cm³.
 Enrichissement, 0,93 % U 235.

Modérateur : Pureté isotopique, 99,75 %.
 Température, 50°C.

Puissance spécifique maximum : 12 MW/t uranium.

Taux de combustion moyen : 3000 MW jour/t uranium.

Pour un cœur froid et non empoisonné, on obtient les valeurs suivantes :

	Zone intérieure	Zone extérieure
Pas	24 cm	29 cm
Rapport volumétrique modérateur à uranium	25,4	42
Nombre de neutrons produits par neutron absorbé dans le combustible		
η	1,4588	1,4588
Facteur de fissions rapides	ϵ 1,0142	1,0142
Facteur anti-trappe	p 0,8725	0,9187
Facteur d'utilisation thermique	f 0,9227	0,9164
Facteur de multiplication	k_{∞} 1,1911	1,2456

En théorie à deux groupes, le calcul de la réactivité donne

$$k_{eff} = 1,074.$$

D'autre part, le bilan de réactivité s'établit ainsi :

	% $\Delta k/k$
Température	0,5
Empoisonnement Xe et Sm	2,8
Effet Doppler	0,9
Epuisement du combustible et pilotage	3,4
Total	7,6

Une légère correction de l'enrichissement sera encore nécessaire pour ajuster la réactivité à cette valeur.

4.5 Les écrans

Pour protéger le personnel, pour limiter l'activation d'éléments essentiels qui doivent pouvoir être réparés, et pour protéger certains appareils et matériaux sen-

sibles aux radiations, il convient d'entourer le réacteur d'un système d'écrans contre les neutrons et les rayons γ . Ces écrans consistent en plusieurs éléments où le fer, l'eau et le béton atténuent ou absorbent les radiations émises par le réacteur. Ces écrans sont calculés de manière à réduire l'intensité des radiations à un niveau correspondant à 25 mrem/h¹ lorsque le réacteur est en service et à moins de 2,5 mrem/h¹ un jour après l'arrêt du réacteur.

4.6 Les installations de manutention du combustible (fig. 11)

Ces installations assurent le transport des éléments de combustible, des tubes de force et des barres de réglage de la piscine à combustible au réacteur et vice-versa. Elles doivent satisfaire à de nombreuses exigences, en particulier pour le déchargement d'éléments irradiés.

Pour des raisons de sécurité qui sont exposées au chapitre 8, il faut assurer en tous temps l'étanchéité aux gaz entre la caverne du réacteur et celle de la piscine à combustible.

Les éléments de combustible irradiés sont fortement radio-actifs. Il faut donc prévoir des écrans et des commandes à distance pour assurer la protection du personnel. En outre, ces éléments dégagent une certaine chaleur résiduelle, il n'est donc pas possible de les laisser plus d'un certain temps sans refroidissement.

Enfin, les éléments pouvant dégager des gaz radio-actifs en cas de défaut de gainage, il faut sceller leur tube de force avant de les introduire dans le local de la piscine.

Par contre, le réacteur de Lucens n'exige pas de remplacement fréquent de son combustible. Il n'est donc pas nécessaire de prévoir des installations capables de fonctionner pendant la marche du réacteur.

Avant de pouvoir procéder au défournement, il faut

¹ Le rem est une unité mesurant l'effet biologique des radiations.

réduire au niveau atmosphérique la pression du circuit de refroidissement du réacteur. Cet abaissement n'est possible que plusieurs heures après l'arrêt du réacteur, lorsque le dégagement de chaleur retardée a diminué à un point tel que le débit réduit des soufflantes suffit au refroidissement du cœur.

Pour l'opération de défournement proprement dite, l'outil déconnecteur, situé sur le plancher supérieur du réacteur, et la machine à défourner, située sous le réacteur, sont placés au droit de l'élément à défourner. L'élévateur de la machine à défourner vient saisir la base du tube de force. Il est alors possible, au moyen de l'outil déconnecteur, de déconnecter la tête de raccord à laquelle le tube de force est suspendu. L'élévateur de la machine à défourner abaisse le tube de force et l'élément qu'il contient, tandis qu'au moyen de l'outil déconnecteur, on adapte un couvercle à la tête de raccord pour refermer le circuit de refroidissement du réacteur. La machine à défourner se déplace au droit de l'orifice de restitution, fermé par une vanne qui obture normalement cet orifice et assure l'étanchéité entre le local de la machine à défourner et la caverne de la piscine.

La machine à défourner n'est pas blindée, l'accès à son local n'est pas possible lorsqu'elle contient un élément irradié. Elle est commandée à distance à partir d'un pupitre de commande situé dans la caverne de la piscine.

Dans ce local se trouve une hotte de transfert comportant un fort blindage en plomb. Celle-ci vient se placer au-dessus de la vanne de transfert. Celle-ci est ouverte et le treuil de la hotte descend un grappin qui saisit le tube de force et le hisse dans la hotte. La hotte se déplace ensuite jusqu'au-dessus du puits d'immersion dominant la piscine à combustible. On peut alors descendre le tube de force et son élément combustible.

Dans le local de la machine à défourner se trouvent en outre deux stations commandées du local de la

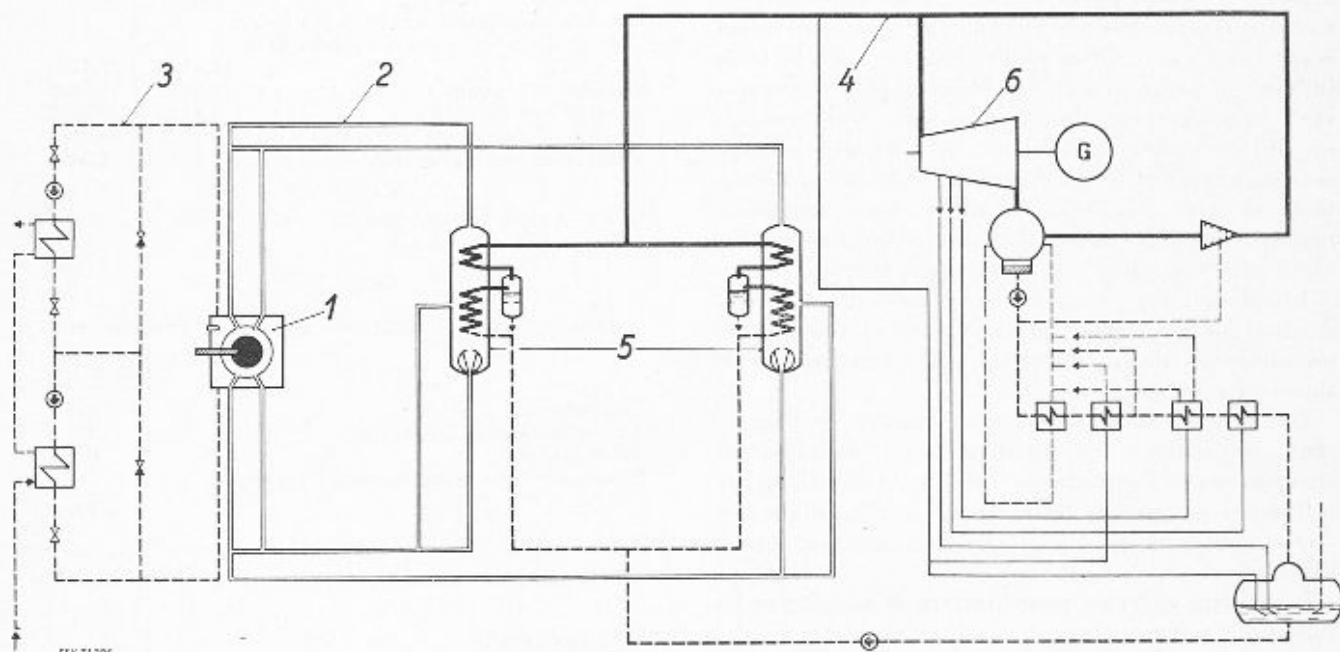


Fig. 12. — Circuits thermiques.

