

Extension de l'aménagement hydroélectrique de Vianden: aperçu général sur le projet "10e machine"

Autor(en): **Wehenkel, Louis**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **97 (1971)**

Heft 4

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-71184>

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.

Extension de l'aménagement hydroélectrique de Vianden¹

Aperçu général sur le projet « 10^e machine »

par LOUIS WEHENKEL

La Société électrique de l'Our S.A. à Luxembourg vient de décider d'augmenter la puissance de la centrale hydroélectrique de Vianden, à la frontière germano-luxembourgeoise, de 900 à 1100 MW par la construction d'un groupe réversible de pompage-turbinage de 200 MW dans une centrale en puits, située à 2 km de l'aménagement actuel.

La construction de cette nouvelle unité appelée ci-après « 10^e machine » constituera, comme ce fut déjà le cas pour la centrale actuelle il y a huit ans, une performance technique unique au monde.

Description sommaire de la centrale actuelle (fig. 2)

La Centrale de Vianden ne disposant pas d'apport naturel d'eau, ses groupes fonctionnent en cycle journalier de pompage-turbinage entre deux bassins de même capacité dont les altitudes diffèrent en moyenne de 280 m. La retenue supérieure est un bassin entièrement artificiel en deux parties, situé sur le plateau du mont Saint-Nicolas, à une altitude d'environ 500 m, tandis que la retenue inférieure est obtenue par un barrage de l'Our construit à Lohmühle, immédiatement en amont de Vianden.

La centrale actuelle que nous désignerons par *Vianden I* comporte neuf groupes ternaires à arbres horizontaux (fig. 1) d'une puissance unitaire de 100 MW en turbinage et de 70 MW en pompage. Compte tenu de la bonne qualité de la roche, on a installé ces groupes dans une usine souterraine à l'endroit où la distance entre les deux bassins est la plus courte. Cette centrale est reliée au bassin supérieur par deux puits blindés de 480 et 680 m de longueur.

Fonction et mode d'exploitation

La capacité utile des bassins atteint actuellement 5 800 000 m³ et permet d'obtenir un régime journalier de 4 ½ heures de production et de 8 heures de pompage. On accumule ainsi sous forme hydraulique des kilowattheures excédentaires produits dans les centrales thermiques pendant les heures creuses, surtout pendant la nuit, pour la production d'énergie de pointe de haute valeur. Grâce à leur souplesse remarquable, les groupes hydrauliques de pompage permettent en outre de participer pour une part importante au réglage de la fréquence du réseau et de mettre à la disposition des exploitants une réserve instantanée d'une haute fiabilité.

Par ses lignes à 220 kV, la Centrale de Vianden est reliée directement au réseau de la RWE (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk) et par son intermédiaire au réseau interconnecté européen. Par ses dimensions et sa situation géographique, Vianden est un complément naturel de ces réseaux à base thermique. Les grandes centrales à lignite de la région de Cologne et d'Aix-la-Chapelle

sont ses principaux fournisseurs de courant de pompage, tandis que le courant de pointe est absorbé surtout par les régions à forte densité de population de la Rhénanie et de la Ruhr.

Motivation de l'extension

Pour une capacité donnée des bassins d'accumulation, la puissance que l'on peut installer dans une centrale à cycle fermé du type de Vianden dépend essentiellement du temps dont on dispose chaque jour pour pomper et pour turbiner. Or, depuis la période de 1955 à 1960 où Vianden a été étudié, les conditions du réseau ont varié notablement. Le temps disponible pour le pompage a été réduit de 8 heures à environ 6 ½ heures, surtout à cause de la modification des habitudes des consommateurs due à la télévision (voir fig. 3).

Cette tendance était déjà visible vers 1962, année de la mise en service du premier groupe de Vianden, d'où l'idée d'augmenter la capacité par l'adjonction d'un dixième groupe. Cependant, comme l'avancement des travaux de génie civil ne permettait plus d'ajouter une unité

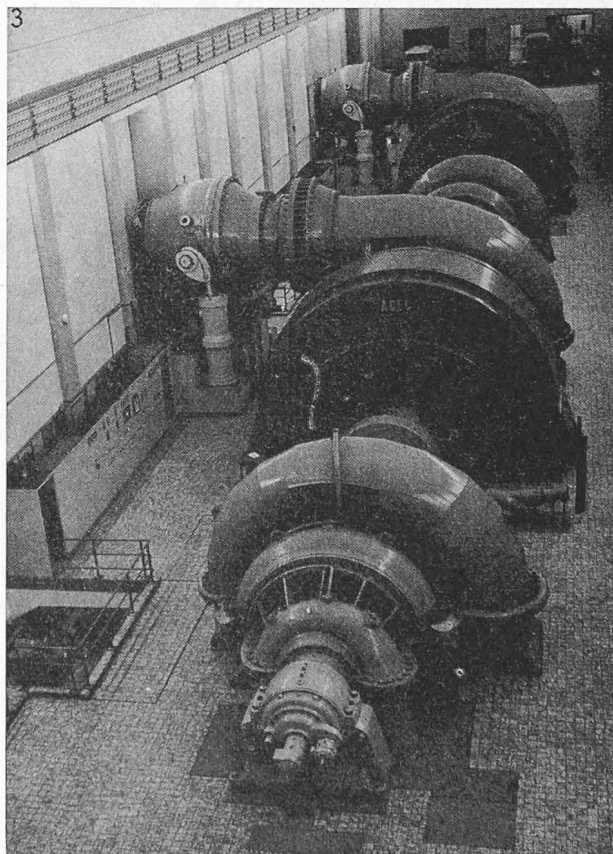


Fig. 1. — Vue de deux groupes de Vianden I.

¹ Cet article a également paru dans la *Revue technique luxembourgeoise*, n° 1, de mars 1970.



Fig. 2. — Vue d'ensemble de l'aménagement actuel. Bassin supérieur, bassin inférieur, entrées de la caverne.

à la caverne actuelle, la construction du nouveau groupe dans une centrale séparée a été envisagée dès cette époque.

Centrale en puits

A 1 km en amont du barrage de Lohmühle, au nord de la chapelle du « Bildchen », les deux retenues se rappro-

chent en un deuxième point. Bien que moins favorable que l'emplacement de la centrale en exploitation, ce site permettra de relier les deux bassins par une troisième galerie blindée. Contrairement à ceux de Vianden I, le nouveau groupe sera implanté avec ses accessoires et organes de commande *dans un puits cylindrique* (fig. 5), d'un diamètre utile de 22,20 m et d'une profondeur de 50 m (altitude de

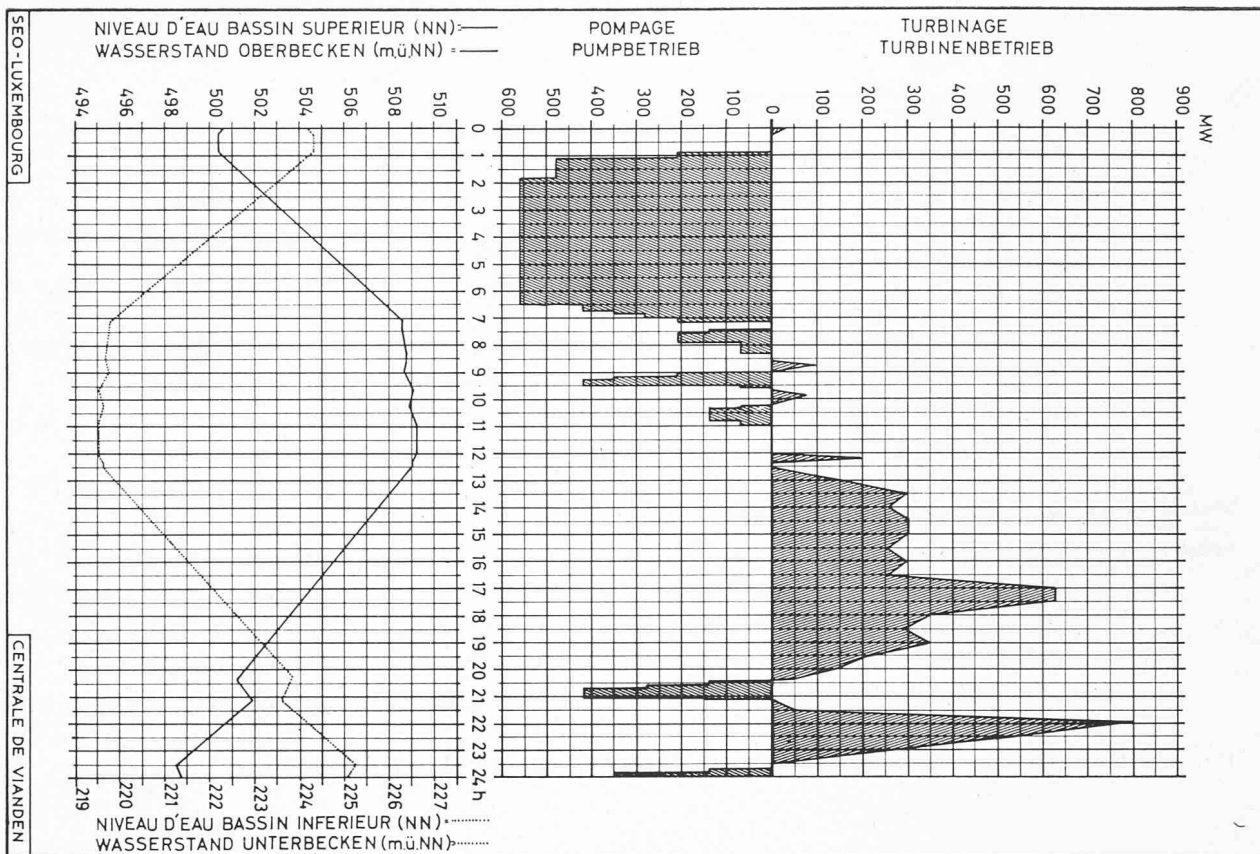


Fig. 3. — Diagramme de charge d'une journée caractéristique de l'année 1969.

