Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 125 (1999)
Heft: 3

Artikel: Aménagement Cleuson-Dixence: équipements électriques
Autor: Nicolet, Alain
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79614

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 27.07.2025

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

Aménagement Cleuson-Dixence

Equipements électriques[1]

Par Alain Nicolet, ing. élec. EIG EOS, Cleuson-Dixence 1950 Sion

Installations de chantier

Le creusement par tunnelier ainsi que l'équipement des ouvrages d'amenée d'eau depuis le barrage du lac des Dix jusqu'à l'usine représente un important travail d'infrastructure tant en ce qui concerne le génie civil que le domaine électrique. En effet, du barrage au départ du puits blindé, la galerie d'amenée d'eau s'étire sur plus de 15 km à une altitude quasi constante d'environ 2000 m dans des régions totalement isolées (fig. 1): il fallait donc alimenter en énergie électrique tous les chantiers répartis le long de cet ouvrage. D'autre part, trois tunneliers ont dû être engagés, à savoir:

- un pour creuser le barrage afin d'y aménager une prise d'eau,
- un autre, partant du même endroit et se dirigeant vers le point médian de cette amenée d'eau situé à Tortin,
- un troisième, qui part du haut du puits blindé situé à Tracouet et se dirige également vers Tortin.

Outre les quelque 2 MW de puissance électrique nécessités par ces tunneliers, il fallait encore tenir compte de la consommation des centrales à béton, de la ventilation, de l'éclairage et des besoins des divers corps de métier engagés (soudure, atelier mécanique, etc.). Chaque chantier principal devait donc être assuré de disposer d'une puissance d'environ 4 à 6 MW, sept jours sur sept et 24 heures sur 24. De plus, le réseau électrique constitué devait être capable d'absorber des à-coups d'énergie brusques et importants sans perturber les autres utilisateurs de petites puissances, tels que l'électronique ou les systèmes informatiques.

L'infrastructure électrique nécessaire a été conçue en 16 kV et les chantiers clefs ont été mis en réseau afin de toujours disposer d'une alimentation de secours, soit par câbles, soit par ligne aérienne. Le chantier de Tracouet est par exemple alimenté depuis un poste de transformation 95/16 kV situé à Bleusy, duquel partent des câbles triphasés de 3 x 150 mm² de section, posés en tranchée à un mètre de profondeur, sur une longueur de 3,5 km. Une autre réalisation typique est l'alimentation, au moyen d'une ligne aérienne d'une portée de 600 m, d'un chantier culminant à environ 2 500 m sur le sommet de la Dent de Nendaz.

A 2000 m d'altitude, les routes sont évidemment impraticables en hiver, c'est pourquoi les deux chantiers principaux – soit celui du Chargeur situé au pied du barrage, et l'important « nœud » de Tracouet avec, d'une part, l'arrivée du puits blindé qui descend vers l'usine de Bieudron et, d'autre part, le départ vers la Dent de Nendaz où se trouve la cheminée d'équilibre - sont pourvus chacun d'un téléphérique lourd (2 x 15 t) alimenté également par piquage sur les lignes 16 kV desservant les vallées adjacentes. L'alimentation du téléphérique « Plan Désert – Tracouet » est notamment assurée par deux transformateurs 16/0,4 kV de 1000 kVA. La région étant très escarpée, la ligne aérienne 16 kV sur poteaux de bois

[1] Voir aussi *IAS* N° 4 du 4 février 1998, pp. 44-49; N° 8 du 1er avril 1998, pp. 118-122; N° 17/18 du 19 août 1998, pp. 266-270.

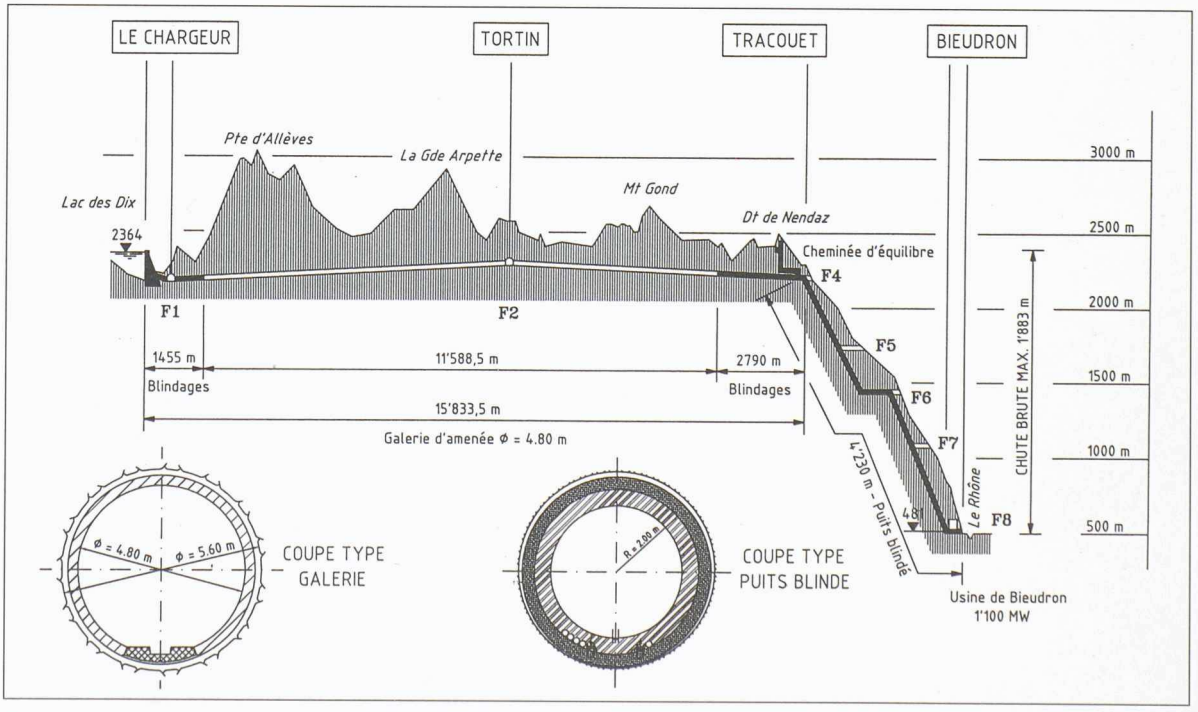
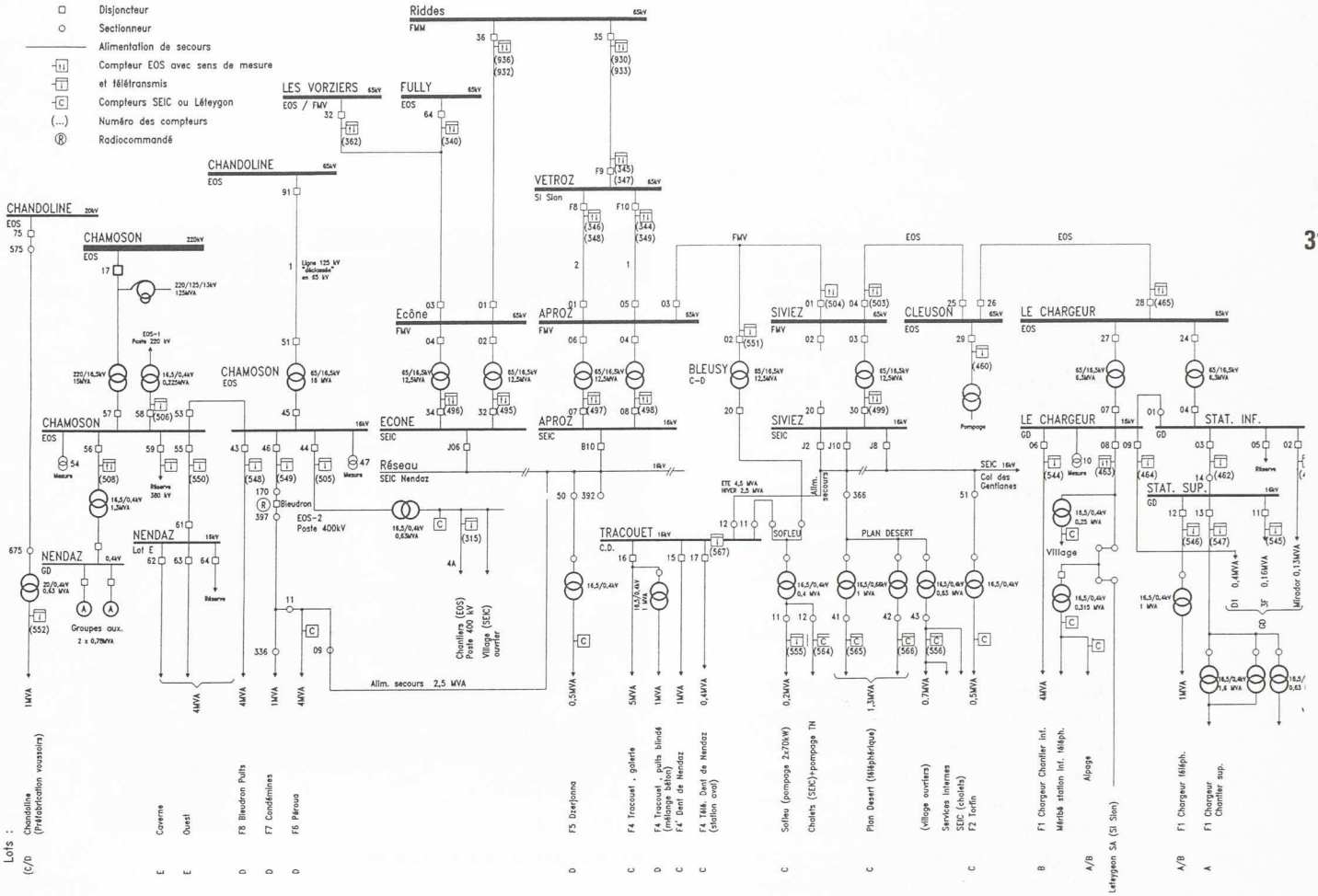