- | | | |
|---------------------------------------|--|-------------------------|
| 1 Réacteur | 3 Circuit du modérateur (D ₂ O) | 5 Générateurs de vapeur |
| 2 Circuit primaire (CO ₂) | 4 Circuit secondaire (H ₂ O) | 6 Turbine |

piscine. La première permet de sceller le tube de force d'un élément défectueux et de le mettre sous pression de CO_2 afin d'assurer un transfert de chaleur suffisant de l'élément au tube de force. L'autre permet le cas échéant de déverrouiller l'élément qui sera ensuite hissé seul dans la hotte, le tube de force restant dans la machine à défourner et attendant un élément neuf. Ce dispositif permet de simplifier l'ensemble des opérations de remplacement d'un élément et sera utilisé lorsqu'il ne sera pas jugé nécessaire d'amener le tube de force dans le local de la piscine.

Dans la piscine se trouvent des rateliers et divers dispositifs de manipulation qui sont manœuvrés à vue. Au-dessus de la piscine se trouvent en outre des carrousels où sont entreposés les éléments neufs et les tubes de force, ainsi qu'un dispositif de dénoyage et de séchage des tubes de force, etc.

La piscine est pourvue d'un revêtement étanche. Elle est équipée d'un système de réfrigération et de purification de l'eau.

Une série de verrouillages dans la commande de ces diverses installations empêche toute fausse manœuvre.

5. Les installations thermiques (fig. 12)

Les installations thermiques de la centrale peuvent être classées en deux catégories : les circuits principaux qui interviennent dans la production d'énergie utile, et les auxiliaires qui remplissent diverses fonctions de refroidissement et dont la chaleur est perdue.

À la première catégorie appartiennent les circuits primaire, secondaire et tertiaire. Le circuit primaire refroidit le réacteur et transporte la chaleur qu'il produit aux générateurs de vapeur où elle est transmise au circuit secondaire. Celui-ci cède une part de son énergie à la turbine. Le reste passe dans le circuit tertiaire comme perte au condenseur.

Le principal des auxiliaires thermiques est le système du modérateur, qui refroidit et purifie l'eau lourde. En outre, des dispositifs de refroidissement des écrans, des barres de contrôle, de la piscine à combustible, etc., sont prévus. Ces circuits auxiliaires cèdent leur chaleur à un circuit intermédiaire et de là au circuit tertiaire. Enfin, un dispositif de refroidissement de secours permet d'évacuer la chaleur résiduelle du réacteur en cas d'interruption complète des diverses alimentations électriques.

5.1 Le circuit primaire

Le fluide de refroidissement du circuit primaire est du gaz carbonique (CO_2) sous une pression moyenne de 60 ata et une température maximum d'environ 385° C. Cette température est limitée par les propriétés des barreaux de combustible en uranium métallique. Le circuit primaire est toutefois calculé pour une température maximum admissible de 520° C, ce qui permettra d'utiliser éventuellement par la suite des éléments supportant une température plus élevée.

Le circuit primaire comporte deux boucles couplées en « série ». Le gaz provenant d'une moitié du réacteur passe dans un des générateurs de vapeur puis dans l'autre moitié du réacteur et l'autre générateur de vapeur. Les deux soufflantes sont incorporées aux extrémités froides des deux échangeurs. Des vannes à

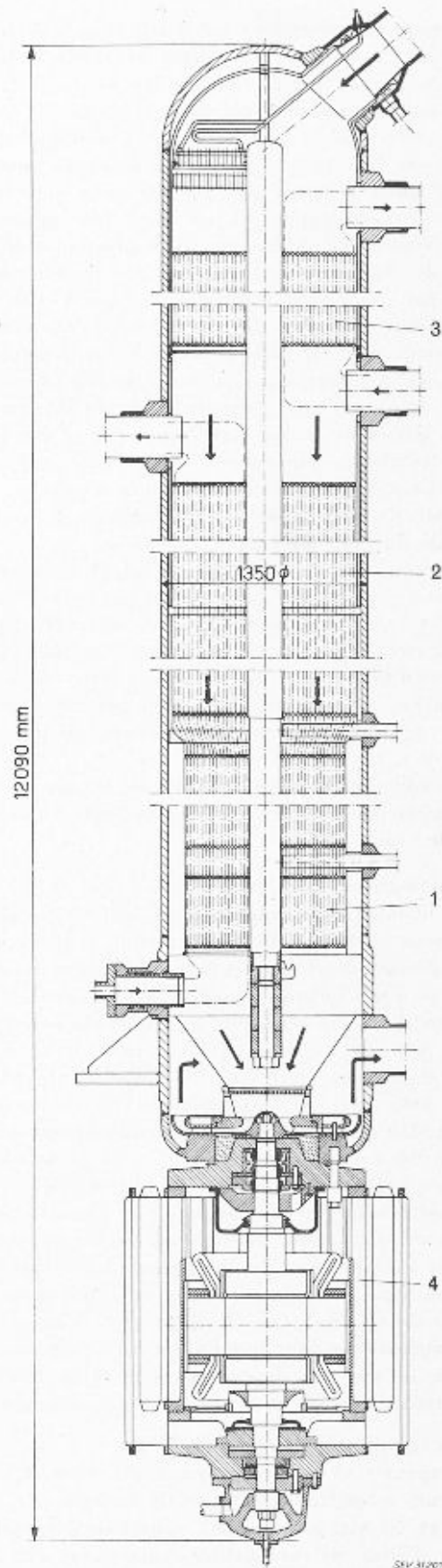


Fig. 13. — Générateur de vapeur et soufflante.
1 Préchauffeur 2 Evaporateur 3 Surchauffeur
4 Soufflante et moteur

la sortie des soufflantes permettent le réglage du débit par étranglement ainsi que la mise hors-circuit d'une unité soufflante — générateur de vapeur en cas d'avarie.

Des liaisons transversales permettent alors le refroidissement de l'ensemble du réacteur avec l'autre unité, mais la puissance doit en tout cas être réduite.