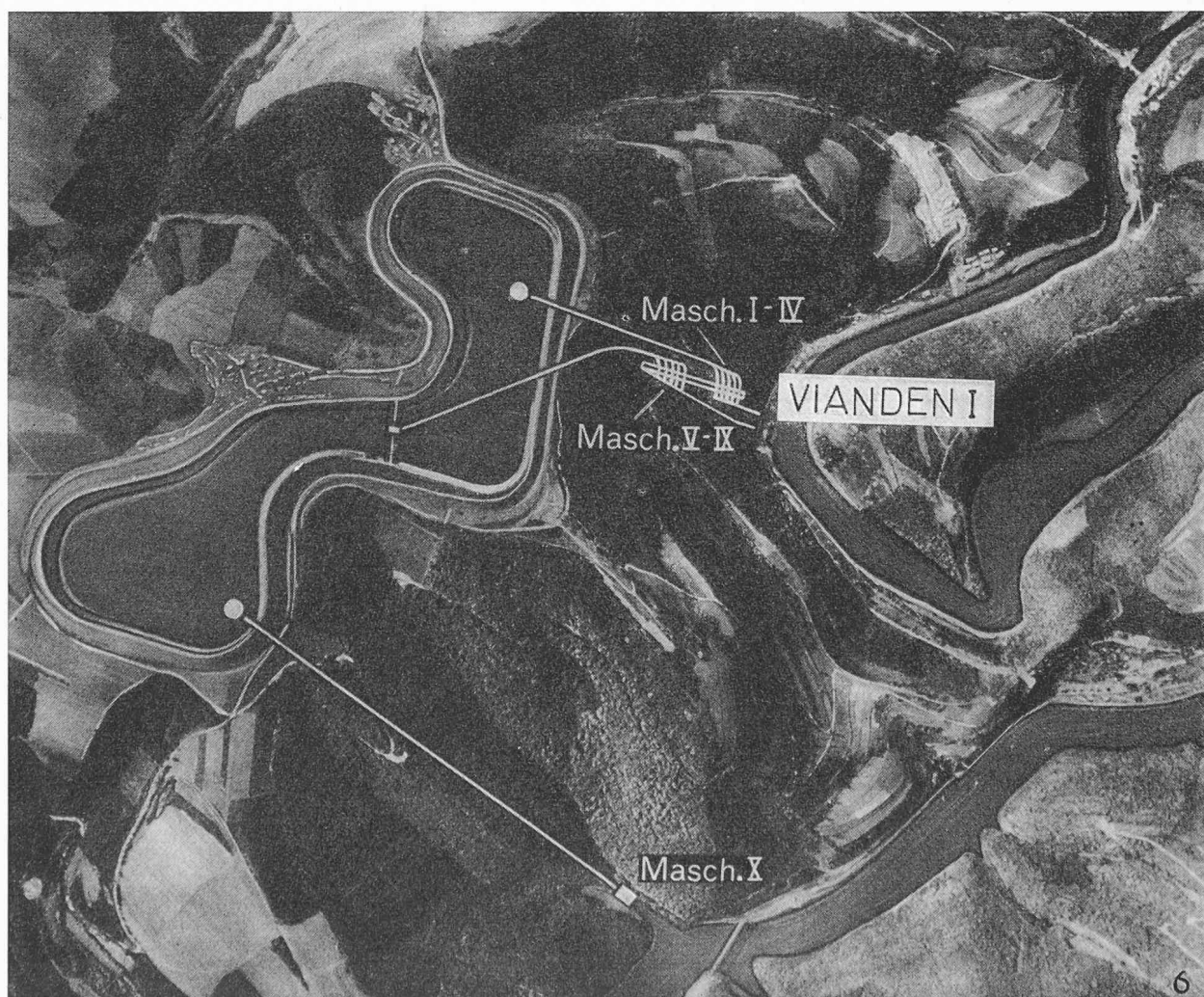


Fig. 4. — Vue d'ensemble de l'aménagement avec l'emplacement des galeries de Vianden I et de la 10^e machine.

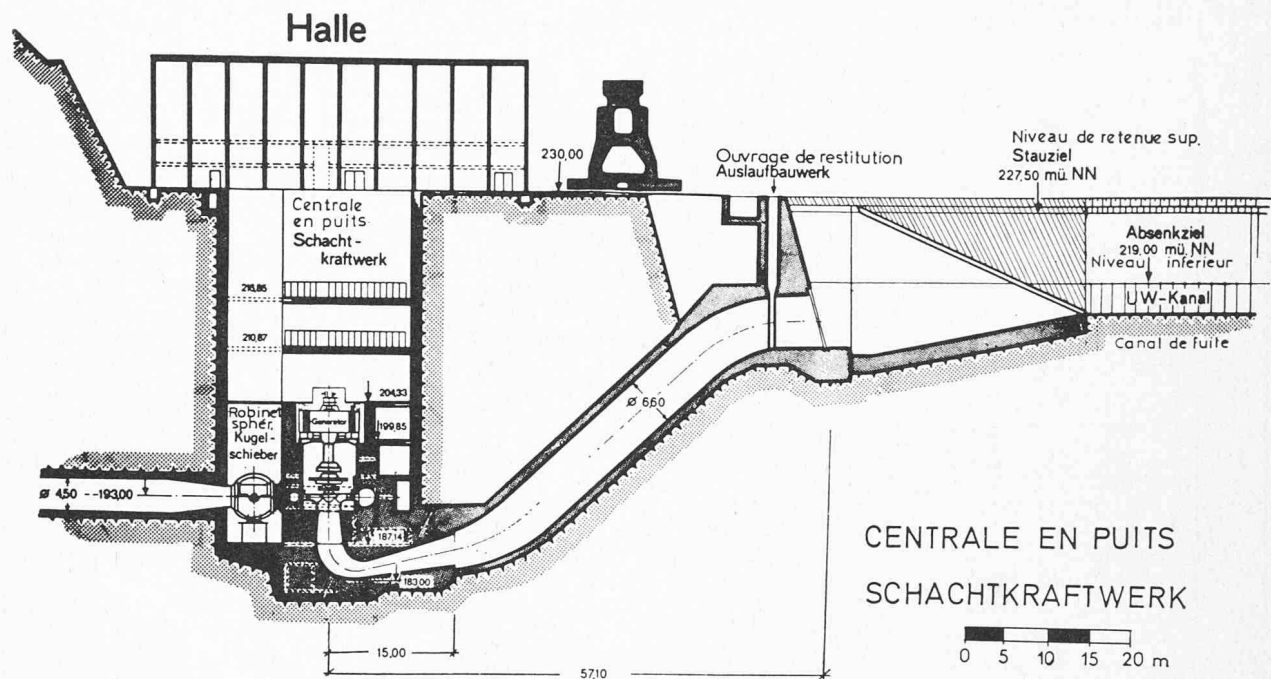


Fig. 5. — Coupe verticale de la centrale en puits avec galerie de fuite et ouvrage de restitution.

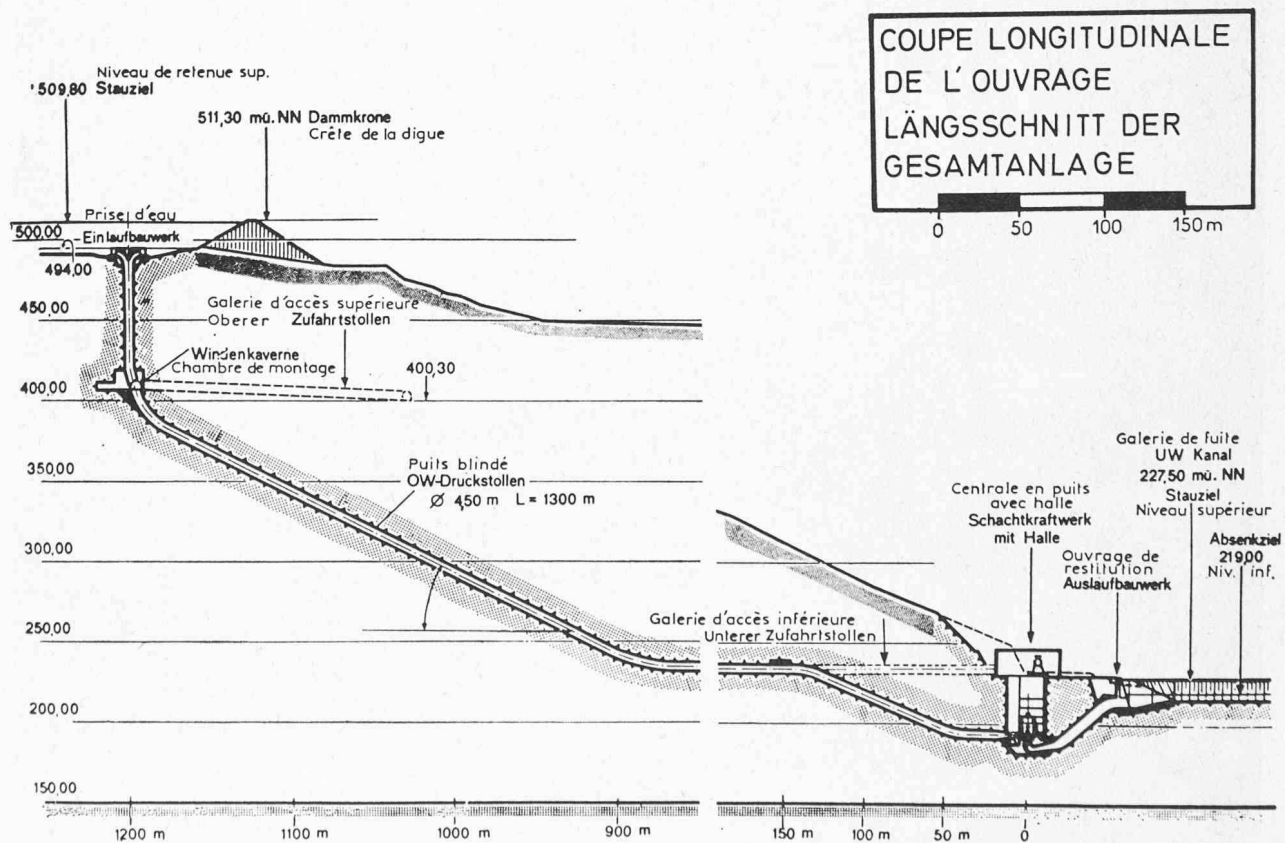


Fig. 6. — Galeries en charge et centrale en puits, coupe longitudinale.

la plate-forme supérieure, 230 m ; point le plus bas, 180 m) creusé au voisinage immédiat du bassin inférieur. Dans le cas du 10^e groupe, la construction de la centrale en forme de puits s'est avérée plus économique que la construction en caverne. Comme principaux avantages techniques de cette solution, mentionnons l'accès plus facile du chantier et de l'usine ainsi que les conditions hydrauliques plus favorables dues à la longueur réduite de la galerie aval.

