

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 105 (1979)
Heft: 20

Artikel: Les pompes nourrices de la centrale de Châtelard-Barberine II
Autor: Linz, R. / Leupin, G. / Léchet, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73860>

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: 12.01.2026

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

2.3.6 Déformation du corps de la digue

Pour le contrôle des tassements du corps de la digue pendant la construction, nous avons renoncé à l'utilisation de balises de tassement. En effet, ces balises gênent considérablement les travaux de compactage et la circulation sur la digue. Par ailleurs, elles sont facilement déplacées et endommagées par les engins de compactage. Nous nous sommes contentés de placer sur le couronnement 8 repères dont les déplacements ont été mesurés en hauteur et en direction par des méthodes géodésiques au moment de la mise en eau du bassin. Aucun mouvement anormal n'a d'ailleurs été constaté.

2.3.7 Conclusions

Les travaux de construction des digues du bassin de compensation de Châtelard-Village ont fait l'objet de divers contrôles géotechniques comprenant : outre une campagne de sondages et les études géologiques et géotechniques préliminaires, la réalisation de remblais d'essais destinés à déterminer le nombre de passages du rouleau vibrant ainsi que le contrôle du degré de compactage par la mesure de la densité apparente humide au moyen d'essais de sable et au nucléodensimètre. Une comparaison directe de ces deux dernières méthodes a permis de constater une concordance satisfaisante entre les

résultats. Les tassements des sols d'assise de la digue principale ont été mesurés par un tassomètre LEGEP à vases communicants doublé d'un appareil Télémac à cordes vibrantes. Enfin, les déformations du corps de la digue au moment de la mise en eau ont été contrôlées par mesures géodésiques.

Adresse de l'auteur :

Jean-Louis Mottier
ing. dipl. EPFL,
c/o Motor-Columbus Ingénieurs-
Conseils S.A., Baden

3. Les pompes nourrices de la centrale de Châtelard-Barberine II

par R. Linz, G. Leupin, R. Léchet et E. Hasler, Baden

Parmi les aspects intéressants de la nouvelle centrale d'accumulation de pompage, il convient de mentionner les conditions particulières d'exploitation et le mode d'entraînement inhabituel des pompes nourrices. Celles-ci alimentent simultanément une pompe d'accumulation de 31 MW et une galerie à écoulement libre de 8 m³/s avec de l'eau provenant du bassin de compensation. Ces pompes sont appelées à travailler dans un large domaine de fonctionnement caractérisé par une hauteur de refoulement variant entre 0,9 et 19,4 m et un débit unitaire de 3,0 à 4,5 m³/s, qu'il a été possible de réaliser par variation de la vitesse de rotation. Les moteurs d'entraînement d'une puissance unitaire de 1113 kW en régime continu sont identiques aux moteurs monophasés à courant alternatif de 16 2/3 Hz, montés sur un type récent de locomotives des CFF. La vitesse de rotation est réglée par variation de la tension d'alimentation des moteurs au moyen d'un transformateur à gradins de locomotive. Ces particularités techniques ainsi que la complexité du système hydraulique de la centrale ont fortement marqué la conception de la commande et de la régulation de cette installation.

3.1 Conception de l'installation

Avant la construction de la nouvelle centrale d'accumulation de Châtelard II, l'eau sortant des turbines Pelton de l'ancienne centrale de Châtelard I était évacuée par une galerie à écoulement libre de plusieurs kilomètres, conduisant au bassin de compensation des Marécottes, pour être turbinée finalement à la centrale de Vernayaz. La galerie à écoulement libre était également alimentée par un canal collectant les eaux d'affluents. Après la construction de la nouvelle centrale de Châtelard et du bassin de compensation adjacent, le canal d'amenée et la galerie existants ont été maintenus en service. Les eaux débitées par les deux centrales I et II de Châtelard, ainsi que celles captées en rivières, sont retenues dans ce bassin, pour autant

qu'elles ne s'écoulent pas directement vers le bassin des Marécottes. Le canal d'amenée, le canal de fuite de la nouvelle centrale et la galerie à écoulement libre vers les Marécottes sont reliés entre eux (voir fig. 3).

Le débit maximal de la galerie à écoulement libre dans le bassin des Marécottes et celui du canal d'amenée s'élèvent à 8 m³/s, tandis que le débit maximal turbiné par les centrales I et II de Châtelard est de 16 m³/s. Le débit de la galerie vers le bassin des Marécottes est réglé par une vanne plane, commandée en fonction du débit requis par la centrale inférieure de Vernayaz.

L'eau retenue dans le bassin de compensation de Châtelard est en partie repompée dans le lac d'accumulation d'Emosson par la pompe multi-cellulaire de la nouvelle centrale et en partie refoulée dans la galerie des Marécottes.

Lors de la vidange du bassin de compensation de Châtelard, le niveau baisse de la cote 1116 à 1100 m. Le niveau du canal de fuite devant rester constant à la cote 1116,3 ± 0,1 m, des pompes de relevage s'imposent. Celles-ci refoulent l'eau du bassin de compensation dans le canal de fuite des turbines. Il est prévu ultérieurement de remplacer la galerie à écoulement libre des Marécottes par une galerie en charge pour un débit de 16 m³/s, à écoulement gravitaire (fig. 9), rendant superflu le pompage de l'eau dans la galerie à écoulement libre.