Le circuit primaire est entièrement soudé, à l'exception de l'assemblage par flasque des soufflantes aux générateurs de vapeur. Les raccords auxiliaires ont des sections aussi réduites que possible pour limiter les risques de perte rapide de pression. Les organes de réglage sont munis de dispositifs d'aspiration et d'indication des fuites. L'entraînement des soufflantes est assuré par des moteurs asynchrones à 6 kV et 3000 tours/minute. En cas de perte de tension du réseau 6 kV, des enroulements auxiliaires à 380 V continuent d'entraîner les soufflantes à 750 tours/minute. Les générateurs de vapeur sont disposés au-dessus du réacteur si bien que dans le cas, fort improbable, d'une interruption totale de l'alimentation électrique, une circulation naturelle s'établira. Elle suffira à évacuer vers le circuit de refroidissement de secours la chaleur résiduelle du réacteur arrêté.

Les générateurs de vapeur (fig. 13) sont à circulation forcée avec séparateurs d'eau centrifuges entre l'évaporateur et le surchauffeur. Le fluide secondaire (eau-vapeur) circule de bas en haut dans des tubes lisses disposés en hélice. Le CO_2 circule en contre-courant de haut en bas. Le manteau du générateur est à double paroi avec refroidissement intermédiaire par une dérivation de CO_2 .

Les soufflantes radiales à un étage sont munies d'un joint mécanique à deux chambres, le fluide de barrage étant de l'eau.

5.2 Installations auxiliaires pour le CO_2

Une installation auxiliaire pour le CO_2 permet le stockage et le séchage du gaz d'appoint, la purification du gaz du circuit primaire et le stockage du contenu du circuit primaire lorsque celui-ci doit être décomprimé.

Le gaz d'appoint sera livré à la centrale sous forme liquide sous une pression de 15 ata à -30°C , il sera entreposé dans un réservoir à 65 ata et 25°C relié au circuit primaire par l'intermédiaire de batteries de séchage. L'appoint est réglé automatiquement par la pression du circuit primaire.

Le dispositif de purification du gaz du circuit primaire est branché en dérivation sur ce dernier. Le gaz est extrait aux joints mécaniques des soufflantes et réinjecté à l'aspiration des soufflantes. Le circuit comporte un séparateur de poussière, un filtre fin et une batterie de séchage. Ces éléments sont doublés, l'un étant régénéré pendant que l'autre est en service.

Enfin, un système de compresseurs et un réservoir permettent d'entreposer le gaz du circuit primaire.

5.3 Le circuit secondaire

La vapeur vive est produite à 370°C sous 21,5 ata. Le circuit secondaire est toutefois dimensionné pour 500°C et 60 ata, en vue de l'utilisation éventuelle à l'avenir d'éléments combustibles supportant une température plus élevée. Pour limiter le coût de l'installation, un cycle thermique extrêmement simple a été adopté au détriment du rendement thermodynamique. Il est évident qu'une installation de plus grande puissance serait beaucoup plus poussée de ce côté.

La turbine est une unité à action de conception classique. Elle délivre 8,55 MW à 3000 tours/minute. Elle

comporte des joints d'étanchéité spéciaux sans fuites. Si le réacteur devait ultérieurement être refroidi à la vapeur, il serait ainsi possible d'utiliser directement dans la turbine la vapeur du circuit primaire.

Après détente dans la turbine, la vapeur passe au condenseur. Le condensat traverse deux préchauffeurs à basse pression et atteint la bêche alimentaire qui sert de troisième préchauffeur. De là deux des trois pompes d'alimentation l'envoient aux générateurs de vapeur.

En cas de rupture d'un tube d'un générateur de vapeur, le CO_2 du circuit primaire dont la pression est de 60 ata pénétrera dans le circuit secondaire. Comme l'éjecteur du condenseur n'a pas une capacité suffisante, on a prévu pour ce cas une fermeture automatique rapide du côté secondaire du générateur de vapeur. En outre, une montée de la pression au condenseur entraîne la fermeture des vannes d'admission à la turbine et de la vanne de réglage de la pression des générateurs de vapeur.

Par mesure de sécurité et pour empêcher que de la vapeur ou du gaz carbonique du circuit primaire ne puissent être relâchés dans la caverne des machines, un réservoir spécial collecte les échappements de toutes les vannes de sécurité du circuit secondaire.

5.4 Le circuit tertiaire

Le circuit tertiaire, qui assure le refroidissement du condenseur et des circuits auxiliaires, doit évacuer à pleine charge environ 23 000 kW. Établi sous forme de cycle semi-ouvert, il comporte une tour de réfrigération atmosphérique à deux ou trois cellules.

Le débit d'eau à travers la tour est d'environ 800 l/sec; cette eau est constamment renouvelée par un apport d'environ 100 l/sec provenant de la Broye afin d'éviter la concentration des sels dissous; une telle disposition présente l'avantage de rendre inutile un traitement chimique préalable complet de l'eau de la Broye.

En cas d'arrêt momentané de la station de pompage, le circuit tertiaire peut être alimenté pendant une heure environ au moyen du contenu du réservoir supérieur.

5.5 Le circuit du modérateur

Les exigences posées à ce circuit sont sévères. Il s'agit de refroidir et purifier l'eau lourde. À cause du prix de l'eau lourde, il convient de limiter son volume et ses pertes. Il faut la maintenir à un degré de pureté nucléaire suffisant et enfin éviter toute corrosion de la cuve du modérateur.

Le modérateur est envoyé du réacteur à deux unités de refroidissement disposées en série, chacune comportant une pompe et un échangeur, et retourne au réacteur. Le secondaire des échangeurs est refroidi par le circuit intermédiaire. La température maximum de l'eau lourde à la sortie du réacteur peut atteindre 80°C . Elle est fixée par réglage du débit de l'eau de refroidissement. Chacune des unités pompe-échangeur peut être isolée, l'autre assurant seule le service par des lignes by-pass munies de vannes automatiques. En cas de panne de la deuxième unité, il faut arrêter le réacteur. La pompe d'appoint peut alors assurer une circulation suffisante à éviter une vaporisation du modérateur sous l'effet de la chaleur résiduelle.

Un réservoir d'expansion alimenté en dérivation assure un dégazage permanent par ruissellement en atmosphère d'hélium. Les gaz provenant de la décomposition de l'eau lourde sous l'effet des radiations sont recombinaés dans un catalyseur.

Le contrôle de l'activité du circuit intermédiaire permet de déceler des fuites dans les échangeurs. Un réservoir peut recevoir le modérateur s'il s'avère nécessaire de vider le circuit, par exemple pour effectuer des réparations.

Du fait de l'activité du modérateur, son circuit est disposé dans un local protégé par des écrans. Les vannes principales du circuit sont commandées à distance et leurs moteurs sont disposés à l'extérieur des écrans. Elles sont munies d'un dispositif d'étanchéité avec contrôle des fuites.