Galeries en charge (fig. 4, 5 et 6)

Le puits du 10^e groupe sera relié au bassin supérieur par une *galerie blindée souterraine* d'une longueur totale de 1300 m et d'un diamètre utile de 4500 mm. Cette galerie se composera d'une partie verticale, d'une partie inclinée à 28,5° et d'une partie horizontale.

La prise d'eau supérieure ainsi que le tronçon vertical de 80 m ont déjà été mis en place lors de la construction de Vianden I. De même, une galerie d'accès au chantier qui aboutit au coude supérieur est déjà creusée. Ainsi l'excavation et le montage du blindage pourront se faire sans interruption de l'exploitation de la centrale existante. Il est prévu d'effectuer le terrassement de bas en haut, à partir d'une deuxième galerie d'accès qui sera créée au voisinage de la centrale en puits.

Pour ces travaux on utilisera une *foreuse d'un type nouveau* dont les outils seront montés sur des bras mobiles, travaillant à la façon d'un tour. Par rapport à l'excavation conventionnelle à l'explosif, cette méthode permettra de ménager davantage le rocher et d'obtenir un profil beaucoup plus régulier. Il en résultera une économie importante sur les terrassements et le béton.

Par contre, pour le *montage des viroles et le bétonnage*, on avancera en grande partie de haut en bas en amenant le matériel par la galerie d'accès supérieure.

Côté aval (fig. 5), la *liaison avec la retenue de l'Our* sera obtenue par une très courte galerie en charge, débouchant dans le canal d'amenée que formera la vallée latérale légèrement élargie et approfondie au voisinage de la prise d'eau. Seule le coude d'aspirateur proprement dit de la turbine-pompe sera blindé, le reste de la galerie de fuite sera bétonné.

Les *organes de garde aval* seront des vannes-wagons placées dans l'ouvrage de restitution. En cas d'urgence, on pourra fermer ces vannes par télécommande à partir de la salle de commande de Vianden I.

Pendant les travaux, le chantier du puits et des ouvrages en aval sera protégé par une *digue provisoire* qui isolera la vallée latérale du bassin inférieur.

Equipement électromécanique

Généralités

La machine installée dans la centrale en puits sera un *groupe réversible à axe vertical* d'une vitesse de rotation de 333 tours/min d'une puissance de 200 MW en turbine et de 215 MW en pompe.

Les avantages de ce type de groupe sont sa très grande simplicité et son encombrement réduit dans de grandes proportions par rapport au groupe ternaire du type de Vianden I. Cela entraîne une diminution des coûts aussi bien du génie civil que de la machine et de ses accessoires, une simplification des auxiliaires, des organes de commande et de l'entretien.

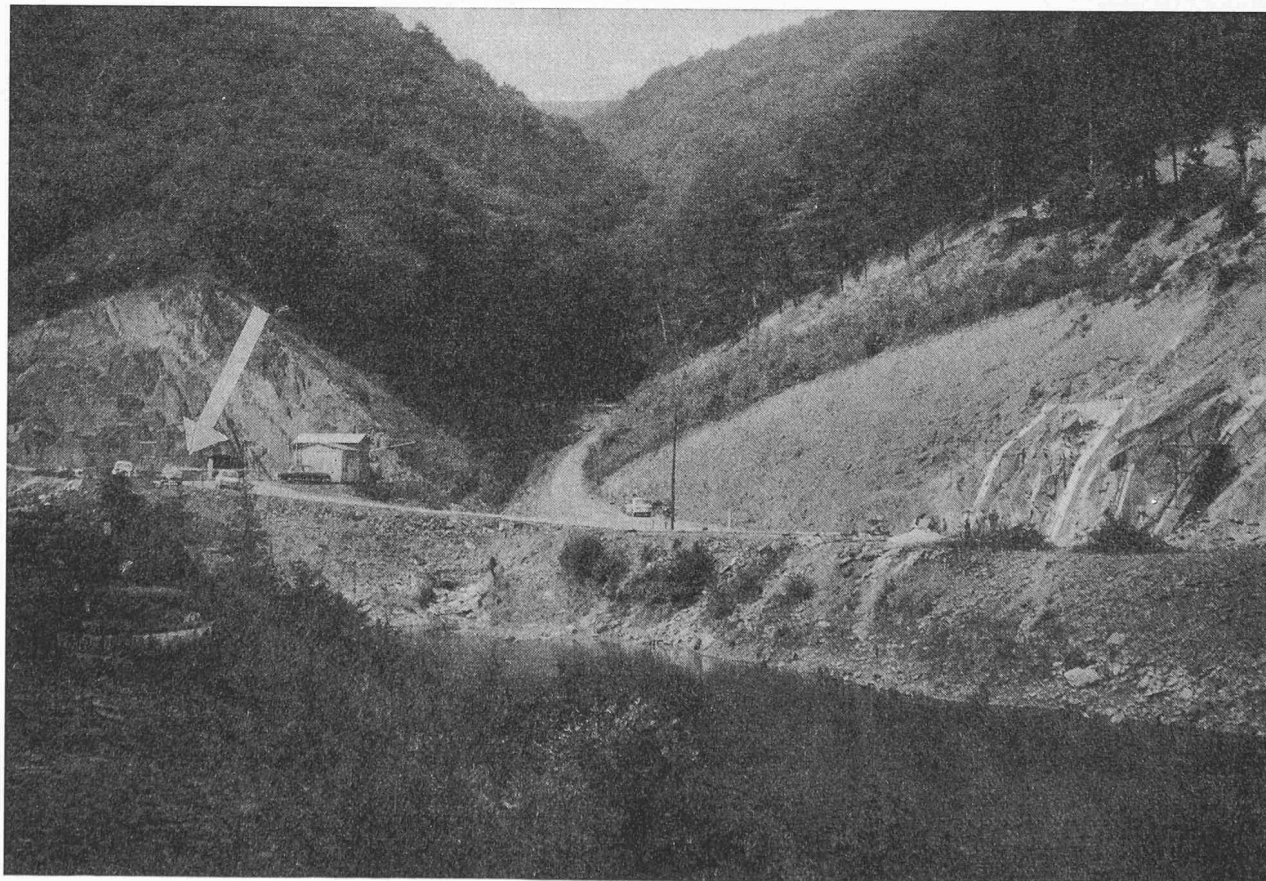


Fig. 7. — Emplacement du 10^e groupe avant le début des travaux. La flèche indique l'emplacement de la centrale en puits.

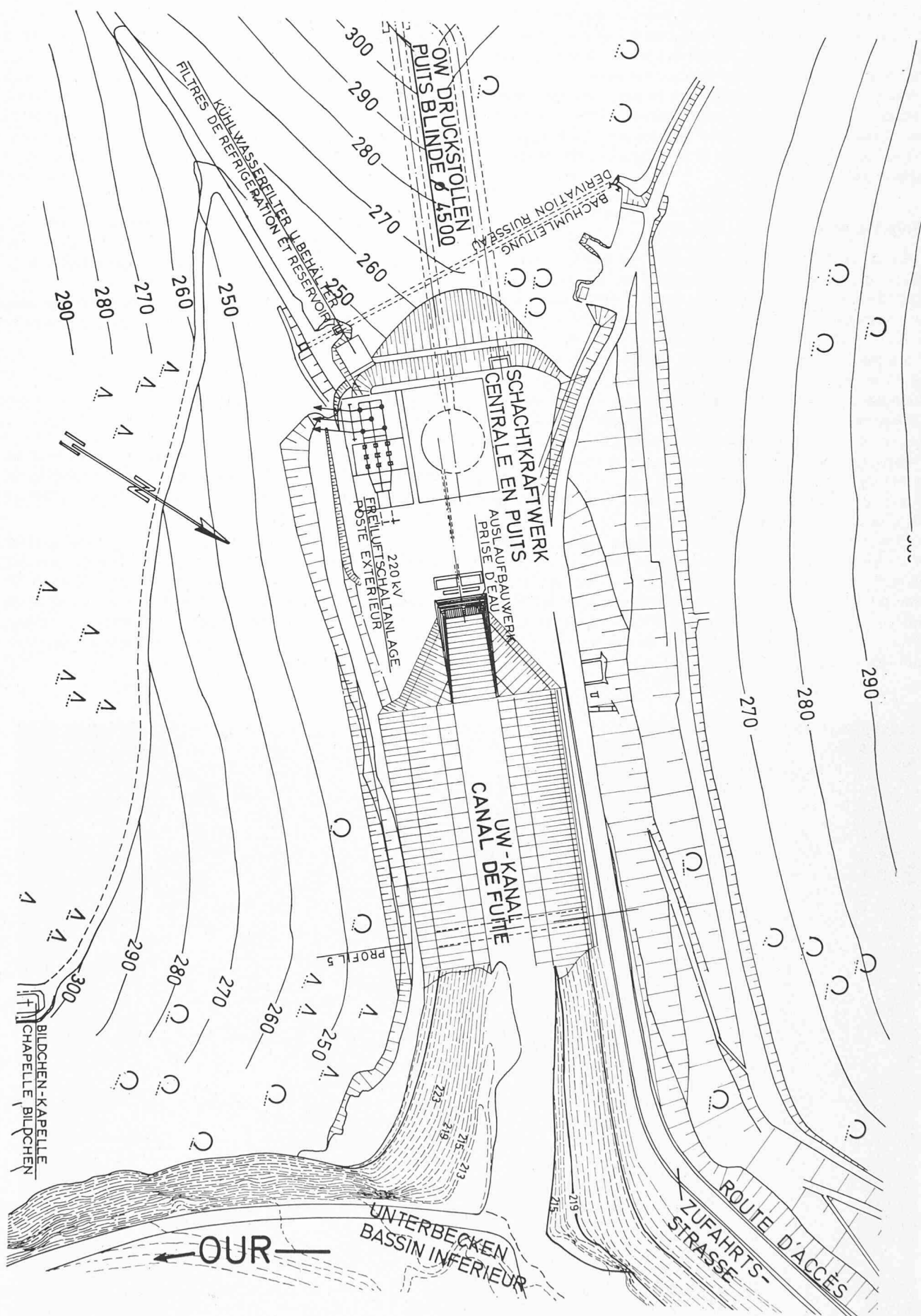


Fig. 8. — Plan d'ensemble, centrale en puits et environs.