Fig. 1 – Galerie d'amenée et puits blindé de l'usine de Bieudron: profil en long et coupes types



g. 2 – Alimentation électrique des chantiers

reliant les installations du téléphérique à la plaine a été posée par hélicoptère. Enfin, il a encore fallu alimenter en énergie le chantier de Bieudron, où d'importantes excavations (155 000 m³) étaient prévues pour l'implantation d'une usine de 1 200 MW.

Le schéma général d'alimentation des chantiers (fig. 2) montre l'importance des installations qui ont été réparties sur quelque 20 km afin de satisfaire aussi bien les besoins techniques que ceux relatifs au bien-être de six cents personnes engagées dans les travaux. Mentionnons encore que le passage d'alimentations provisoires des chantiers en installations définitives a dû être étudié avec soin afin de ne pas provoquer de ruptures de fourniture électrique. Quant à l'énergie consommée, elle doit évidemment être comptabilisée de manière fiable pour une juste répartition des charges entre les différentes entreprises utilisatrices; tous ces comptes sont transmis par fibres optiques à une distance de plus de 100 km en vue de la facturation.

Alternateurs

La conception des alternateurs devait obéir au cahier des charges suivant:

- hauteur de chute à disposition: 1 883 m;
- puissance désirée de la centrale: 1 200 MW;
- capacité du lac de retenue: 400 millions de m³;
- distance barrage - usine: 15,8 km à 2 100 m d'altitude;
- puits blindé: 4,5 km.

Par rapport à une variante à quatre groupes, le choix de trois groupes de 423 MW à cinq jets permettait une importante économie financière, tant en ce qui concerne le volume d'excavation que le matériel électromécanique.

Les alternateurs devaient donc être dimensionnés pour 465 MVA, portés par la suite à 500 MVA, ce qui constitue un record mondial avec 37,5 MVA de puissance électrique par pôle. En ce qui concerne le montage de l'alternateur, la différence de puissance entre trois ou quatre groupes ne modifie pas le problème, car avec de telles puissances, ces machines doivent de toute façon être acheminées sur le site en pièces détachées afin d'être montées entièrement sur place.

Pour gagner également sur la hauteur de la caverne, il a été décidé de concevoir des alternateurs dotés de deux paliers seulement: un palier pivot du côté non entraîné et un palier guide du côté turbine (fig. 3). Dans le cas de l'usine de Bieudron, cette conception implique que la première vitesse critique de flexion se trouve entre les vitesses de délestage (500 t/min) et de survitesse (800 t/min). Il a donc été impératif de calculer avec soin les rigidités des appuis ainsi que la qualité du béton afin de ne pas situer la vitesse critique trop près de la vitesse de délestage. Ces points ont dû être minutieusement vérifiés lors des premiers essais dynamiques appliqués aux alternateurs (fig. 4).

Pour de telles puissances et en fonction du nombre de pôles (sept paires de pôles; 428 t/min), le fournisseur n'avait pas d'autre choix que de prévoir une machine entièrement refroidie à l'eau,

comme cela ressort clairement de la figure 5 qui représente deux alternateurs de conception très différente. Dans le cas de l'usine d'Itaipu (sur le fleuve Parana, entre la Paraguay et le Brésil), d'une puissance proche de 800 MVA, mais où le nombre de pôles est élevé, le diamètre du rotor est suffisant pour permettre un refroidissement par air tandis que le stator est refroidi à l'eau. Pour l'usine de Bieudron, en revanche, il ressort de ce schéma que seul un refroidissement par eau désionisée était concevable.

Les pôles des rotors sont constitués par des spires en cuivre creux, de section carrée, alors que pour le stator, six canaux de refroidissement en acier inoxydable sont insérés dans le faisceau de cuivre qui constitue une barre Roeble, c'est-à-dire que tous les brins de cuivre sont permutés de façon à occuper toutes les positions dans la barre. Les canaux de refroidissement sont naturellement traités de la même façon.

L'empilage du stator est quant à lui, refroidi par de l'eau brute, comme l'indique le schéma général de l'ensemble du refroidissement reproduit à la figure 6. Ajoutons encore que les pertes additionnelles et les pertes de ventilation sont évacuées à l'aide de six aérothermes répartis autour du stator.

De tels groupes sont également conçus pour fonctionner à pleine charge comme compensateurs synchrones en régimes surexcité ou sousexcité avec respectivement des puissances de 325 et 370 MVA, selon les limites définies, d'une part, par l'échauffement du rotor et, d'autre part, pour des questions de stabilité statique (fig. 7).