Un dispositif en dérivation fait passer une partie du débit d'eau lourde au travers d'une installation de purification dont l'objet est de diminuer la radiolyse en éliminant les impuretés en solution ou en suspension et d'empêcher la corrosion en maintenant une faible concentration de sels et un pH convenable. Le traitement consiste en filtration préalable, déminéralisation par échange d'ions et filtration finale. Cette installation très souple comporte des éléments doublés ou triplés

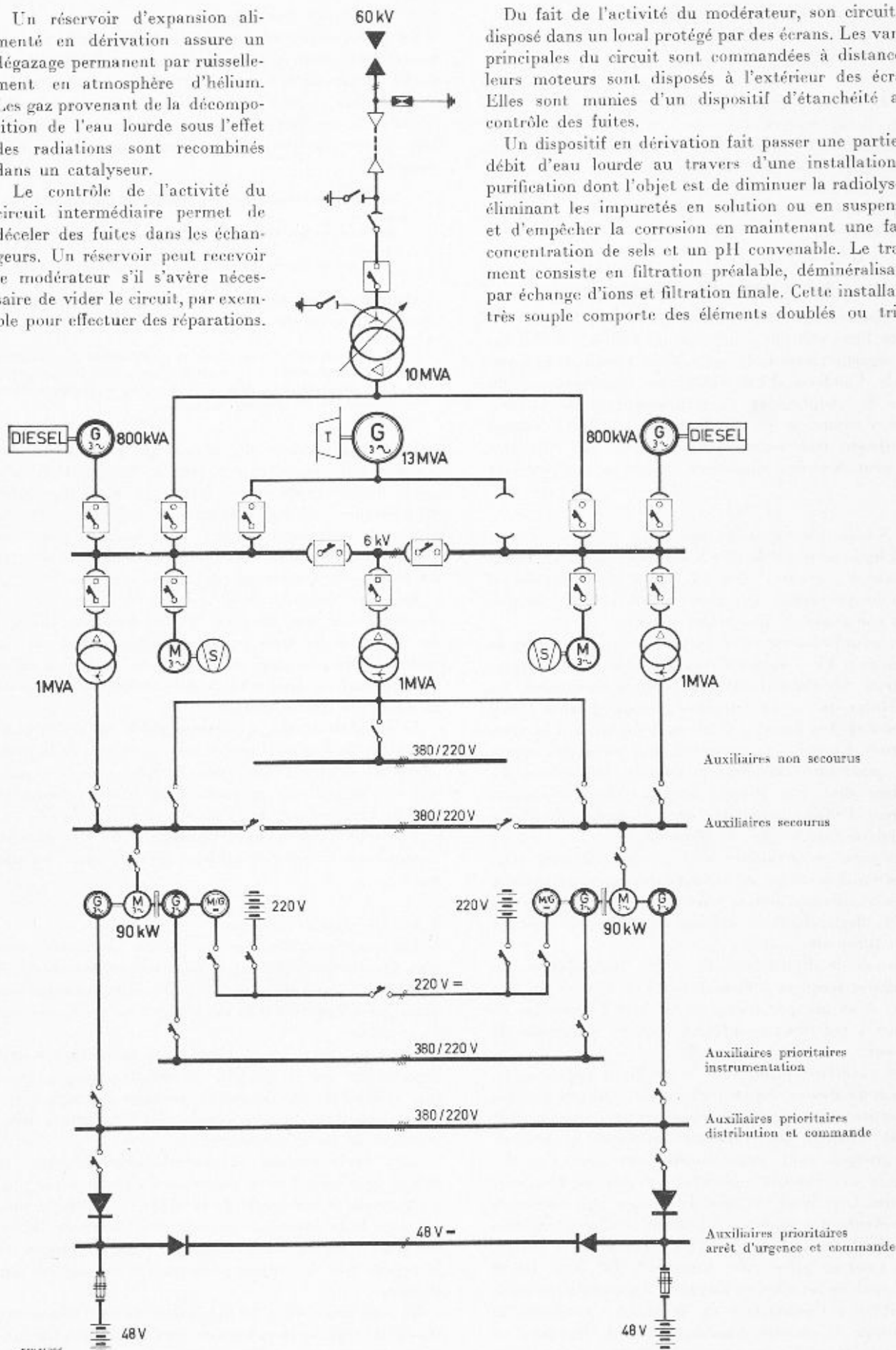


Fig. 14. — Schéma général unifilaire.

dont un seul suffit au service. Un écran sépare le circuit d'eau lourde des installations de purification qui sont ainsi accessibles en service.

5.6 Le circuit de refroidissement intermédiaire

Ce circuit reprend la chaleur des divers dispositifs auxiliaires de refroidissement et la transmet au circuit tertiaire. Il utilise de l'eau déminéralisée contenant des inhibiteurs pour éviter l'encrassement des échangeurs qui se trouvent dans la caverne du réacteur et simplifier leur entretien.

6. Les installations électriques

6.1 Raccordement de la centrale au réseau

Une ligne aérienne indépendante à 60 kV de 2,9 km de longueur raccorde la centrale au réseau de la Compagnie Vaudoise d'Electricité par l'intermédiaire du poste de couplage et de transformation de Lucens. Celui-ci comporte un jeu de barres à 130 kV auquel aboutissent trois lignes indépendantes. Son alimentation peut donc être considérée comme particulièrement sûre.

6.2 Schéma général de la centrale (fig. 14)

La ligne aérienne de 60 kV est raccordée à un transformateur à gradins 60/6 kV de 10 MVA disposé en plein air qui permet de maintenir une tension pratiquement constante sur le système à 6 kV.

Le transformateur est relié par câble à la station de couplage 6 kV à laquelle sont raccordés l'alternateur, les trois transformateurs des services auxiliaires, les soufflantes du circuit primaire et deux groupes Diesel de secours. Les barres à 6 kV sont subdivisées en trois tranches. En cas de court-circuit, une protection rapide isole quasi instantanément la tranche défectueuse. Le réacteur doit être arrêté, mais les tranches saines assurent l'alimentation des services indispensables à l'évacuation de la chaleur résiduelle.

Les services auxiliaires sont groupés en trois catégories selon le degré de sécurité de leur alimentation.

Les auxiliaires non secourus sont mis hors service lors du déclenchement simultané de la ligne à 60 kV et du turbo-alternateur.

En cas de déclenchement de ces deux sources, les auxiliaires secourus sont maintenus en service par l'un ou les deux groupes Diesel de secours. Un manque de tension à cet échelon entraîne un arrêt d'urgence du réacteur.

Les auxiliaires prioritaires ne souffrent aucune interruption de service. Ils sont alimentés par deux groupes convertisseurs à quatre machines munis chacun d'un volant d'inertie qui stabilisent fréquence et tension. Ces groupes sont normalement entraînés par des moteurs asynchrones connectés au système auxiliaire secouru. Lors d'un manque de tension aux bornes de ces moteurs, des machines à courant continu connectées à des batteries spéciales à 220 V reprennent la charge.

Le système prioritaire alimente à 220 V/50 Hz et 48 V continu les circuits suivants : les auxiliaires indispensables à l'évacuation de la chaleur résiduelle et l'éclairage de secours, l'instrumentation thermique et nucléaire, le circuit de commande, les circuits de signalisation et la chaîne d'arrêt d'urgence.