Les principaux avantages du groupe ternaire sont par contre les temps de démarrage et d'inversion très courts et le rendement global légèrement supérieur, qui résulte du dimensionnement indépendant de la turbine et de la pompe.

Au moment de la construction de Vianden I, les principales firmes européennes n'avaient pas une expérience suffisante dans le domaine des pompes-turbines pour aborder la construction de groupes réversibles de grande puissance : les deux principaux problèmes étaient le tracé hydraulique de la roue de la turbine-pompe et le démarrage du groupe en pompe. Ces deux questions seront examinées plus en détail dans la suite de cet exposé.

Eléments constitutifs du groupe réversible

Le groupe à axe vertical se composera de deux machines, la turbine-pompe et l'alternateur-moteur.

Sa partie tournante pèsera environ 330 tonnes. Comme pour les groupes verticaux classiques, la machine électrique sera placée au-dessus de la machine hydraulique, le coude

d'aspiration se trouvera en dessous. Le groupe sera muni d'un pivot et de deux paliers de guidage. Le pivot sera monté directement sur le flasque supérieur de la turbine-pompe, de façon à raccourcir au maximum les chemins de transmission des forces et à compenser la poussée hydraulique agissant sur le flasque. L'un des paliers de guidage sera placé en dessous du pivot, le second dans le croisillon supérieur de la machine synchrone.

Turbine-pompe (fig. 9)

Le poids total de la turbine-pompe atteindra environ 600 tonnes. La hauteur de chute variera de 266,50 à 291,55 m. Pour ces deux valeurs, les principales données de la machine seront :

— Vitesse de rotation (deux sens)		333,3 t/min
— Chute	266,50	291,55 m

Marche en pompe :

— Débit	74,1	63,2 m ³ s
— Puissance absorbée	215	202 MW
— Rendement	91,5	90,5 %

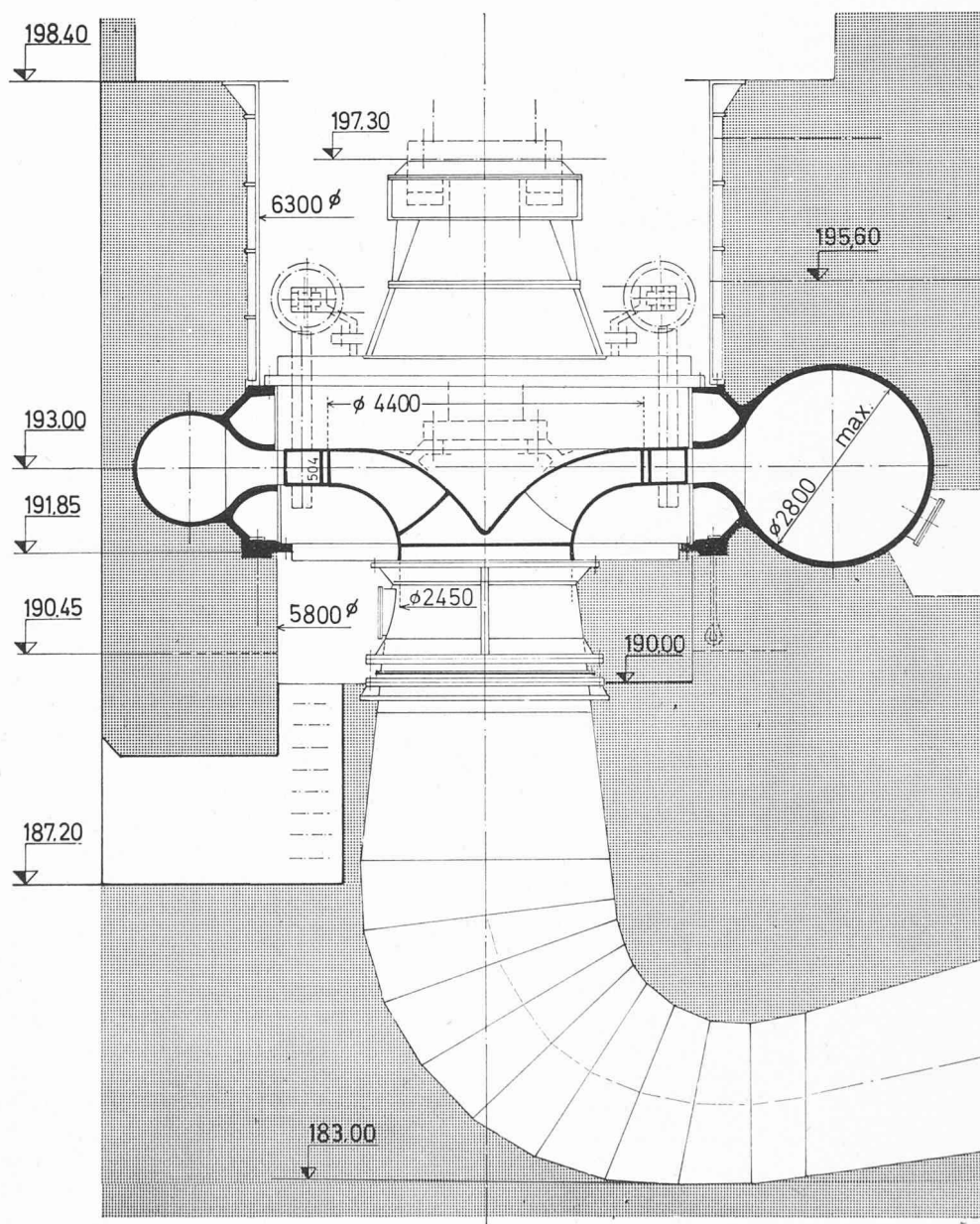


Fig. 9. — Coupe de la turbine-pompe.

Marche en turbine :

— Débit nominal	71,6	76,5 m ³ /s
— Puissance nominale	166	196 MW
— Rendement à la puissance nominale	90,2	91,2 %
— Rendement maximum	91,9 % à 85 % de la puissance nominale à 291,55 m	

Le blindage de l'aspirateur et du coude sera noyé dans le béton sur une longueur de 15 m. Pour éviter des vibrations excessives, on réduira au minimum la partie libre de l'aspirateur sous la machine (2700 mm). Pour des raisons de manque de place, on renoncera au démontage de la roue par en dessous. Un trou d'homme permettra cependant d'accéder à la roue pour effectuer les contrôles et les réparations nécessaires.

Le démontage de la turbine-pompe s'effectuera par l'alésage de l'alternateur-moteur. Après démontage du rotor, la pivoterie, la partie intérieure du flasque supérieur et la roue de la turbine-pompe seront sorties en une seule pièce à l'aide du pont portique.

La roue de la turbine-pompe sera coulée en acier inoxydable ; elle pèsera environ 30 tonnes et aura un diamètre extérieur de 4400 mm.

Les labyrinthes fixes ainsi que toutes les autres pièces d'usure seront démontables.

Les aubes directrices, également en acier inoxydable seront munies d'un dispositif de blocage pour éviter les vibrations pendant la marche en pompe.

La bache spirale sera construite en quatre pièces assemblées sur place par soudage. Elle sera scellée dans le béton par l'intermédiaire d'une couche élastique en matière synthétique qui amortira les vibrations. Un collier ancré dans le béton transmettra la poussée hydraulique de la bache aux fondations.

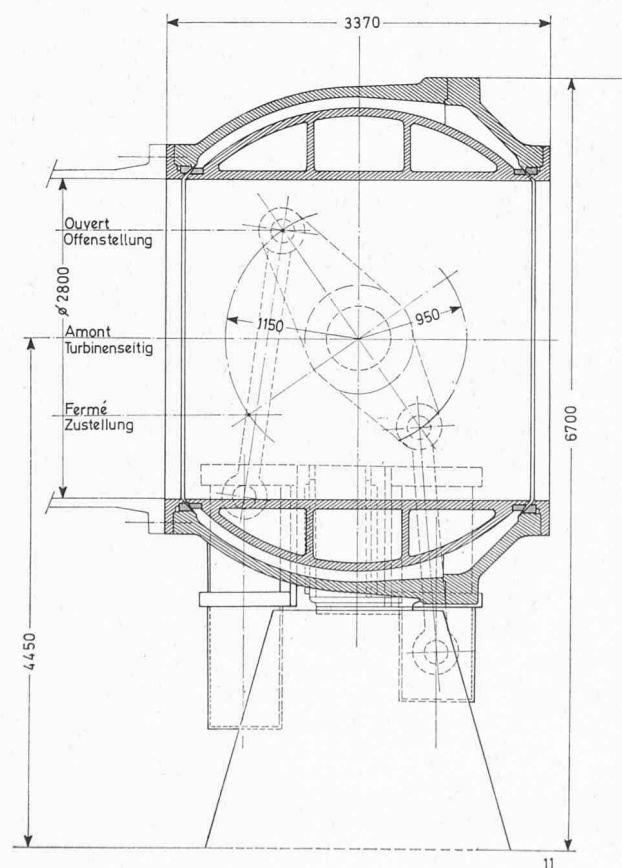


Fig. 10. — Coupe du robinet sphérique.