Avec un diamètre d'environ 5 m et une masse de 550 t tournant à 426 t/min, il faut savoir que l'arrêt d'un tel groupe prendrait une heure et demie en cas de défaillance de l'alimentation électrique. Autrement dit, les paliers

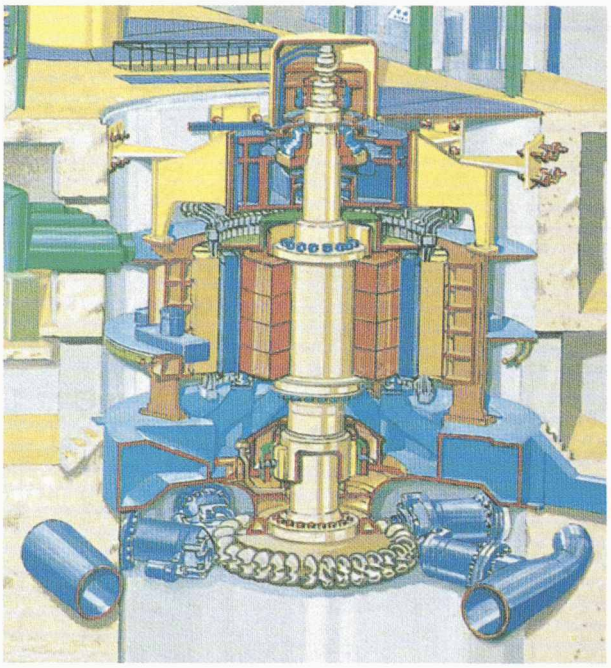


Fig. 3 – Alternateur à deux paliers

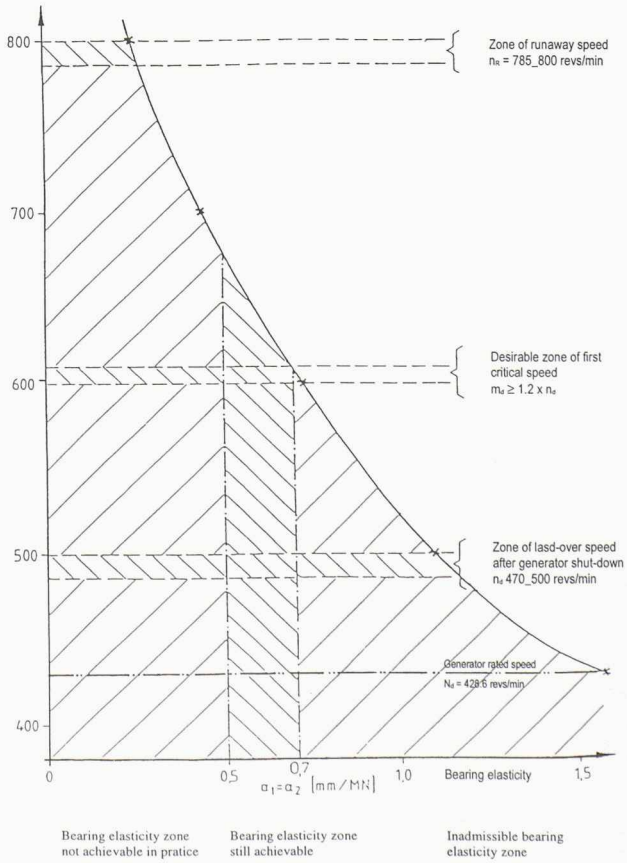


Fig. 4 – Première vitesse de rotation critique de l'arbre en fonction de l'élasticité des paliers

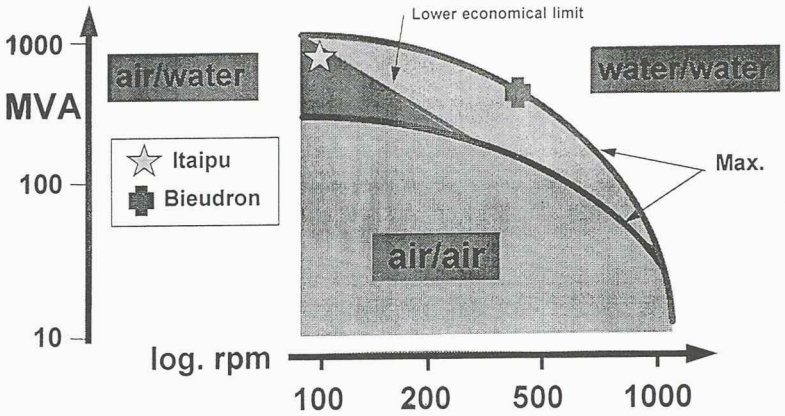


Fig. 5 – Domaines d'utilisation possible des systèmes de refroidissement à air, à eau et mixte

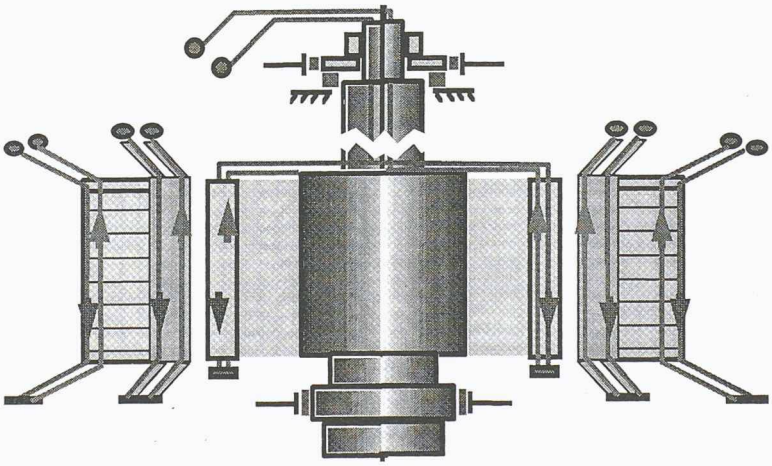


Fig. 6 – Schéma du système de refroidissement à eau

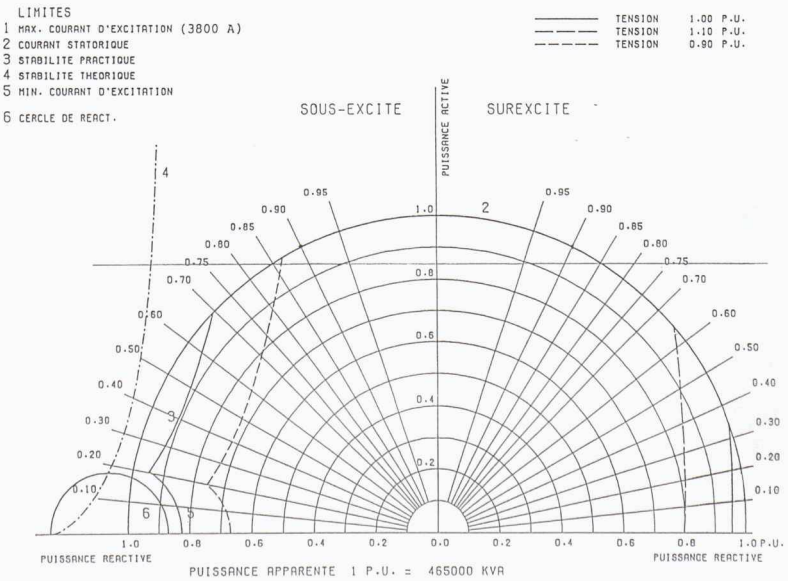


Fig. 7 – Diagramme de charge d'un groupe

des trois alternateurs doivent également être munis d'un dispositif de réfrigération sans pompes, soit par gravité, et un réservoir de 2 500 m³ d'eau a été installé à cet effet en calotte de la caverne. En temps normal, l'arrêt des groupes est obtenu par freinage électrique: après désexcitation, l'alternateur est mis en court-circuit du côté haute tension, c'est-à-dire après les transformateurs de puissance, puis l'excitation est remontée à 1,2 x I_n, ce qui provoque l'arrêt complet du groupe en trois minutes.

L'excitation d'un groupe se fait au moyen de quatre ponts à thyristors (500 V, 2800 A) de redondance N-1, trois d'entre eux suffisant à assurer la marche à pleine puissance. Placés dans des cellules sous les barres blindées 21 kV à la sortie des alternateurs, les transformateurs d'excitation sont de type sec, monophasés de 2000 kVA.