Actuellement, la nouvelle centrale est équipée d'une seule pompe d'accumulation à 7 étages et de 2 pompes de relevage. Toute l'infrastructure nécessaire a déjà été réalisée pour permettre l'installation d'une seconde pompe d'accumulation et d'une troisième pompe de relevage. Cette dernière ne sera cependant nécessaire que si la deuxième pompe d'accumulation sera mise en place avant la réalisation de la galerie en charge.

Le bassin de compensation de Châtelard est également utilisé comme bassin inférieur pour l'accumulation par pompage. Pendant ce pompage, les pompes de relevage fonctionnent comme pompes nourrices des pompes d'accumulation.

De ce fait, la cote d'implantation des pompes d'accumulation a pu être fixée à un niveau relativement élevé et indépendamment du niveau variable du bassin de compensation.

Dans la phase d'étude, plusieurs solutions ont été envisagées. Du fait du caractère provisoire de la galerie des Marécottes, son alimentation initiale était envisagée avec des pompes séparées. Du fait que le réseau à 50 Hz disponible sur place n'était pas assez puissant pour alimenter ces pompes, seul le système monophasé à 16 2/3 Hz entrainait en considération. En conséquence l'entraînement de ces pompes ne pouvait être réalisé que par des moteurs monophasés 16 2/3 Hz.

La possibilité d'utiliser des moteurs prélevés sur un ancien type de locomotive hors service a été envisagée. La puissance maximale disponible pour les pompes était ainsi définie et limitée. Il était prévu

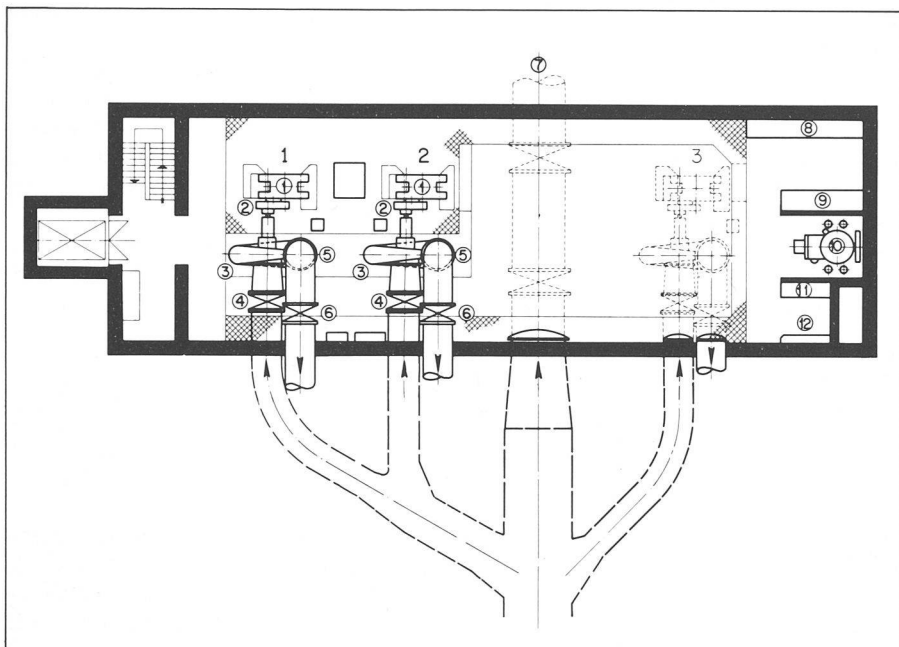


Fig. 9. — Vue en plan de l'étage des pompes nourrices.

1. Moteur
2. Réducteur de vitesse
3. Pompe nourrice
4. Vanne
5. Vanne de non-retour
6. Vanne
7. Galerie sous pression

8. Tableau commande directe
9. Disjoncteur du moteur
10. Transformateur avec commutateur à gradins et enroulement auxiliaire
11. Distribution services internes
12. Distribution air comprimé

de ne plus utiliser ces unités après l'achèvement de la galerie en charge des Marécottes. Pour l'alimentation des pompes d'accumulation, des pompes nourrices étaient prévues.

Les études de projet ont conduit à une utilisation combinée des pompes de relevage et des pompes nourrices pour l'alimentation de la galerie des Marécottes et des pompes d'accumulation (voir fig. 4). Dans ce cas cependant, les anciens moteurs de locomotive ne pouvaient plus être utilisés, car les pompes ne devaient plus fonctionner pendant un temps limité, mais pendant toute la durée de vie des pompes d'accumulation. Les moteurs de locomotive disponibles les plus récents, équipent les nouvelles locomotives Re 4/4^{II} des CFF. Grâce à ce type de moteur plus puissant et moyennant certaines adaptations, la capacité des pompes de relevage pouvait être augmentée de telle façon que leur débit unitaire couvre le débit maximal d'une pompe d'accumulation. A l'achèvement de la galerie en charge projetée, les pompes de relevage ne serviront plus qu'à l'alimentation des pompes d'accumulation et ne fonctionneront que comme pompes nourrices de ces dernières.