Le distributeur de la machine sera actionné par des servomoteurs indépendants à double effet à huile.

Les autres éléments constitutifs de la turbine-pompe seront comparables à ceux d'une turbine Francis classique.

Robinet sphérique (fig. 10)

L'organe de garde amont sera un robinet sphérique d'un diamètre nominal de 2800 mm, prévu pour une pression nominale de 322 m. L'étanchéité de service placée en aval, ainsi que l'étanchéité de secours côté amont, seront des anneaux mobiles en acier inoxydable. L'obturateur sera manœuvré par quatre servomoteurs à simple effet, deux pour l'ouverture et deux pour la fermeture, fixés en console de part et d'autre du robinet. Pour des raisons de sécurité, la fermeture s'effectuera par de l'eau à haute pression prise directement sur la conduite forcée, tandis que l'ouverture se fera à l'huile. Le robinet sera solidaire du blindage de la conduite et un joint mobile lui permettra de se déplacer axialement par rapport à la bache. Le robinet avec ses servomoteurs pèsera 172 tonnes.

Machine synchrone (fig. 11)

L'alternateur-moteur triphasé aura pour données principales :

— Vitesse nominale (deux sens)	333,3 t/min
— Vitesse d'emballement	532 t/min
— Moment d'inertie	4700 t/m ²
— Tension nominale	15,75 kV, 50 Hz
— Puissance nominale, en alternateur	230 MVA, $\cos \varphi = 0,85$
— Puissance nominale, en moteur	215 MVA, $\cos \varphi = 1$
— Rapport de court-circuit	0,72
— Rendement en alternateur à la puissance nominale	$\cos \varphi = 0,85$ 98,68 %
— Rendement en moteur	$\cos \varphi = 1$ 98,93 %

Le rotor et le stator seront assemblés sur place à cause de leurs grandes dimensions et poids :

— Poids du rotor	294 t
— Diamètre du rotor	5384 mm
— Longueur de l'empilage	2500 mm
— Entrefer	26 mm
— Poids du stator	180 t
— Diamètre extérieur du stator	7500 mm

Le rotor à jante empilée se composera essentiellement d'un moyeu creux formant une seule pièce avec le bout d'arbre inférieur, d'un croisillon en tôle soudé sur le moyeu, d'une jante de tôles en forme de secteurs maintenues en place par des encoches appropriées dans le croisillon, ainsi que de 18 pôles massifs. A cause des limites imposées par le transport, la carcasse du stator sera construite en plusieurs parties assemblées sur place par soudage. De même l'empilage des tôles magnétiques et le bobinage seront réalisés à pied d'œuvre. L'isolement de l'enroulement stator sera du type thermosettable, à base de mica et de résine époxy. L'enroulement sera constitué de trois circuits triphasés en parallèle, c'est-à-dire de neuf conducteurs rejoignant d'un côté les trois bornes de la machine, de l'autre côté le point neutre isolé. Celui-ci sera formé au voisinage immédiat de l'alternateur-moteur et portera les transformateurs de mesure nécessaires aux circuits de mesure, de comptage et de protection.

La machine synchrone sera refroidie à l'air en circuit fermé à l'aide de ventilateurs indépendants. L'air chaud sera refroidi à l'eau par des réfrigérants fixés à l'extérieur de la carcasse du stator. Le courant d'excitation sera fourni par un alternateur auxiliaire monté au-dessus de la machine principale sur le même arbre. Ce courant sera redressé et réglé par un dispositif statique à thyristors.

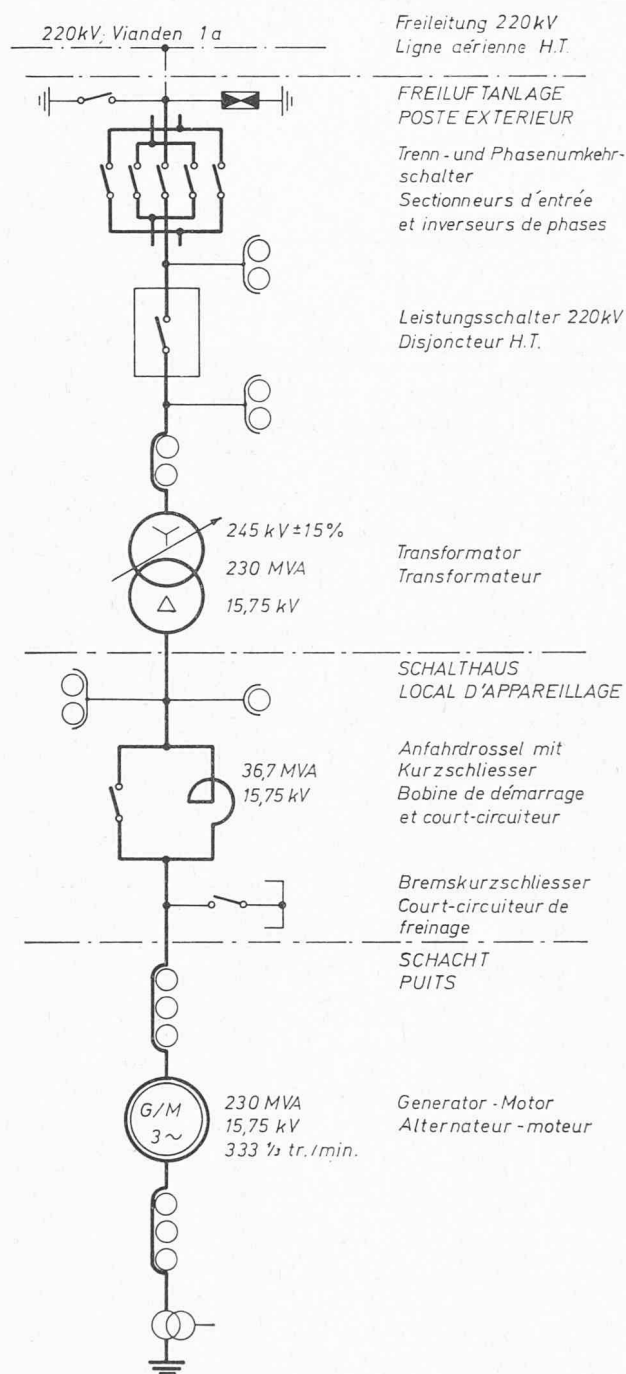


Fig. 12. — Schéma de principe unifilaire du circuit principal de la 10^e machine.

Circuit électrique principal (fig. 12)

Des barres gainées en aluminium relieront l'alternateur-moteur au transformateur. Ces barres partiront des bornes 15,75 kV de la machine synchrone, puis remonteront verticalement le long du mur extérieur du puits vers le transformateur en passant par un bâtiment d'appareillage où seront installés les interrupteurs de freinage, la self de démarrage avec ses courts-circuiteurs, ainsi que les transformateurs de mesure moyenne tension (voir ci-dessous, équipement de démarrage et de freinage).

Tous ces appareils seront exécutés avec des gaines concentriques mises à la terre, à phases entièrement séparées. De cette façon, les risques de courts-circuits et d'accidents seront considérablement réduits.

Un transformateur triphasé unique de 230 MVA assurera la liaison avec le réseau de 220 kV. Une étude comparative a montré que cette solution est la moins coûteuse et la moins encombrante. Le poste extérieur 220 kV sera implanté en partie au-dessus du bâtiment d'appareillage 15 kV, en partie sur une plate-forme aménagée au sud du puits (voir fig. 8). En raison du manque de place, on recherchera une solution aussi compacte que possible. Le poste comprendra les appareils suivants :

- le disjoncteur de couplage de la machine,
- les sectionneurs d'isolement et d'inversion de phases,
- les transformateurs de mesure et parafoudres 220 kV.

Le poste sera relié au réseau 220 kV de la RWE par une ligne aérienne à un terne. Sans appareils de coupure, celle-ci rejoindra le terne sud de la liaison actuelle Vianden I - Niederstedem sur le pylône le plus rapproché qui se trouve près de Bivels en territoire luxembourgeois.

Le parcours exact de la nouvelle ligne n'est pas encore déterminé, mais un tracé rectiligne d'environ 1 km avec un rebroussement avant la descente vers le 10^e groupe, sur le versant du Bildchen, sera probablement adopté.

Une liaison par câbles monophasés placés dans un tunnel reliant le 10^e groupe à Vianden I en ligne droite a été abandonnée pour des raisons financières, malgré certains avantages techniques.

Problèmes particuliers liés aux groupes réversibles

Avant de pousser plus loin la description de l'équipement de la 10^e machine, il convient d'examiner les deux problèmes les plus délicats que posent les groupes réversibles à savoir :

- l'étude hydraulique, en particulier la cavitation en pompe,
- le passage de la marche en turbine à la marche en pompe.

Dans chaque cas, nous étudierons successivement l'aspect général de la question et la voie choisie à Vianden.

Etude hydraulique de la turbine-pompe

La roue de la turbine-pompe pour la hauteur de chute qui nous intéresse constitue nécessairement un compromis entre la turbine Francis et la pompe centrifuge à un étage. Ce fait explique la légère perte de rendement par rapport aux groupes ternaires.

Le problème pompe étant plus difficile à résoudre que le problème turbine, les turbines-pompes sont en première approximation des pompes adaptées à la marche en turbine et équipées à cet effet de directrices mobiles. Mais, tandis que dans le cas d'une pompe classique, la construction en deux ou plusieurs étages selon la hauteur permet de diminuer le risque de cavitation à l'entrée, la marche en turbine impose la construction en un seul étage. C'est pourquoi on est obligé d'abaisser considérablement la cote d'implantation (Vianden I, 207 m ; 10^e machine, 193 m) pour obtenir une marche satisfaisante. D'autre part, les directrices sont soumises à de très fortes vibrations en pompe et pendant le démarrage. Aussi la forme des directrices doit-elle faire l'objet d'une étude hydraulique et mécanique approfondie.