6.3 Contrôle du flux neutronique

La puissance du réacteur est proportionnelle au flux neutronique dont la mesure s'étend sur dix décades à partir du niveau de source. Pour afficher, enregistrer et régler le flux et pour la protection automatique contre un flux ou un taux d'accroissement du flux (période) trop élevé, on utilise trois canaux de mesure bien distincts :

- un canal de démarrage à 2 chaînes de mesure indépendantes ;
- un canal logarithmique à 3 chaînes de mesure indépendantes ;
- un canal de sûreté à 4 chaînes de mesure indépendantes.

Deux règles essentielles président à la conception du système de contrôle :

- le dérangement d'un élément quelconque du système ne doit pas entraîner un arrêt intempestif du réacteur ;
- tout dérangement doit faire évoluer le système dans le sens de la sécurité maximum.

Les deux chaînes de démarrage permettent des mesures qui s'étendent sur près de quatre décades à partir du niveau de source. Dans cette zone, la montée en puissance s'effectue à la main. Lorsque la puissance atteint la zone intermédiaire, la commutation sur les chaînes logarithmiques s'effectue automatiquement et les chaînes de démarrage sont mises hors service.

Le canal logarithmique permet des mesures qui s'étendent sur sept décades. Il comporte trois chaînes. La moyenne des trois signaux qu'elles fournissent est utilisée pour le réglage de la centrale, mais une unité de comparaison indique toute défectuosité et élimine de la mesure la chaîne fautive.

Le canal de sûreté, à quatre chaînes, est prévu pour une plage de mesure d'une décade au niveau de la puissance. Il comporte une unité de comparaison et une unité de surveillance provoquant un arrêt d'urgence en cas de dépassement de la puissance nominale.

Une série d'unités de surveillance et de verrouillages garantissent la sécurité du passage d'un canal au suivant.

6.4 Le réglage de la centrale

La fourniture d'énergie au réseau peut avoir lieu sous deux formes différentes : selon un programme établi d'avance, c'est-à-dire en centrale interconnectée ou alors par adaptation à la demande, c'est-à-dire en centrale isolée.

Dans les deux cas, le réglage de la puissance agit directement sur le réacteur (barres de réglage), alors que le débit de gaz du circuit primaire est réglé automatiquement de manière à maintenir constante la température de sortie du réacteur.

Lors de la marche en centrale interconnectée, la valeur de consigne de la puissance du réacteur est proportionnelle à l'intégrale de la différence entre le programme et la puissance mesurée aux bornes de l'alternateur. Le régulateur de la turbine règle la pression de la vapeur vive. La vitesse de la turbine est imposée par le réseau.

En centrale isolée, le régulateur de la turbine est chargé de maintenir sa vitesse. Il en résulte des fluctuations de pression utilisées pour agir sur la valeur de consigne de la puissance du réacteur.

Des réglages auxiliaires assurent d'autres fonctions, ainsi le réglage du débit d'eau d'alimentation du circuit secondaire, basé sur le maintien d'une température en un point du surchauffeur, etc. En général, ces réglages sont de type conventionnel.

6.5 Le réglage du réacteur

Le réacteur est commandé par douze barres de réglage actionnées par des treuils. Chaque barre comporte un synchro-transmetteur pour l'indication de position en salle de commande et quatre détecteurs de position pour la logique séquentielle. En outre, elles sont munies d'un dispositif de contrôle de la tension du câble et d'un indicateur de fin de course.

On distingue trois modes de commande des barres :

- la commande manuelle individuelle ;
- la commande manuelle séquentielle ;
- la commande automatique séquentielle.

Dans le premier mode, chacune des barres peut être actionnée individuellement à l'exclusion de toutes les autres. On dispose de deux vitesses dans le rapport de 1 à 10.

Dans les deux autres modes, un programme prédéterminé assure une variation régulière de la réactivité par un système de recouvrement partiel. Lorsqu'une barre atteint environ les deux tiers de sa course, la barre suivante se met en mouvement et les deux barres poursuivent ensemble leur mouvement. Un système de surveillance interdit que plus de deux barres ne se déplacent simultanément. Les changements de mode sont

soumis à un certain nombre de verrouillages qui assurent la sécurité d'exploitation.

Diverses sûretés sont prévues. Elles peuvent être déclenchées en tout temps pour protéger le réacteur et les installations. On distingue :

- l'arrêt d'extraction qui interdit tout mouvement ascendant des barres ;
- la réduction de puissance qui ramène immédiatement la puissance à une valeur prédéterminée ;
- l'arrêt d'urgence dans lequel les accouplements magnétiques des treuils sont désexcités et toutes les barres tombent simultanément par gravité.

7. Les installations auxiliaires

7.1 L'alimentation en eau de la centrale

L'eau destinée au circuit tertiaire et aux batteries de froid de l'installation de ventilation des ouvrages souterrains est puisée dans la Broye. A cet effet une prise d'eau et une petite station de pompage équipée de trois pompes de 75 l/sec sont aménagées dans la digue de la rive gauche, entre la voie ferrée et le lit de la rivière. L'eau ainsi prélevée est simplement soumise à une filtration mécanique.

L'eau potable est fournie par le réseau de la commune de Lucens ; elle est distribuée sans autre traitement aux diverses installations sanitaires.

L'eau totalement déminéralisée, destinée aux circuits secondaire et intermédiaire du réacteur ainsi qu'aux laboratoires et ateliers, est préparée à partir de l'eau potable au moyen d'échangeurs d'ions.

Un réservoir de 500 m³ situé sur la colline permet l'aspersion de sécurité de la halle du réacteur et la lutte contre l'incendie. Il permet aussi de couvrir temporairement les besoins de la centrale, en cas de perturbation dans les installations d'adduction d'eau.