La régulation en tension est assurée par les alternateurs dans une plage de ±10 %, ce afin de simplifier la construction des transformateurs de puissance et dans le but également de les rendre plus fiables.

Liaisons entre alternateurs et transformateurs

Le concepteur de l'alternateur a optimalisé sa machine avec une grande liberté, seule la puissance garantie de 465 MVA ayant été imposée, avec une construction à deux paliers.

La tension résultant des calculs a été de 21 kV ± 10 % et les liaisons alternateurs-transformateurs désirées sont en couplage bloc pour des raisons de simplicité, de place et d'entretien. La solution choisie fait appel à des barres munies d'un blindage en aluminium.

Chaque phase étant blindée pour elle-même au moyen d'un tube en aluminium d'un diamètre de 1100 mm, la section avec 24 000 mm² est légèrement supérieure à celle du conducteur (22 000 mm², section hexagonale, également en aluminium). Un tel système per-

met une circulation de courant dans la gaine en sens inverse au courant du conducteur et par ce fait, réduit les champs électromagnétiques extérieurs dans une proportion de 95 à 98 %. Naturellement, à chaque extrémité, ces gaines sont court-circuitées et mises à la terre en un point. Le refroidissement se fait par convection naturelle, des filtres étant placés à intervalles réguliers pour empêcher le dépôt de poussière sur les isolateurs supportant le conducteur.

Ce type de construction (fig. 8) entièrement soudée apporte les avantages suivants:

- le grand moment d'inertie de l'ensemble conducteur-gaine permet de grandes portées entre charpentes supports;
- le personnel de maintenance est à l'abri de tout contact fortuit avec des pièces sous tension et il n'existe aucune possibilité de déclenchement par l'intrusion d'animaux, d'eau de ruissellement ou de poussières sur les isolateurs;
- l'apparition de défauts phase-phase est impossible;
- la suppression quasi totale de courants induits exclut les pertes supplémentaires dues à des courants circulant dans le ferraillage des bétons, câbles ou tuyaux passant à proximité;
- aucun effort entre conducteurs de phases adjacentes n'apparaît en cas de courts-circuits.

Les calculs de dimensionnement d'un tel système sont effectués par ordinateur sur la base de programmes théoriques, puis contrôlés et adaptés en fonction d'essais pratiques en grand nombre, réalisés sur des installations existantes.

Les paramètres essentiels sont:

- le niveau diélectrique qui, pour des raisons de sécurité, a été élevé à 36 kV pour Bieudron;
- le courant permanent à transiter (15 000 A pour Bieudron);
- les courants à transiter en cas de défauts ou surcharge (courte durée);
- les valeurs maximales asymétriques des courants de défaut à supporter.

Les pertes garanties pour cette installation sont de 750 W/m/phase, soit environ 80 kV pour un système triphasé, type Bieudron (conducteur et enveloppe).

Des dérivations sont prévues d'une part, pour l'installation des transformateurs de mesures, d'autre part, pour les transformateurs d'excitation. Un système de parafoudre complète cette réalisation pour la protection contre d'éventuelles surtensions.

Les raccordements, du côté alternateur comme du côté transformateurs de puissance, sont assurés par des tresses souples en cuivre. La gaine est en outre interrompue par une partie isolante du côté des transformateurs de puissance, car ceux-ci sont équipés d'une mesure des courants de défaut de cuve.

Transformateurs de puissance

La puissance et le nombre de groupes ayant été choisis selon les

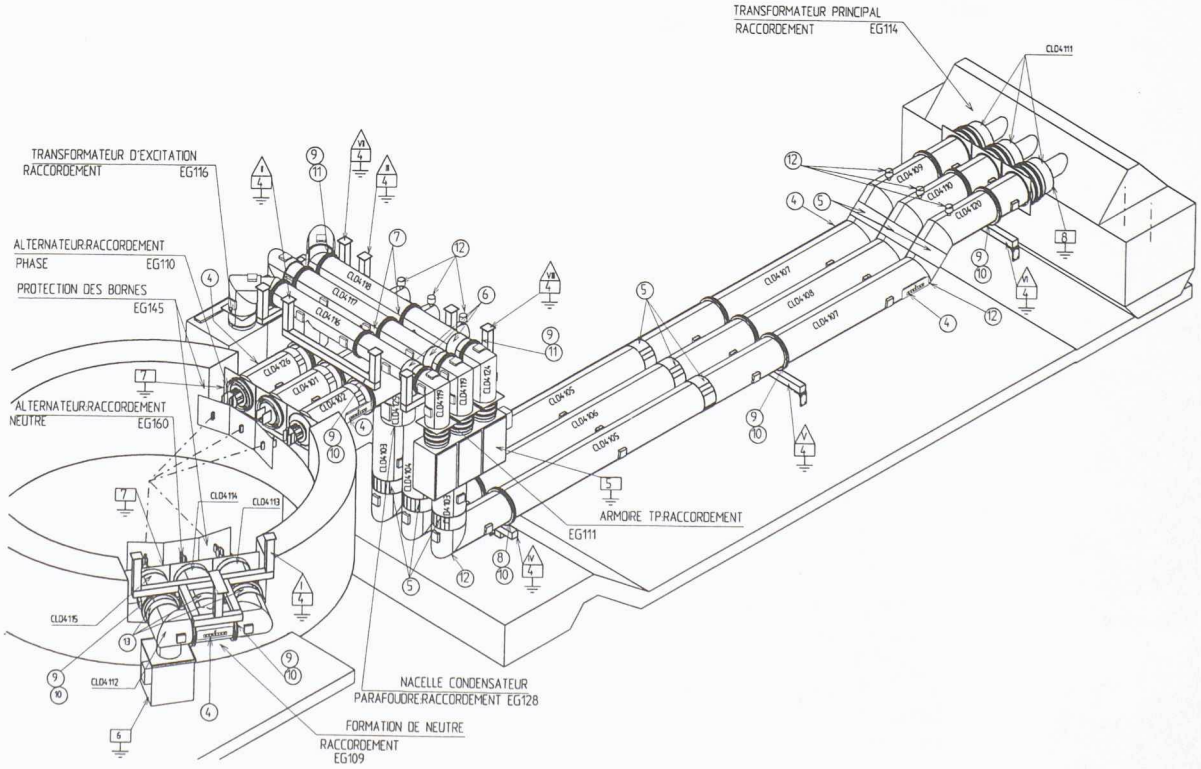


Fig. 8 – Liaison entre alternateur et transformateur par barres blindées: vue isométrique

critères économiques, techniques et de stabilité requis par les alternateurs, il fallait encore déterminer les options suivantes pour les transformateurs:

- transformateurs mono- ou triphasés;
- transformateurs avec ou sans réglage;
- niveau de tension du côté haute tension;
- tension de court-circuit en fonction des impératifs définis par les alternateurs;
- conception de la cuve;
- technologie à adopter.

Les principaux arguments en faveur de transformateurs monophasés résident essentiellement dans la facilité de transport, qui constitue un facteur très contraignant en Suisse, tant en raison des limitations de poids (qui ne peut en aucun cas dépasser 280 t) qu'en ce qui concerne les restrictions de gabarit imposées par les dimensions des tunnels ferroviaires. Un autre avantage est apporté par la simplicité accrue des essais en usine: un transformateur triphasé avec des bornes haute tension protégées par un gaz, l'hexafluorure de soufre (SF_6), n'offre en effet pas l'écartement nécessaire pour des essais en ondes de chocs de manœuvre et des essais de surtension, si bien qu'il faut procéder en plusieurs étapes nécessitant chaque fois le démontage des bornes et le fournisseur doit en outre disposer de bornes d'essais 400 kV huile-air.