Essais sur modèles réduits (fig. 13)

Pendant les années 1968 et 1969, des essais sur modèles réduits effectués aux laboratoires des sociétés Escher Wyss, Zurich et Voith, Heidenheim ont permis de déterminer les plus importantes propriétés hydrauliques du type de roue choisi, à savoir :

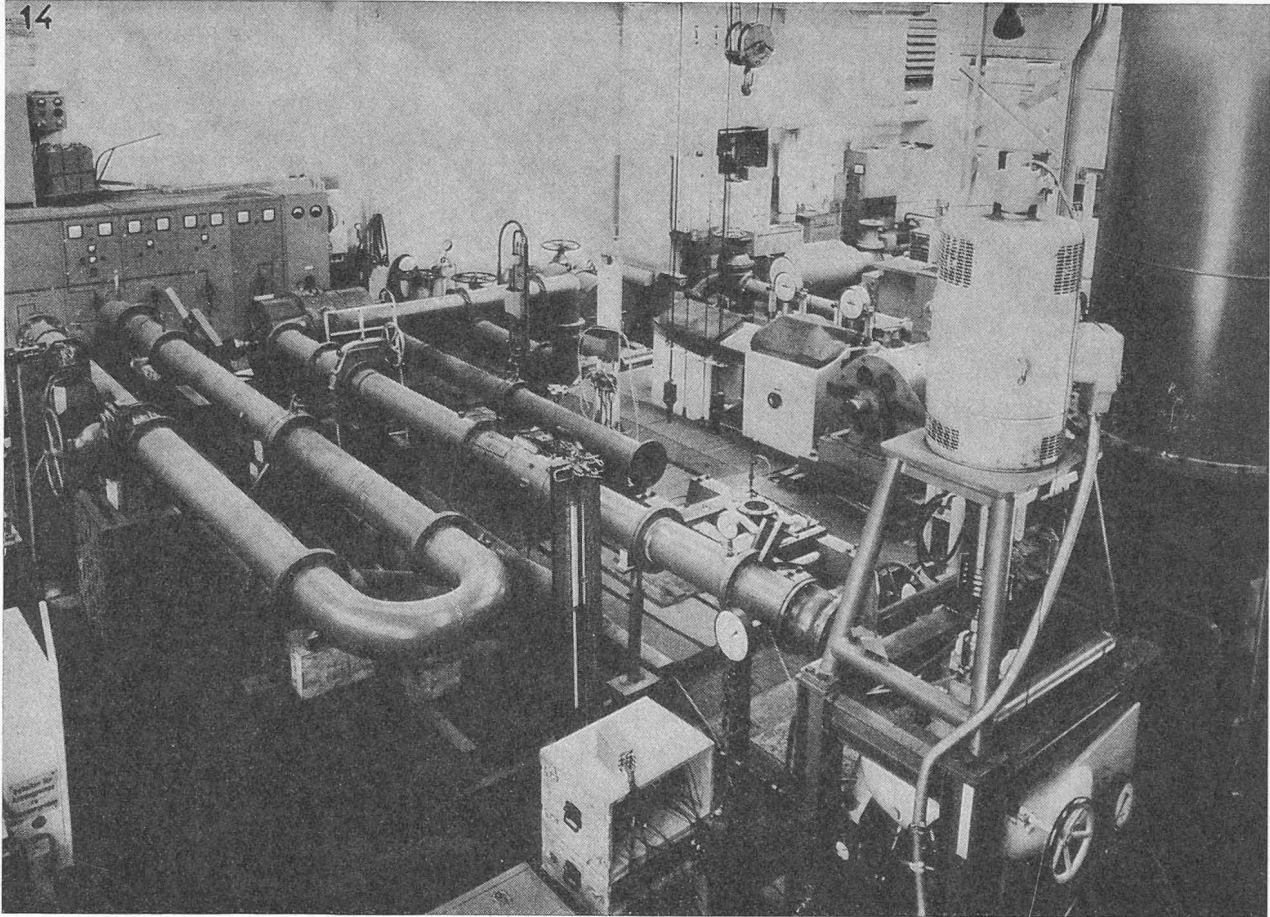


Fig. 13. — Vue du modèle réduit de la 10^e machine en cours d'essais.

- rendements, caractéristiques en pompe et en turbine,
- démarrage en pompe,
- marche en régime transitoire,
- vibrations des directrices,
- cavitation,
- écoulements dans l'aspirateur, forme hydraulique à adopter.

L'étude du démarrage en pompe a montré qu'au point de vue hydraulique, on peut indifféremment démarrer dans l'air (turbine-pompe dénoyée) ou dans l'eau (turbine-pompe noyée). Actuellement, c'est la première méthode qui a été retenue. Cependant, si les conditions électriques du démarrage le permettent, on pourra, comme nous le verrons plus loin, passer au démarrage noyé, plus simple mais nécessitant un couple moteur plus élevé.

L'étude de la cavitation en pompe a permis, grâce à de légères modifications du tracé de la roue, de relever la cote de calage de la machine industrielle de 5 m par rapport au niveau initialement prévu. Il en résulte une économie appréciable sur le génie civil.

Démarrage en pompe

Le démarrage en pompe des groupes réversibles pose des problèmes d'autant plus difficiles que les groupes sont plus puissants. Contrairement aux groupes ternaires, l'inversion du sens de marche nécessite le freinage, puis l'accélération des masses tournantes de la machine synchrone

pendant un temps très court, sans que l'on puisse utiliser pour cela la turbine-pompe elle-même. Ainsi, malgré l'utilisation de moyens de démarrage plus puissants, on est amené à admettre des temps d'inversion plus longs : Turbine-pompe, 6-15 min., groupe ternaire, 2-3 min. Plusieurs méthodes sont possibles :

- lancement par moteur électrique auxiliaire,
- lancement par turbine auxiliaire,
- démarrage en fréquence par un autre groupe hydro-électrique ;
- démarrage asynchrone à tension réduite ou à pleine tension.

Le lancement par moteur électrique auxiliaire ou « pony-motor » est la méthode la plus couramment utilisée dans les installations existantes (Etats-Unis, Grande-Bretagne, Japon, Allemagne). Le pony-motor est un moteur asynchrone à rotor bobiné monté sur l'arbre du groupe réversible, dont le nombre de pôles est inférieur de deux unités à celui de la machine principale. On synchronise en agissant sur le couple moteur à l'aide d'une résistance liquide réglable en série avec le circuit rotorique du moteur de lancement.

Si l'on démarre par cette méthode, il faut dénoyer la turbine-pompe, afin de réduire le couple résistant. Selon le temps de démarrage qu'on se fixe et le moment d'inertie à accélérer, la puissance du moteur atteint 5 à 10 % de celle de la machine principale.

Dans la plupart des installations où l'on applique ce procédé, on se contente de temps d'inversion relativement longs d'environ 10 à 15 minutes. Des conditions de démarrage plus sévères conduiraient à des moteurs de lancement trop grands et la solution perdrait tous ses avantages par rapport au groupe ternaire classique.

Le *lancement par turbine auxiliaire* qui a été étudié pour le 10^e groupe a été éliminé pour des raisons à la fois économiques et techniques. Il permet théoriquement d'obtenir des couples de démarrage plus énergiques que la méthode précédente au prix d'un équipement très encombrant, compliqué et coûteux. Cette méthode n'est actuellement appliquée dans aucune grande installation industrielle.

Le *démarrage en fréquence* consiste à coupler la machine électriquement avec un deuxième groupe hydroélectrique qui fournira la puissance motrice en lui restant synchrone de l'arrêt au couplage. Cette méthode reste réservée à des cas spéciaux où l'on dispose déjà d'un deuxième groupe adéquat ainsi que des liaisons électriques nécessaires.

Finalement la solution choisie pour le 10^e groupe est le *démarrage asynchrone à tension réduite* (fig. 14).

Dans ce procédé, la machine synchrone est utilisée elle-même comme moteur asynchrone de lancement. On obtient ainsi une simplification remarquable du groupe, dont les éléments se réduisent en principe à ceux d'un petit groupe

moto-pompe classique à enclenchement direct. Cependant deux difficultés majeures ont jusqu'à présent interdit son application à de très grandes unités :

- les chutes de tension dans le réseau,
- les échauffements du circuit amortisseur du rotor.

Une étude plus détaillée de ces problèmes dépasserait largement le cadre de cet article. Nous nous bornerons ici à décrire brièvement la solution qui a été retenue : *Pour réduire la chute de tension* dans le réseau à la limite imposée de 3 % une *self* sera intercalée entre l'alternateur-moteur et le transformateur pendant le démarrage. Cette self sera court-circuitée avant la synchronisation obtenue simplement par enclenchement de l'excitation. Pour réduire le couple résistant, la *turbine-pompe* sera *dénoyée* pendant le démarrage.

Le circuit amortisseur sera constitué de pôles massifs reliés entre eux par des liaisons interpolaires souples de fortes sections brasées sur les cornes polaires.

Le dimensionnement correct des pôles massifs a été rendu possible grâce à un programme de calcul électronique mis au point à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

La machine et les auxiliaires de démarrage sont conçus de façon à permettre plus tard, quand les conditions du réseau le permettront, le *démarrage direct à pleine tension*, turbine-pompe noyée, ce qui apportera une nouvelle simplification du processus.

Jusqu'à présent, la méthode décrite ci-dessus n'a été appliquée avec succès qu'à des machines de puissance moyenne (50 MW et moins), surtout en Suisse et au Japon.

Freinage électrique

Pour passer directement de la marche en turbine à la marche en pompe, on freinera le groupe en court-circuitant l'enroulement stator et en appliquant un courant d'excitation constant. L'effet de freinage résultera de la transformation de l'énergie cinétique en pertes ohmiques dans le stator. Ce couple s'ajoutera à celui dû aux pertes hydrauliques dans la roue de turbine-pompe qui restera noyée pendant ce processus.

Temps d'inversion

Les méthodes de démarrage et de freinage décrites ci-dessus permettront de passer du turbinage à pleine puissance à la marche en pompe en moins de 5 1/2 minutes (Vianden I : 2 à 3 minutes). Cette performance sera encore améliorée d'environ 1 minute quand on passera au démarrage à pleine tension.