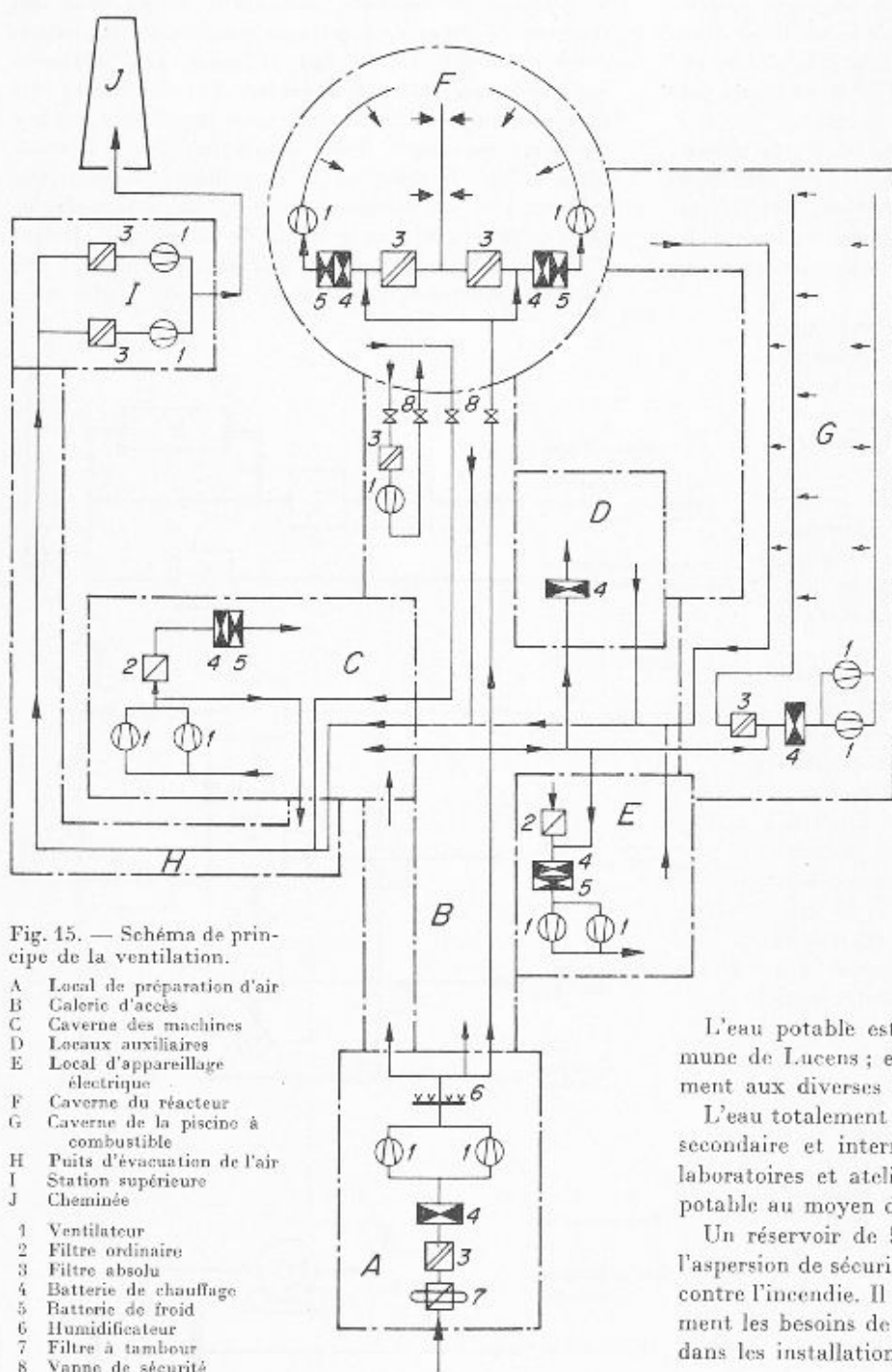


Fig. 15. — Schéma de principe de la ventilation.

- A Local de préparation d'air
- B Galerie d'accès
- C Caverne des machines
- D Locaux auxiliaires
- E Local d'appareillage électrique
- F Caverne du réacteur
- G Caverne de la piscine à combustible
- H Puits d'évacuation de l'air
- I Station supérieure
- J Cheminée
- 1 Ventilateur
- 2 Filtre ordinaire
- 3 Filtre absolu
- 4 Batterie de chauffage
- 5 Batterie de froid
- 6 Humidificateur
- 7 Filtre à tambour
- 8 Vanne de sécurité

7.2 Les installations de chauffage et de ventilation des ouvrages souterrains (fig. 15)

Les installations de ventilation des ouvrages souterrains remplissent cinq fonctions distinctes :

- maintenir une qualité d'air satisfaisante pour le personnel et pour le matériel (pureté, température, humidité) ;
- dépoussiérer l'air circulant dans les cavernes afin de diminuer le degré de contamination en cas d'accident ;
- créer un jeu de dépressions entre la caverne du réacteur et la caverne de la piscine à combustible d'une part, le reste des ouvrages souterrains de l'autre, afin de supprimer les fuites de gaz vers l'extérieur des locaux éventuellement contaminés ;
- permettre l'évacuation contrôlée de l'air vicié, cas échéant contaminé, en observant les prescriptions en la matière ;
- permettre la décontamination, après un accident, de l'atmosphère d'un local contaminé.

L'air destiné à la ventilation des ouvrages souterrains est aspiré, filtré et climatisé dans un local situé directement au-dessus de l'entrée de la galerie d'accès. Le débit nécessaire d'environ 12 000 m³/h est fourni par un ventilateur doublé d'un second en réserve.

Une partie de l'air ainsi préparé ventile la galerie d'accès, la salle des machines, le local de l'appareillage électrique et le local de décontamination ; des clapets réglables permettent d'intensifier momentanément le débit dans un local déterminé lorsque les circonstances l'exigent.

La halle des machines, le local de la piscine à combustible et le local de l'appareillage électrique sont en outre munis chacun d'une installation de ventilation en circuit fermé, assurant l'égalisation des températures et le dépoussiérage constant de l'air ; le circuit fermé sert également à refroidir cet air pour compenser l'échauffement qu'entraînent les pertes de chaleur des appareils thermiques ; à cet effet, ces circuits comportent des batteries de froid alimentées par un circuit d'eau dérivé du circuit tertiaire.

La halle du réacteur est alimentée en air frais directement à partir de la prise d'air ; un circuit fermé assure la réfrigération ou le chauffage, l'homogénéisation et le dépoussiérage de l'atmosphère. Sur la gaine d'amenée de l'air frais et sur la gaine d'évacuation de l'air vicié se trouvent des vannes de sécurité rigoureusement étanches ; en cas d'accident survenant dans la halle du réacteur, ces vannes fonctionnent instantanément et isolent complètement ladite halle de l'extérieur. Un circuit fermé de secours, dont les ventilateurs et les filtres sont situés dans la halle des

machines, permet alors de traiter l'air contaminé de la caverne du réacteur afin de le rendre apte à être évacué dans l'atmosphère ; cette évacuation n'est d'ailleurs effectuée que lorsque les conditions météorologiques assurent une dispersion rapide des gaz ainsi rejetés à l'air libre.

L'air contenu dans l'ensemble des ouvrages souterrains est aspiré à travers un puits vertical et une conduite à flanc de coteau par un groupe de ventilateurs et de filtres situés dans la station supérieure ; il est ensuite envoyé dans la cheminée dont le sommet se trouve à environ 150 m au-dessus du fond de la vallée.

7.3 Les installations de traitement des déchets radio-actifs (fig. 16)

Les installations pour le traitement, l'évacuation et le stockage des déchets radio-actifs ou de ceux qui risquent de l'être sont presque uniquement de nature conventionnelle. De ce fait et grâce aux méthodes éprouvées qui ont été développées pour traiter des matières radio-actives, le traitement des déchets est une opération routinière. Des mesures de sécurité particulières et une installation de surveillance automatique veillent à ce qu'aucune activité si faible soit-elle ne puisse s'échapper sans contrôle de la centrale. Il faut d'ailleurs remarquer que les déchets que produit une centrale atomique, comparés à ceux de toute autre