Dans la caverne, en revanche, les travaux de génie civil s'avèrent beaucoup plus importants pour accueillir un groupe de trois transformateurs monophasés, qui exigent des niches au minimum deux fois plus grandes qu'un transformateur triphasé, en raison de la complexité inhérente à la confection du triangle en barres blindées et de l'espace nécessaire à l'opération.

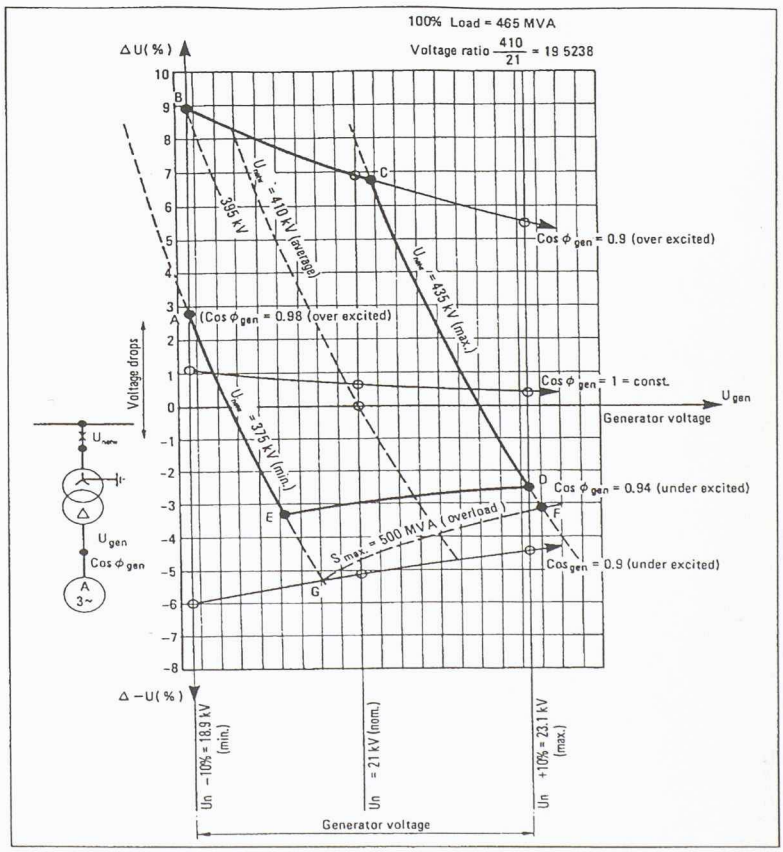
Quant au coût des équipements, la comparaison des deux variantes a montré que le prix de neuf transformateurs monophasés (plus un de réserve) équivaut à celui de quatre transformateurs triphasés.

Le choix s'est finalement porté sur une commande de trois transformateurs triphasés sans réserve et, vu les poids et dimensions résultant des calculs préliminaires qui se situaient au maximum des possibilités de transport (280 t sans huile), il s'est avéré judicieux de ne pas mettre de réglage sur ces unités, ce qui en augmente par ailleurs la fiabilité.

Pour satisfaire aux conditions de gabarit des CFF imposant une hauteur limitée, il a été nécessaire de concevoir les circuits magnétique avec cinq colonnes (deux colonnes de retour non bobinées).

Cela étant, il fallait encore satisfaire à deux contraintes diamétralement opposées, à savoir:

- le fournisseur des transformateurs souhaitait une tension de court-circuit plutôt élevée afin de diminuer les efforts dus au courant de court-circuit du réseau haute tension défini à 55 kA;



	Point *A*	Point *B*	Point *C*	Point *D*	Point *E*
Tension du réseau (kV)	375 (minimale)	395 (intermédiaire)	435 (maximale)	435 (maximale)	375 (minimale)
Tension de l'alternateur U_{na}-10% (kV)	18,9	18,9	21,2	23,1	20,0
Facteur de puissance cos φ (alternateur)	0,98 (surexcité)	0,9 (surexcité)	0,9 (surexcité)	0,94 (sousexcité)	0,94 (sousexcité)
Chute de tension au transformateur (%)	2,8	9	6,8	-2,5	-3,3

Fig. 9 – Variations de la chute de tension du transformateur en fonction de la tension et du cos φ de l'alternateur

– le fournisseur des alternateurs exigeait au contraire la valeur la plus basse possible pour satisfaire aux contraintes de stabilité.

Un compromis acceptable pour les deux fournisseurs a finalement été établi à 13,5 % pour la tension nominale de 410 kV. Cette valeur s'écarte quelque peu de la norme, étant donné que ces transformateurs sont finalement dimensionnés pour 500 MVA et que la valeur conventionnelle devrait être proche de 15 %. Quant aux limites maximum et minimum du réseau haute tension, elles ont été fixées respectivement à 375 kV et 435 kV, avec un rapport de transformation des transformateurs de puissance à 21/410 kV (fig. 9 et 10).

Le diagramme de la figure 10 représente le facteur de puissance du réseau (inductif ou capacitif), en fonction de la charge en pour cent du transformateur, pour divers facteurs de puissance de l'alternateur.

Au point *A*, par exemple, correspondent les valeurs suivantes:

– charge totale du transformateur (465 MVA);
– tension de l'alternateur U_{na} = 21 kV;
– facteur de puissance *cos j* alternateur: 0,9 (surexcité);
– facteur de puissance du réseau: 0,954 (inductif).

Pour le point *B*, ces valeurs sont:

– charge totale du transformateur (465 MVA);
– tension de l'alternateur U_{na} = 21 kV;
– facteur de puissance *cos j* de l'alternateur: 0,9 (sousexcité);
– facteur du réseau: 0,82 (capacitif).

Le diagramme de la figure 9 représente les variations de la tension du transformateur en fonction de la tension de l'alternateur représentée par les points *A, B, C, D* et *E*, sous une puissance assignée de 465 MVA.

Ces transformateurs ont par ailleurs été conçus pour résister aux limites extrêmes de fréquence dans le cas d'une perte soudaine et importante d'énergie sur le réseau: le cas échéant, ils doivent être à même de supporter une fréquence de 47,5 Hz pendant 30 minutes.

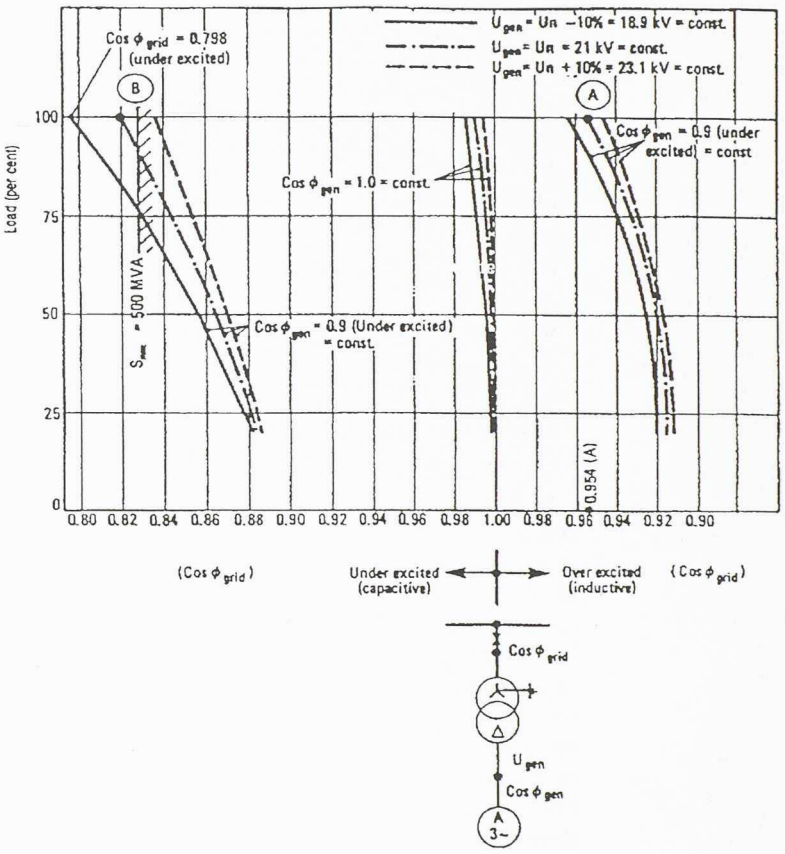


Fig. 10 – Facteur de puissance du réseau (inductif ou capacitif) en fonction de la charge en % du transformateur pour divers facteurs de puissance de l'alternateur