Équipement accessoire

Les principaux auxiliaires électriques et mécaniques du groupe seront concentrés dans le puits et à son voisinage immédiat. Avant de passer à leur description, examinons rapidement les locaux qui seront créés à cet effet ainsi que les moyens de manutention qui y seront installés.

Aménagement intérieur du puits et constructions annexes (fig. 15)

Les plates-formes de montage et les locaux d'exploitation nécessaires seront installés en partie dans le puits, en partie dans une grande *halle de montage* qui coiffera la centrale.

Un mur vertical partagera le puits sur toute sa profondeur en deux parties inégales. Dans la *partie sud* qui recouvrira environ 5/6 de la section seront implantées les fondations du groupe, du robinet sphérique et du coude

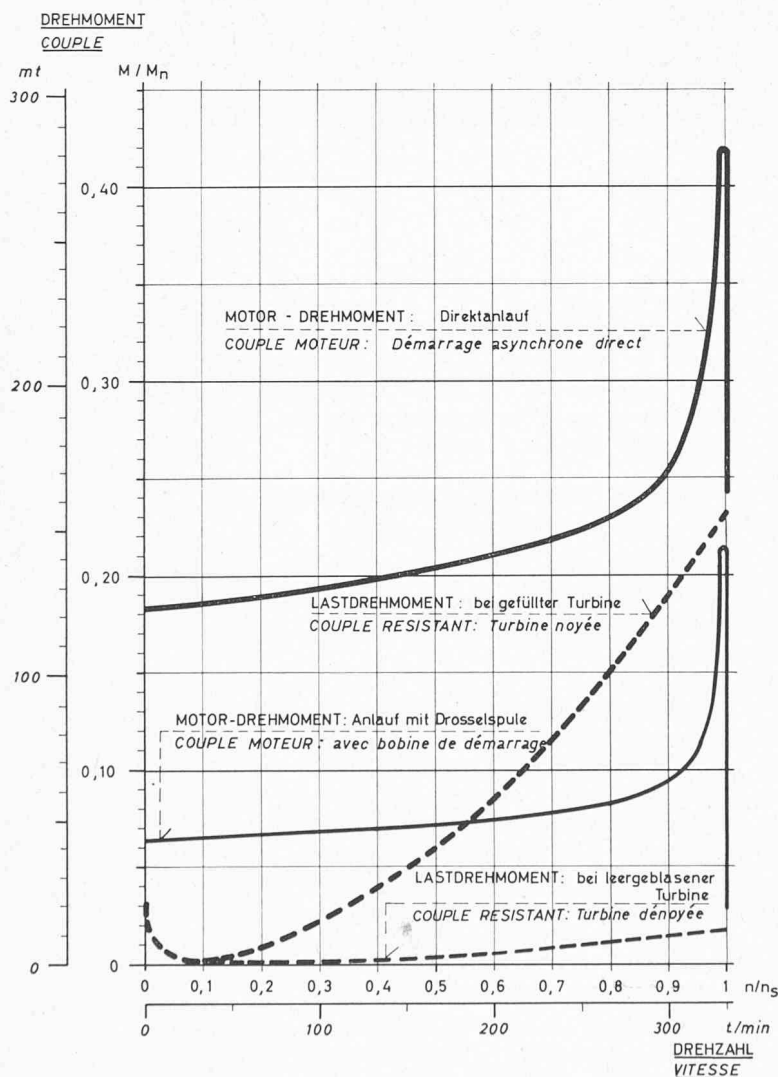


Fig. 14. — Démarrage asynchrone, courbe des couples.

d'aspiration. A l'exception du bout d'arbre qui portera les bagues collectrices de l'alternateur-moteur, le groupe sera installé entièrement en dessous du niveau de la plate-forme de montage (cote 204,38). L'espace au-dessus de ce niveau restera libre et sera balayé par le pont portique de 300 tonnes monté dans la halle.

En dessous de la plate-forme de montage, autour des fondations du groupe, les auxiliaires électriques et mécaniques liés directement à la machine principale seront répartis sur quatre étages.

La partie nord de l'ouvrage ($\frac{1}{6}$ de la section), appelée « puits de service » servira à loger la cage d'escalier avec l'ascenseur, le monte-charge de 10 tonnes, un puits de ventilation, des puits à câbles et différents locaux électriques.

Les tableaux de commande, d'automatisme et d'alimentation des auxiliaires seront installés sur un balcon accolé à cette construction, à la cote 213,90. Un deuxième balcon de même largeur, à la cote 210,90 servira à la répartition des câbles.

Accessoires mécaniques du groupe

L'étude de l'équipement auxiliaire tiendra compte des impératifs suivants :

- simplicité maximum,
- entretien réduit,
- autonomie du groupe en cas de panne de l'alimentation électrique des auxiliaires,
- commande et surveillance à distance.

Cet équipement sera groupé aux trois étages inférieurs du puits, à proximité immédiate de la turbine-pompe et du robinet sphérique.

Il comportera :

- le système de *commande du robinet sphérique* ;
- les *auxiliaires de lubrification* ; comme le pivot et les paliers seront autolubrifiants, les pompes de circulation seront superflues ;
- le *régleur*, le groupe de génération d'huile sous pression et la partie hydromécanique de l'automatisme ; en raison de ses nombreux avantages surtout pour une machine astreinte au réglage de fréquence du réseau, un régleur du type électronique a été adopté ;
- le *groupe de dénoyage* comportant deux compresseurs et deux réservoirs ;
- les *compresseurs de stabilisation* qui produiront l'air comprimé à basse pression injecté dans la turbine-pompe pendant les régimes hydrauliques instables ;
- les *pompes d'exhaure* et les circuits d'eau de réfrigération.

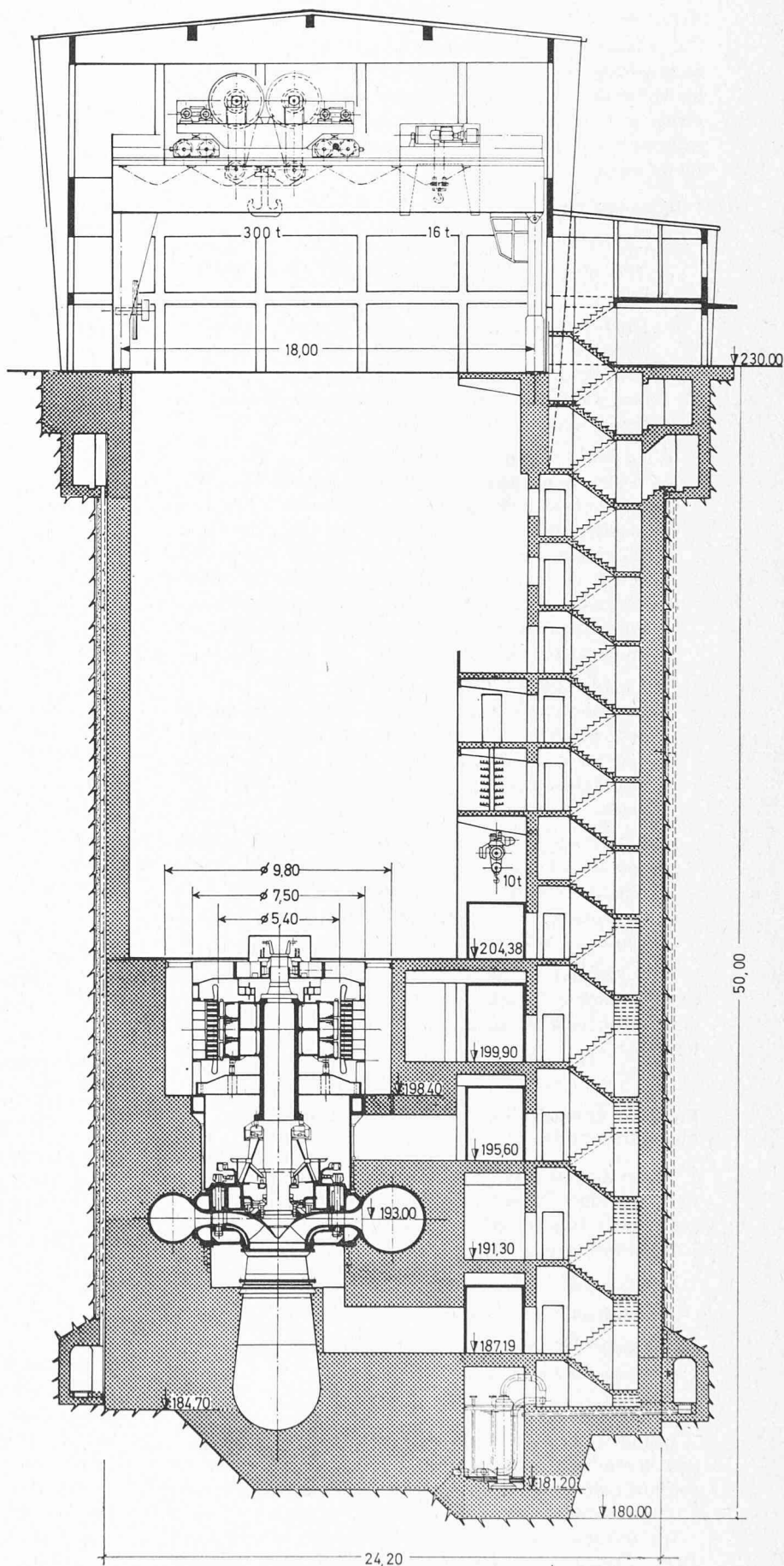


Fig. 15. — Centrale en puits et halle de montage, coupe verticale.

Accessoires électriques

Ces accessoires seront placés soit à l'étage immédiat en dessous de la plate-forme de montage, au voisinage immédiat de la machine synchrone, soit sur l'estrade où seront groupés les appareils de commande, soit aux étages supérieurs du puits de service et dans les locaux d'exploitation de la halle.