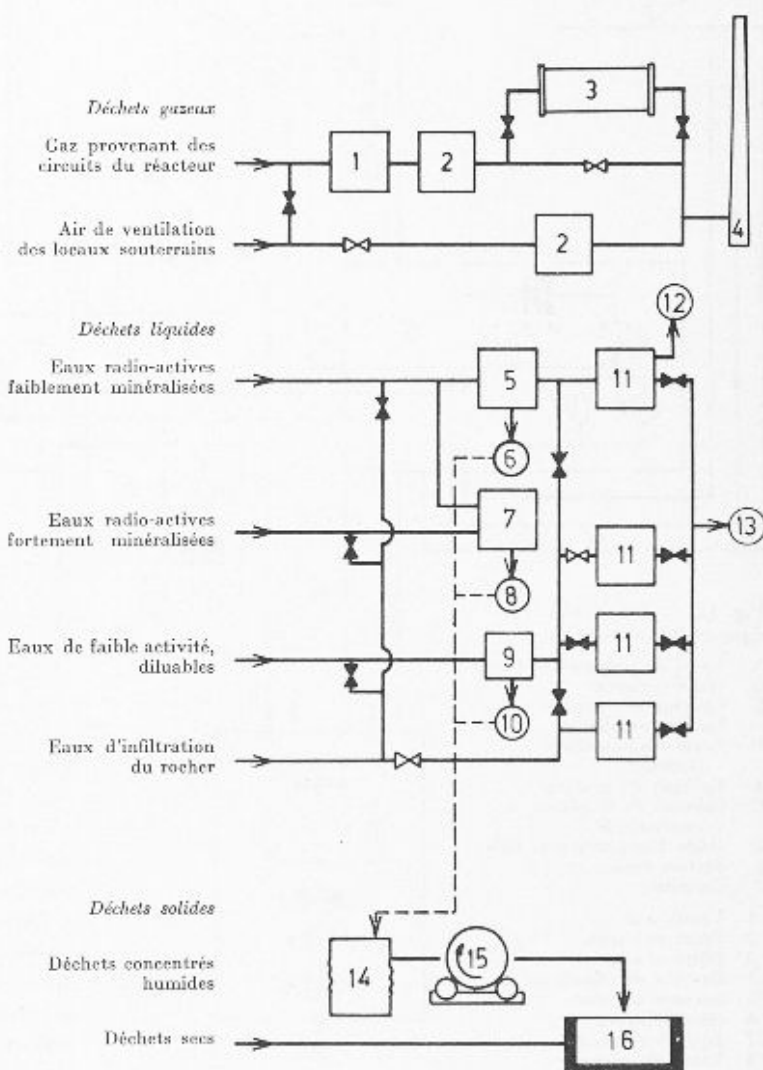


Fig. 16. — Schéma de traitement des déchets radio-actifs.

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1 Filtre à iode | 10 Kieselguhr contaminé |
| 2 Filtre absolu | 11 Réservoirs de contrôle et de stockage |
| 3 Réservoir de stockage | 12 Eau purifiée |
| 4 Cheminée | 13 Broyé |
| 5 Echangeur d'ions à lits mélangés | 14 Station de conditionnement |
| 6 Résine contaminée | 15 Malaxeur |
| 7 Evaporateur | 16 Fosse de béton |
| 8 Résidus d'évaporation | |
| 9 Filtre de kieselguhr | |

installation nucléaire, sont caractérisés par leur activité relativement faible.

Les déchets liquides, gazeux et solides proviennent pour la plupart des installations souterraines. Ils résultent en particulier de l'exploitation et des travaux d'entretien du réacteur, de la purification de l'eau de la piscine à combustible, de la buanderie et de la station de contrôle du personnel, et enfin des travaux de décontamination. Par mesure de sécurité, les eaux des systèmes de drainage des ouvrages souterrains sont également surveillées. Des conduites ou des véhicules spéciaux amènent les déchets à l'extérieur, où ils seront traités.

Les effluents liquides et gazeux provenant des ouvrages souterrains ainsi que ceux qui viennent des laboratoires sont envoyés dans des collecteurs et de là à l'installation de traitement proprement dite. Le traitement des effluents liquides et gazeux a pour but de réduire leur activité jusqu'au point où ils peuvent être relâchés sans danger. La réduction d'activité provient d'une part de la décroissance naturelle de la radioactivité et d'autre part d'une suite d'opérations d'extraction des impuretés radio-actives. Les résidus radio-actifs qui en résultent (filtres, résidus d'évaporation, résine contaminée des échangeurs d'ions, etc.) sont traités comme résidus solides. L'activité résiduelle des effluents liquides et gazeux sortant du traitement est ensuite contrôlée, après quoi ces effluents peuvent être rejetés à la Broye ou à l'atmosphère en se conformant aux prescriptions.

Les objets solides contaminés en surface (outils, pièces d'équipement, etc.) sont décontaminés s'il le faut dans l'installation prévue à cet effet dans la caverne, puis, le cas échéant, ils sont transportés avec les autres déchets solides dans le bâtiment de stockage. Dans ce dernier, les déchets sont classés selon l'intensité de dose de radiation qu'ils présentent à leur surface et, pour faciliter une réduction de volume ultérieure, selon qu'ils sont compressibles ou combustibles.

Les déchets sont ensuite enfermés dans des récipients appropriés pour les protéger de l'humidité et éviter toute dispersion de radio-activité. Ils sont alors conservés dans des fosses en béton construites de manière à garantir un stockage sans danger.

8. La sécurité nucléaire de l'installation

La fission, réaction par laquelle le combustible nucléaire libère sa chaleur dans le réacteur, entraîne de par sa nature même la formation de produits de fission radio-actifs. Des mesures particulières de sécurité sont nécessaires pour garantir la protection du personnel, des installations et du voisinage de la centrale contre les radiations qui proviennent de ces produits de fission.

En fonctionnement normal, les produits de fission sont confinés dans les segments d'uranium qui sont munis d'un gainage étanche. Le circuit primaire constitue une deuxième barrière contre leur dispersion non contrôlée. Des systèmes d'écrans, de surveillance, etc., et de strictes prescriptions de service doivent assurer la protection du personnel.

L'installation doit être conçue de manière que le mauvais fonctionnement, la panne ou la rupture d'un élément quelconque ne puissent pas provoquer un acci-

dent grave du réacteur et libérer ou disperser des produits de fission.

Si, malgré toutes les mesures de sécurité, un tel accident, pour improbable qu'il soit, devait tout de même se produire, il faut empêcher la dispersion des produits de fission et en particulier éviter qu'ils ne puissent parvenir à l'extérieur et contaminer le voisinage de la centrale. C'est là le rôle de l'enceinte de confinement.

Du fait de l'importance de ces questions, la construction et la mise en service d'une centrale nucléaire sont soumises à un régime d'autorisations par la Confédération prévu par l'article 4 de la loi fédérale sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique et la protection contre les radiations, du 23 décembre 1959. Avant d'accorder ces autorisations, la Confédération doit faire examiner l'ensemble du projet, du point de vue de la sécurité, par la Commission fédérale pour la sécurité des installations atomiques.

8.1 Sécurité en fonctionnement normal

Lors du fonctionnement normal des installations, il ne saurait y avoir de danger pour la population du voisinage. Les effluents gazeux et liquides de la centrale sont surveillés en permanence et un contrôle minutieux garantit qu'ils ne peuvent être relâchés que dans des conditions de sécurité absolue.

Des prescriptions d'exploitation impératives imposées à un personnel spécialement formé garantissent la sécurité d'exploitation.