Le refroidissement s'effectue au moyen de dispositifs réfrigérants eau-huile, qui sont au nombre de huit unités de 160 kW par transformateur, plus deux unités de réserve. L'huile y est forcée et dirigée et l'on peut signaler qu'il s'agit des plus grosses unités triphasées installées en Suisse.

Au vu du prix extrêmement élevé du transport, qui représente 20 % du prix d'une unité, ainsi que du délai nécessaire pour commander la remorque routière (une seule est disponible en Suisse!), de même que le convoi ferroviaire (deux wagons en Europe), le concepteur avait proposé au maître d'œuvre une conception « double cuve-cloche » qui aurait permis, en cas de problèmes, de décuver sur place une unité pour inspection et éventuelle réparation. Le pont roulant de 32 t situé à l'extrémité de la galerie des transformateurs aurait en effet suffit à l'opération, mais cette solution n'a malheureusement pas été acceptée. Pour être tout de même en mesure de répondre à une telle éventualité, un déplacement des transformateurs a été prévu par coussins d'air jusqu'à la place de montage où se trouvent deux ponts roulants de 250 t. Un déplacement exigera toutefois un revêtement époxy des sols ainsi que des compresseurs puissants car les débits d'air nécessaires à ce mode de translation sont extrêmement importants. Le transfert des unités s'est fait par chemin de fer sur un trajet d'environ 120 km, puis par la route jusqu'à l'usine de Bieudron au moyen d'une

Fig. 11 – Transport d'un transformateur sur remorque construite ad hoc (photo H. Preisig, Sion)

remorque construite exprès pour ce transport et comportant 192 roues réparties sur 24 essieux (fig. 11). Ce convoi exceptionnel, d'une longueur d'environ 75 m, exige la fermeture des routes nationales: il faut préciser que le poids de telles unités avec huile et accessoires est de 340 t.

Câbles à haute tension

De l'usine de production jusqu'au poste de couplage de Chamoson situé sur l'autre berge du Rhône et distant d'environ 500 m, le transport de l'énergie s'effectue au moyen de câbles secs.

L'isolation choisie est du type réticulé et le câble, qui présente une section de cuivre de 800 mm², est fabriqué selon la méthode horizontale (en opposition à la méthode en chaînette ou en tour vertical). Le système horizontal garantit en effet que l'âme du câble est parfaitement centrée par rapport à l'isolant, ce qui est primordial pour une telle tension. De plus, pour limiter au maximum la contamination de l'isolant par des corps étrangers, l'extrusion, qui constitue l'opération critique, est effectuée selon le système triple, c'est-à-dire que le semi-conducteur interne, l'isolant et le semi-conducteur externe sont extrudés simultanément. La conductibilité des semi-conducteurs doit être une moyenne entre celle du conducteur et celle de l'isolant. Ce matériau doit en outre être d'une qualité super lisse, afin d'éviter des augmentations locales du champ électrique qui pourraient conduire au claquage prématuré de la liaison. Les câbles sont protégés par un écran d'aluminium extrudé et ondulé, d'une épaisseur de 3,5 mm (section 1114 mm²).

Les ondulations de cet écran d'aluminium contiennent également du gaz SF_6 en contact direct, c'est-à-dire à la même pression que celle régnant dans les têtes de câbles. Par-dessus l'écran, on trouve encore une protection anticorrosion en bitume de 1 mm d'épaisseur, puis une gaine extérieure (*Noflamm*) de 5,5 mm doublée d'une couche semi-conductrice extérieure dont le but est de permettre en tout temps de contrôler l'intégrité de la gaine isolante de protection (fig. 12). Ces liaisons doivent répondre aux contraintes suivantes (fig. 13):

- courant de court-circuit: 55 kA;
- durée de court-circuit: 3 sec;
- puissance de transport assignée: 500 MVA;
- tension de tenue au choc: 1550 kV;
- niveau de décharges partielles sous 345 kV: 5 pC;
- essais de tension 1 heure: 460 kV;
- essais après pose 15 minutes: 460 kV;
- essai de la gaine: 25 kV DC.

Pour un système triphasé à pleine charge, les pertes totales s'élèvent à 65 kW/km. Le mode de pose est en « trèfle », bien que la diminution des pertes obtenue par cette méthode demeure insignifiante pour des longueurs n'excédant pas 500 m.

Pour limiter les pertes dans les gaines métalliques, la mise à terre ne se fait que du côté poste de couplage, l'extrémité « transformateur de puissance » étant protégée par des parafoudres basse tension (4,6 kV), qui permettent de limiter les tensions induites provenant de phénomènes transitoires (proximité des disjoncteurs 400 kV sous SF_6) ou défauts sur les lignes du poste de couplage.

Services internes

Sur la rive droite du Rhône, le poste de couplage de Chamoson, assure notamment l'interconnexion entre les réseaux 220 kV et 380 kV, par l'intermédiaire d'un groupe d'autotransformateurs d'une puissance de 600 MVA. Les services auxiliaires de l'usine de Bieudron sont alimentés principalement par un transformateur 220/16 kV de 15 MVA. En cas de défaillance, le groupe d'autotransformateurs 600 MVA 380/220 kV

possède un enroulement tertiaire de 30 kV qui relie les services internes de Bieudron à travers un transformateur 30/16 kV de 12,5 MVA. Du point de vue électrique, l'usine de Bieudron constitue trois unités de production totalement séparées et autonomes, d'une puissance unitaire de 500 MVA, plus une unité constituant les services généraux. Chacune est alimentée par un câble 16 kV traversant le Rhône et aboutissant sur quatre transformateurs triphasés en résine coulée d'une puissance de 2000 kVA, 16/0,4 kV. Afin d'augmenter la sécurité, le départ au poste de Chamoson comprend deux jeux de barres distinctes et le cheminement des câbles est différencié deux par deux. Il est également prévu de pouvoir recourir à un seul transformateur pour le fonctionnement des services auxiliaires de deux alternateurs, ce qui augmente encore la fiabilité de ces groupes et explique la puissance de 2000 kVA par transformateur et le fait qu'ils soient dimensionnés pour accepter une surcharge de 15 % en permanence.

Il est clair que dans le cas d'un seul transformateur alimentant les services auxiliaires de deux alternateurs, on se trouve dans un système de marche dégradée. Il s'agit toutefois d'une variante qui autorise un fonctionnement à pleine puissance, avec certaines restrictions en ce qui concerne le freinage électrique notamment. La puissance nécessaire à deux freinages simultanés dépasserait en effet par trop celle d'un transformateur, mais l'arrêt électrique d'un des alternateurs peut être différé de quelques minutes ou même supprimé au besoin, car ces machines sont capables de s'arrêter naturellement sur leur propres pertes en une heure et demie sans utilisation d'aucune pompe pour le palier supérieur et au moyen d'une pompe secondaire en 110 V continu pour le palier inférieur.