Ils comporteront :

- *L'appareillage d'excitation* et de réglage de tension, ainsi que la cellule du point neutre (étage alternatif).
- *L'automatisme*, les organes de commande, de surveillance et les protections de la machine principale (estrade de commande) ; on choisira un matériel à base d'éléments électroniques permettant une exploitation sans personnel de quart.
- *La télécommande et télésignalisation*
Toutes les manœuvres et signalisations seront centralisées à la salle de commande de Vianden I. Les deux usines seront reliées à cet effet par des câbles téléphoniques. Cependant, pour permettre l'exploitation en cas de perturbation de la télécommande, toutes les manœuvres pourront être effectuées localement, soit électriquement, soit en agissant directement sur les organes mécaniques.
- *L'alimentation des auxiliaires*
Le tableau 6 kV sera alimenté en boucle de Vianden I, de Lohmühle et du bassin supérieur. Ce tableau ainsi que les deux transformateurs 6 kV/400 V seront placés dans des locaux prévus dans la halle de montage.
- *Les tableaux de répartition* basse tension et courant continu ainsi que les redresseurs et batteries seront répartis entre différents locaux du puits et de la halle de montage en fonction de l'emplacement des auxiliaires qu'ils alimentent.

Afin d'assurer l'autonomie et l'éclairage de secours, un certain nombre de départs 380 V seront alimentés par l'intermédiaire d'un onduleur statique à partir de la batterie 220 V.

Frais de construction, planning, attribution des commandes

Le devis établi pour l'ensemble des frais de construction du 10^e groupe s'élève à 800 millions de francs luxembourgeois sur la base des prix et salaires actuels.

Cet investissement se répartira de la façon suivante :

- Génie civil 29 %
- Constructions métalliques 11,5 %
- Equipement hydraulique et mécanique 21,5 %
- Equipement électrique 22 %
- Etudes, achats de terrains, impôts et divers . . . 16 %

L'étude et la supervision des travaux ont été confiées à une communauté de bureaux d'études, formée par les sociétés Lahmeyer A.G., Francfort, Société générale pour l'industrie (SGI), Cointin (Genève).

Les travaux proprement dits ont commencé le 1^{er} mars 1970. Certains travaux préparatoires avaient déjà été exécutés auparavant. La durée des travaux étant fixée à trois années, la mise en service du groupe est prévue pour la première moitié de 1973.

Les principales commandes actuellement attribuées sont les suivantes :

Travaux de génie civil	<i>Communauté d'entreprises :</i> Soc. des Entrepr. de Trav. publ. André Borie, Paris Heinrich Lenhard K.G. Saarbrücken
Puits blindé	Vereinigte Österreichische Stahl- u. Eisenwerke (Vöest) A.G. Linz (Autriche)
Halle, constructions métalliques	Soc. des Anc. Ateliers de Constr. Métalliques Barblé S.A. Strassen (Luxembourg)
Turbine-pompe, régleur et auxiliaires mécaniques	<i>Association momentanée :</i> Escher Wyss GmbH, Ravensburg J. M. Voith GmbH, Heidenheim (Allemagne)
Alternateur-moteur et dispositif d'excitation	<i>Association momentanée :</i> Brown Boveri A.G., Mannheim Siemens A.G., Berlin
Robinet sphérique	Neyrpic, Constructions Hydrauliques et Mécaniques, Grenoble
Vannes-wagons aval	Vöest A.G., Linz
Pont portique 300 t	Munck International, Bergen (Norvège)

Conditions d'exploitation

Le groupe et surtout les auxiliaires sont conçus de façon à permettre la *commande à distance sans qu'il y ait de personnel en permanence près de la machine*. Pour cela différentes conditions seront réalisées, ainsi que nous avons vu dans les chapitres précédents :

- Simplification de l'entretien par l'utilisation d'un pivot et de paliers autolubrifiants et suppression du graissage par l'utilisation généralisée de coussinets en téflon partout où cela est possible.
- Utilisation de types de joints et de manchettes à longue durée de vie.
- Emploi d'aciers inoxydables pour les pièces qui craignent la cavitation ou la corrosion.
- Simplification générale des auxiliaires par la construction de la machine et par le choix du système de démarrage.
- Multiplication des organes de surveillance de façon à signaler, à enregistrer et à transmettre à la salle de commande tous les défauts et incidents imaginables.
- Utilisation généralisée d'éléments électroniques.

L'utilisation d'un ordinateur a été envisagée mais n'est pas encore décidée définitivement. Dans le cadre de la rationalisation en cours de la centrale de Vianden I, il serait intéressant d'installer cet appareil dans la centrale principale, ce qui permettrait de l'utiliser également pour le traitement d'information des machines actuelles. Toutes les données en provenance du 10^e groupe seraient alors transmises à l'ordinateur par la télésignalisation. L'automatisme proprement dit qui devrait continuer à fonctionner si le câble de transmission était endommagé resterait du type électronique à câblage fixe. L'automatisme et les protections seraient nécessairement installés sur place.

Révisions périodiques

Malgré l'absence de personnel en période normale, il faudra créer la place nécessaire pour le montage, le démontage et la manutention des pièces lourdes, ainsi que pour les travaux d'entretien et de réparation. Ces travaux et contrôles se feront dans une cadence de plusieurs années qui dépendra des défauts que l'on constatera ultérieurement.

Quoi qu'il en soit, les délais dont on disposera en général ne nous permettront plus de transporter toutes les pièces à l'atelier principal qui se trouve devant la centrale de Vianden I.

C'est pourquoi il sera absolument nécessaire de créer sur place des moyens de démontage et de manutention ainsi que des ateliers auxiliaires suffisants pour exécuter les révisions normales.

Dans le puits, un petit atelier sera prévu au niveau de la plate-forme de montage. Cet atelier, ainsi que les auxiliaires qui se trouveront aux étages inférieurs, sera desservi par un monorail fixé au-dessous du balcon inférieur. Comme la surface disponible dans le puits sera nettement insuffisante pour déposer toutes les pièces, deux plates-formes de montage couvertes, de part et d'autre du puits, et une aire de déchargement à l'air libre, côté lac, seront également accessibles par le portique de 300 tonnes et pourront être utilisées pendant les révisions. Un deuxième atelier et un magasin sont prévus dans le bâtiment annexe, au même niveau.

Conclusions

Comme nous l'avons indiqué au début de cet exposé, la centrale du 10^e groupe sera une réalisation technique unique pour des raisons multiples :

- puissance de la turbine-pompe,
- mode de démarrage,
- mode d'exploitation,
- télécommande et automatisation.

Par ailleurs, la liste des entreprises, firmes et bureaux d'études qui ont été chargés de sa construction, montre déjà maintenant que la 10^e machine sera une réalisation européenne, comme ce fut déjà le cas pour Vianden I.

En effet, des ingénieurs, techniciens et ouvriers d'un grand nombre de pays y participeront et de ce fait l'ensemble de la technique européenne de nombreuses branches profitera des expériences qui y seront faites.

Malgré ce rayonnement européen qui dépassera de loin nos étroites frontières, on peut affirmer dès à présent que l'apport luxembourgeois sera loin d'être négligeable, non seulement par le site et par la contribution de notre industrie, mais également par l'utilisation des expériences de la centrale actuelle et par la collaboration active de ses ingénieurs et de son personnel au nouveau projet.

Adresse de l'auteur :
Louis Wehenkel, c/o Société électrique de l'Our,
Centrale de Vianden, Luxembourg.

Réforme du programme de formation des ingénieurs électriciens à l'EPF de Lausanne

par PIERRE HOFFMANN, ingénieur électricien SIA

L'évolution rapide des techniques nécessite une révision périodique du programme et des méthodes de formation des ingénieurs. C'est pourquoi le Département d'électricité de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne a procédé, l'année dernière, à une large enquête qui avait pour but essentiel de déterminer dans quelle mesure les méthodes d'enseignement et les programmes existants donnent satisfaction, ce qui devrait être supprimé et en quoi il faudrait innover. Il a donc envoyé environ 1600 questionnaires et a reçu 165 réponses d'anciens élèves de l'école et 115 réponses d'ingénieurs d'autres écoles. A ces réponses de praticiens sont venues s'ajouter celles de 26 assistants, de 12 professeurs et de 8 étudiants de l'école, ainsi que de 33 personnes diverses (ingénieurs-techniciens ETS et autres). Ainsi le nombre des questionnaires retournés représente 22 % du total des questionnaires distribués et près de la moitié des réponses proviennent d'ingénieurs diplômés entre 1961 et 1970. Les résultats de l'enquête ont fait l'objet d'un rapport qui nous a été communiqué et qui a été publié intégralement¹.

Il est intéressant de noter que parmi les branches enseignées qui sont jugées les moins utiles ou desquelles on pense qu'on leur attribue trop d'importance, on trouve l'hydraulique et les machines hydrauliques, la thermodynamique et les machines thermiques, la mécanique et la résistance des matériaux, tandis qu'on estime qu'il y a

certaines lacunes notamment dans l'enseignement des mathématiques appliquées et de l'informatique, des méthodes de gestion des entreprises et d'organisation industrielle.

Les opinions semblent assez uniformes au sujet des travaux à confier aux ingénieurs, d'une part, et aux ingénieurs-techniciens, d'autre part. D'une manière générale, il ressort de l'enquête que l'on devrait développer chez les premiers le sens de la responsabilité et de la direction, l'aptitude à se former une vue d'ensemble, à concevoir des systèmes et au travail théorique, tandis que les tâches des seconds paraissent plus spécialisées et adaptées à la production, à l'exploitation, à la réalisation ainsi qu'aux travaux de routine et de perfectionnement.

Quant au fond même de l'enseignement, la grande majorité de ceux qui ont répondu à l'enquête pensent qu'il doit être axé principalement sur la réflexion créatrice, les méthodes de travail intellectuel, l'adaptation aux situations et techniques nouvelles plutôt que sur l'acquisition d'un trop grand volume de connaissances techniques d'utilité immédiate.

En ce qui concerne les matières enseignées dans le cadre de la formation scientifique et technique, elles devraient, d'après la grande majorité des réponses, se répartir de la manière suivante :

- Enseignement scientifique de base (mathématiques, physique, mécanique, chimie générale) : 25 à 30 %

¹ Bull. Ass. suisse Electr., t. 62 (1971), n° 2, p. 123 à 127.