Le personnel autorisé à pénétrer dans les installations souterraines ou qui peut entrer en contact avec de la radio-activité est soumis au strict contrôle du service de santé de la centrale.

L'ensemble des installations de Lucens est considéré comme zone surveillée dans le sens du projet d'ordonnance fédérale concernant la protection contre les radiations ionisantes, tandis que les installations souterraines forment une zone contrôlée. Pour des raisons d'exploitation, les ouvrages souterrains sont de plus répartis en une zone radio-activement « froide » et une zone « chaude ». Dans la zone chaude sont inclus avant tout la caverne du réacteur, la caverne de la piscine à combustible, les locaux de décontamination et la chambre des échangeurs d'ions. Pour exclure pratiquement toute possibilité de dispersion de substances radio-actives et tout risque de contamination du bâtiment de service ou des autres ouvrages extérieurs par le personnel, celui-ci doit passer par une station de contrôle avec vestiaire, douche et installation de surveillance des radiations avant de quitter la zone chaude.

Une partie des ouvrages extérieurs où l'on traite des substances radio-actives est également constituée en zone chaude. Il s'agit avant tout du laboratoire, des installations de traitement des déchets radio-actifs et, selon les circonstances, de l'atelier.

La caverne du réacteur, la caverne des machines et la piscine à combustible sont accessibles en tout temps au personnel de la centrale. Le service de santé surveille toute manipulation comportant un risque d'irradiation.

8.2 Sécurité en fonctionnement anormal

Au cours des études, des analyses détaillées sont entreprises pour déterminer les conséquences que

peuvent entraîner le mauvais fonctionnement, la panne ou la rupture d'un élément quelconque de l'installation ou toute erreur du personnel d'exploitation. Dans tous les cas où une telle faute pourrait conduire à une situation dangereuse qui entraînerait des dommages pour l'installation ou la dispersion de produits radio-actifs, des mesures de sécurité supplémentaires sont prises et, le cas échéant, le projet de construction est modifié de manière adéquate. Il est ainsi possible de garantir effectivement la sécurité intrinsèque de l'installation.

Le dédoublement ou la multiplication des principaux organes de contrôle, l'adoption d'un système d'alarme et de sécurité extensif et la sécurité intrinsèque de l'installation réduisent au minimum la probabilité d'un accident sérieux. Par ailleurs, la disposition souterraine de la centrale garantit la meilleure protection de la population du voisinage ainsi que du personnel d'exploitation, même dans le cas de l'accident hypothétique maximum défini comme l'enveloppe des accidents les plus graves que l'on puisse concevoir.

8.3 Le confinement

La caverne du réacteur est séparée de l'extérieur par l'enceinte de confinement.

Les parois de la caverne du réacteur sont construites de manière à assurer une bonne étanchéité. Elles sont calculées pour résister à la pression maximum qu'engendrerait l'accident hypothétique maximum.

La caverne du réacteur et les autres ouvrages souterrains sont munis de systèmes de drainage séparés. Les eaux de drainage recueillies dans ces systèmes sont envoyées à l'installation de traitement des déchets.

Tous les accès à la caverne du réacteur sont normalement fermés par des sas et des portes blindées étanches et résistant à la pression. Les spécifications d'étanchéité des sas ainsi que des pénétrations des câbles et des conduites reliant la caverne du réacteur à celle des machines sont telles que la ventilation directe de la caverne des machines et de la galerie d'accès reste possible sans risque de contamination, même en cas d'accident grave.

La surpression qui apparaîtrait dans la caverne du réacteur lors d'un tel accident décroîtrait d'abord très rapidement par refroidissement du mélange d'air, de CO₂ et de vapeur dégagé dans la caverne. La surpression subsistant dans la caverne serait ensuite réduite par l'ouverture de vannes munies de filtres qui

relâcheraient les gaz de la caverne dans le système de drainage et de là dans les porosités du rocher où ils resteraient enfermés.

S'il devait s'avérer à la suite des études et des essais en cours que le stockage des gaz dans le rocher ne présente pas toutes les garanties désirables, il serait possible de les comprimer et de les envoyer dans des réservoirs.

9. Caractéristiques de l'installation

<i>Réacteur</i>	
Type	réacteur à tubes de force
Modérateur	eau lourde (D ₂ O)
Agent de refroidissement	gaz carbonique (CO ₂)
Combustible	uranium métallique enrichi à environ 0,93 %
Charge de combustible	5,64 t d'uranium
Nombre d'éléments de combustible	73
Puissance thermique nominale	30 MW
Flux de neutrons thermiques maximum dans l'élément central	3,2 · 10 ¹⁸ neutrons/cm ² s
<i>Circuit primaire</i>	
Pression moyenne	60 ata
Température à l'entrée des éléments	220°C
Température à la sortie des éléments	385°C
<i>Circuit secondaire</i>	
Débit de vapeur vive	39,6 t/h
Pression de la vapeur vive	21,5 ata
Température de la vapeur vive	370°C
Température de l'eau d'alimentation	147°C
Puissance à l'arbre de la turbine	8,55 MW
<i>Installations électriques</i>	
Turbo-alternateur triphasé	13 MVA, 6 kV, 50 Hz
Transformateur de ligne	10 MVA, 6/60 kV

10. Le programme des travaux

Les études de la centrale nucléaire expérimentale de Lucens sont suffisamment avancées pour qu'il soit possible de passer dès maintenant à la phase d'exécution. Les travaux préparatoires sur place sont en train. Les travaux de génie civil peuvent démarrer dans le courant de l'été 1962. La mise en fabrication des équipements principaux devrait avoir lieu en automne. Selon le programme actuellement envisagé, la centrale pourrait être mise en service en 1965.

BIBLIOGRAPHIE

Introduction to Calculus, par K. Kuratowski. Traduit du polonais par J. Musielak. Editions Pergamon Press, Oxford, 1961. — Un volume de 315 pages, illustré. Prix : relié, 35 sh.

L'enseignement des éléments de l'analyse doit (ou devrait) satisfaire à une double exigence : initier les étudiants à une discipline fondamentale des mathématiques, et cela par l'introduction rigoureuse des concepts de base (ensembles et limites en particulier), et d'autre part leur fournir un outil, avec l'entraînement à son maniement, pour de nombreuses applications des mathématiques. Le poids donné à l'un ou l'autre de ces aspects est affaire de goût, d'opportunité parfois, de mode souvent.

M. Kuratowski a réussi, dans un ouvrage en somme peu volumineux, une synthèse remarquable des deux points de vue. Ce cours, évidemment issu d'une sérieuse expérience pédagogique, en même temps que d'une information parfaite des mathématiques modernes, peut servir de modèle ; les difficultés y sont habilement dosées, les notions abstraites n'y sont introduites qu'après qu'un appel à l'intuition les a rendues aussi naturelles que possible ; grâce aux nombreux problèmes qui accompagnent l'exposé, le lecteur peut contrôler son travail et s'exercer à utiliser les concepts et les méthodes d'une discipline qui continue à constituer le point de départ d'une étude des mathématiques supérieures.

C. B.