Le système de freinage électrique est considéré comme frein de ser-

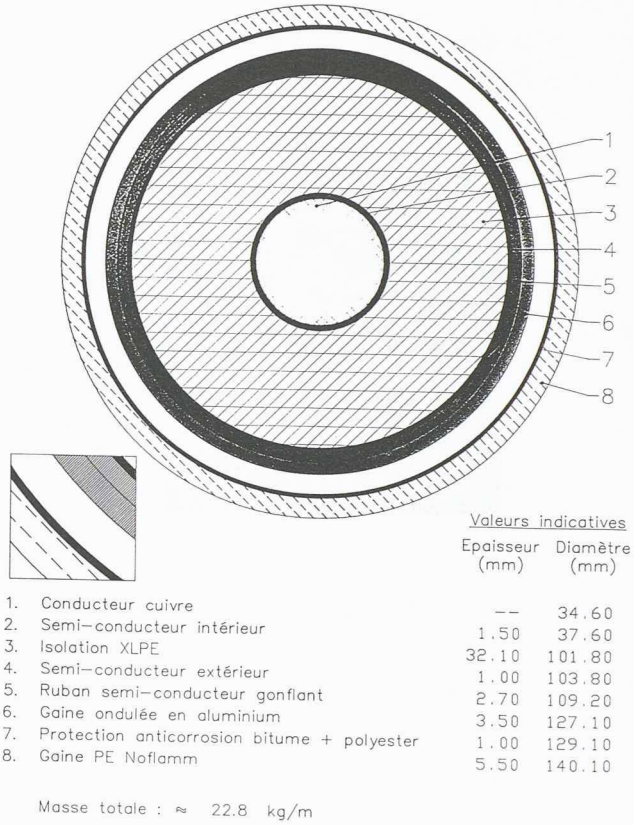


Fig. 12 – Section d'un câble 380 kV (800 mm²)

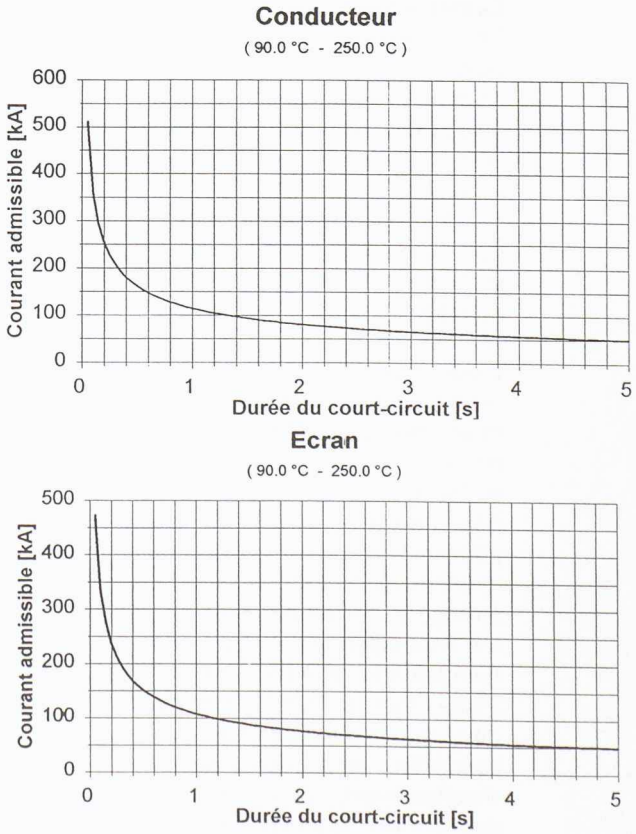
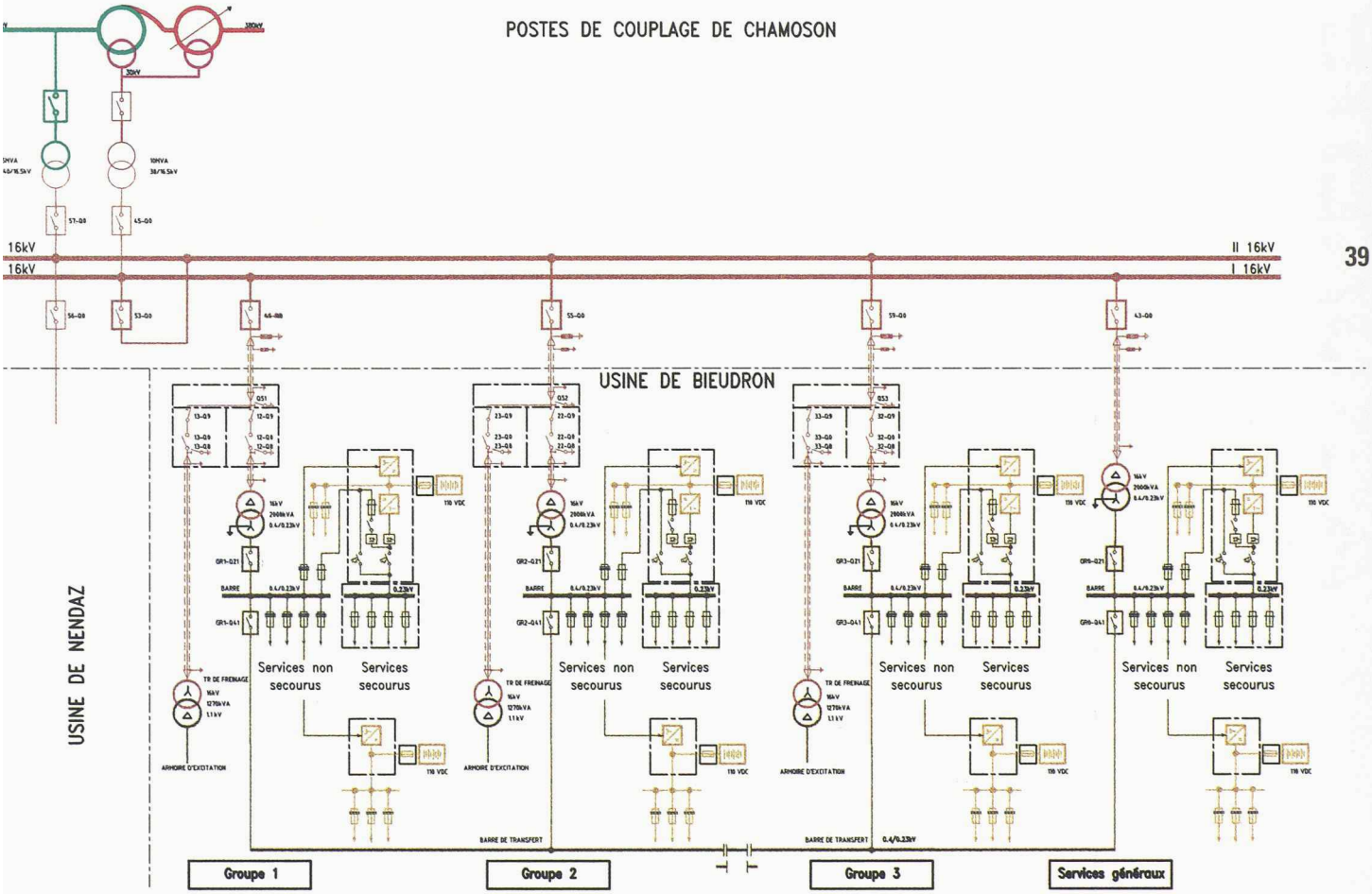


Fig. 13 – Courants de court-circuit admissibles selon CEI 949



g. 14 – Schéma de l'alimentation des services auxiliaires et transformateurs de freinage

vice et frein de secours. S'il est évident que le freinage de secours est valable pour tout problème mécanique, il est par contre à proscrire pour certaines alarmes électriques, afin de ne pas alimenter un éventuel court-circuit interne.

Les alimentations électriques sont décentralisées (fig. 14) et séparées en services essentiels d'une part, et non essentiels de l'autre. De plus, une zone dite propre (du point de vue des perturbations électriques) a été constituée sur toute la longueur de l'usine jouxtant la galerie des vannes: tous les tableaux de contrôle et de commande ainsi que les alimentations en tension continue 110 V y sont réunis. Les installations de force et lumière sont secourues sur une phase par un onduleur et des batteries 110 V et par mesure de sécurité supplémentaire, l'ensemble du câblage et des composants utilisés sont dépourvus d'halogène.

Système de protection

Si le système de protection mis en place à Bieudron n'est pas fondamentalement différent de ce qui existe dans d'autres centrales hydroélectriques, il était impératif d'assurer une disponibilité et une sécurité maximales pour des tranches de puissance de 500 MVA. Aussi, l'ensemble du système de protection est-il réparti en deux groupes A et B abrités dans des armoires séparées et assurant une redondance totale, soit par le doublage de systèmes identiques, soit par des dispositifs de conception différente mais assurant la même protection. De type numérique, ces appareillages (modèles *ABB* REG 216 et REL 316.4) sont reliés soit par fibres optiques, soit par des câbles en cuivre. Les transformateurs de courant sont placés sur les conducteurs des barres blindées, donc isolés pour une classe 36 kV et aptes à travailler dans une atmosphère de 105°C.

Spécifications des transformateurs de courant (TC)

- Courant nominal: 15 000 A
- Classe de précision: 0,2 %
- Classes de protection: 5P30 et 5P40 et, suivant les cas, induction rémanente inférieure à 10 %
- Températures ambiantes: max. 105°C pour le conducteur, max. 80°C pour la gaine
- Tensions d'essai, avec TC monté dans le jeu de barres: 70 kV_{eff} pendant 1 min, 140 kV choc

Conception technique des TC

A côté des éléments de dimensionnement usuels, tels que les sections des tôles, le nombre de tours et les dimensions des fils, il s'agissait encore de déterminer les critères relevants pour assurer la tenue aux tensions exigées, en tenant compte de l'espace réduit disponible entre le conducteur octogonal et la gaine extérieure de forme ronde.

Un essai de type réalisé sur la plateforme haute tension (fig. 15), avec un élément complet du jeu de barres, a ensuite confirmé le dimensionnement établi.

Noyaux avec entrefer

Pour satisfaire à des exigences spécifiques de la protection différentielle, il a été nécessaire de limiter

l'induction rémanente à moins de 10 %. Pour garantir une telle valeur, les tôles de transformateur au silicium utilisées pour les noyaux, ont dû être sectionnées en plusieurs endroits et les sections ainsi obtenues maintenues à des écartements très précis. La rigidité mécanique nécessaire au bobinage a été obtenue par un serrage adéquat des parties sectionnées. Le dimensionnement des entrefers doit d'une part satisfaire à l'exigence de l'induction rémanente et de l'autre, limiter les pertes additionnelles, afin que la précision de la classe soit respectée conformément aux normes édictées par la Commission électrotechnique internationale (CEI).

Les contrôles finaux ont démontré que toutes les spécifications concernant les fonctions de protection et de mesure relatives aux TC ont pu être respectées.

Enfin, certaines contraintes supplémentaires liées au freinage électrique ont encore dû être prises en compte. Etant donné que la mise en court-circuit se fait à travers un sectionneur de mise à terre sur la ligne 400 kV au poste de Chamoson et que ce sectionneur répondant aux normes CEI 1129 est dimensionné pour une fréquence de 50 Hz, il n'est donc pas conçu pour ouvrir ou fermer sous un courant à fréquence variable. C'est pourquoi une solution devait être trouvée afin de s'assurer que le courant pour de très basses fréquences soit quasi nul avant de donner un ordre de manœuvre au sectionneur. Le même dispositif de mesure devait en outre indiquer la valeur du courant de freinage qui est en principe 1,2 x I_n. Un tel transformateur de mesure doit donc couvrir une plage allant de 1 à 1000 A pour des fréquences allant de 0 à 50 Hz. La solution adoptée est un système de mesure développé par l'entreprise *LEM SA* à Genève, basé sur des capteurs de courant à effet Hall en boucle fermée, c'est-à-dire à compensation ou à flux nul. L'effet Hall est provoqué par la force de Laplace, laquelle agit sur les porteurs de charge traversant le conducteur, lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique perpendiculaire. Le type de capteurs choisis a une plage de mesure de ±2000 A avec un rapport de 1 : 5000 et la dérive en offset en fonction de la température est de ±0,4 mA entre 0 et 70°C.

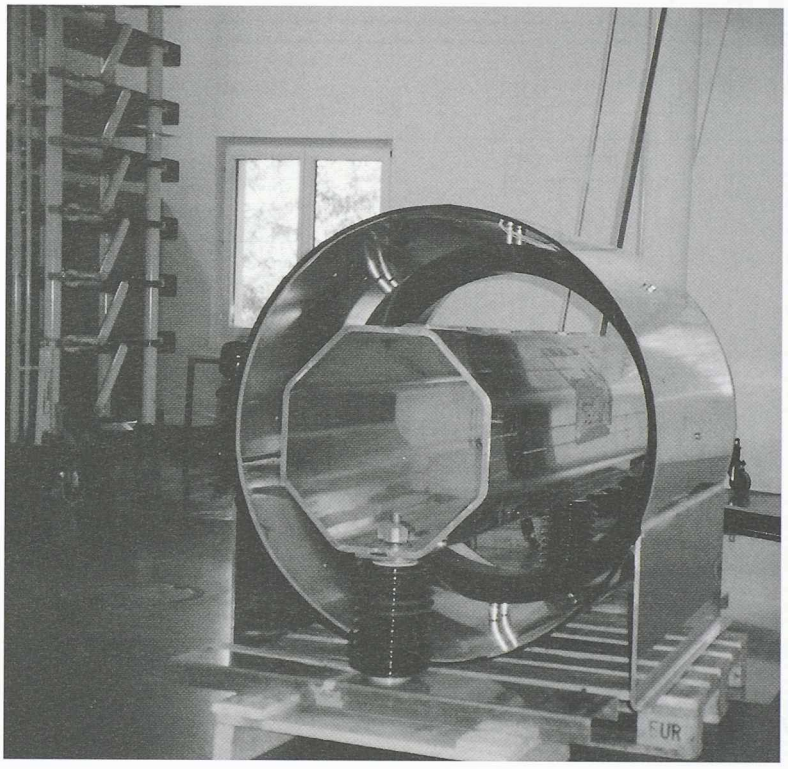


Fig. 15 – Essai de type d'un transformateur de mesure monté sur une section de barre blindée (transformateur de courant)

Principaux fournisseurs

Alternateurs: *ABB Suisse*
Liaisons entre alternateurs et transformateurs: *Cegelec-France*
Transformateurs de puissance: *ABB Sécheron, Genève*
Câbles à haute tension: *Alcatel Câbles Suisse*
Système de protection
– transformateurs de mesure: *Pfiffner, Suisse*
– appareillage de mesure: *ABB, Suisse*