Au stade final des études, l'eau est amenée du bassin de compensation aux pompes nourrices par une conduite commune (voir fig. 4 et 9). Les pompes nourrices refoulent dans un puits vertical dont partent les conduites d'alimentation des pompes d'accumulation. A la partie supérieure, le puits débouche dans le canal de fuite des turbines. La cote d'installation des pompes d'accumulation se situe à une cote inférieure à celle du niveau du canal de fuite, garantissant ainsi la

pression d'aspiration nécessaire. Les pompes nourrices sont installées à un niveau inférieur au niveau minimal du bassin de compensation pour assurer une contrepression suffisante.

3.2 Particularités des groupes de pompes nourrices

3.2.1 Les pompes

Les pompes nourrices sont utilisées pour l'alimentation de la pompe d'accumulation et de la galerie à écoulement libre, à partir du bassin de compensation. L'alimentation de la pompe d'accumulation et de la galerie peut se faire simultanément ; à cette fin, une ou deux pompes seront mises en service selon le débit nécessaire.

Chaque pompe doit fournir un débit de consigne aussi constant que possible malgré une hauteur géodésique passant de 0,20 à 16,40 m, le débit de consigne pouvant varier entre 3,0 et 4,5 m³/s. Ces débits de refoulement correspondent aux débits de la pompe d'accumulation. Les conditions de service, caractérisées par la figure 10, sont réalisées en variant la vitesse de rotation de la pompe entre 170 et 390 tr/min.

Il fallait non seulement veiller à ce que le rendement soit le meilleur possible aux grandes hauteurs de refoulement, mais encore qu'il fût acceptable aux faibles hauteurs et que la puissance maximale disponible du moteur ne soit pas dépassée. Selon la figure 10, le rendement varie entre 32 et 87,5 %. Dans ce but, des essais et mesures de rendements sur modèle ont été exécutés par le fournisseur des pompes.

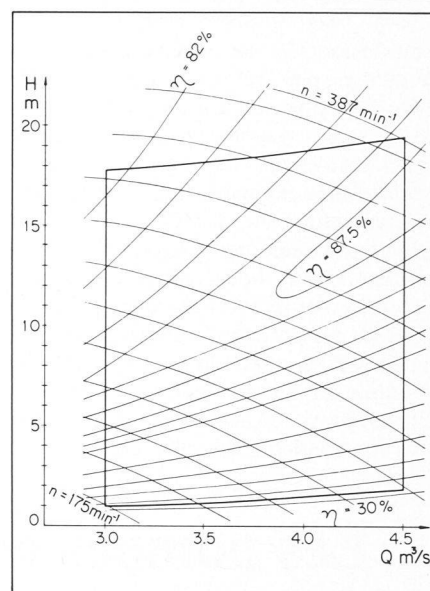


Fig. 10. — Caractéristiques des pompes nourrices.

- (Q) Débit de refoulement
(H) Hauteur de refoulement
(n) Vitesse de rotation de la pompe
(η) Rendement de la pompe

Les pompes nourrices sont du type à un seul étage en bache spirale avec roue radiale à vitesse spécifique élevée. Les aubages de la roue et du diffuseur sont fixes. La partie inférieure de la bache spirale est prise dans le béton. L'arbre est monté sur des roulements à rouleaux, à bain d'huile. L'étanchéité de l'arbre est assurée sans frottement par des joints à labyrinthes. Aucun équipement auxiliaire n'est nécessaire. L'installation de surveillance peut donc être limitée au strict minimum. Les pressions à l'aspiration et au refoulement de la pompe ainsi que le niveau et la température de l'huile de lubrification sont contrôlés automatiquement.

La conduite d'entrée de chaque pompe nourrice est équipée d'une vanne papillon de 1200 mm de diamètre avec servomoteur d'ouverture et contrepoids de fermeture. Ces vannes sont normalement ouvertes, sauf en cas d'immobilisation prolongée des pompes. Ces vannes remplissent également une fonction de sécurité en cas de fuite importante du côté de la pompe ou lors d'un déclenchement d'urgence. Au refoulement de chaque pompe on a prévu en série un clapet de non-retour de 1200 mm de diamètre, faisant fonction de vanne de garde et une vanne papillon de révision de même dimension.

3.2.2 L'entraînement des pompes

La disposition des groupes de pompage tient compte des particularités des moteurs de locomotive. Aussi, seule une ligne d'arbre horizontale pouvait être prise en considération.

De même que dans leur fonction de traction, pour l'entraînement des pompes, ces moteurs sont pourvus d'un réducteur de vitesse ($i = 2,94$). Le bout d'arbre du moteur est muni d'un pignon entraînant une roue dentée, montée sur un axe

fixé sur le côté du moteur. L'accouplement de la roue dentée à l'arbre de la pompe est élastique. Cet accouplement s'effectue selon le même principe que l'accouplement entre la roue dentée et l'essieu de la locomotive. Le moteur et le réducteur de vitesse forment un ensemble compact.

Du fait de la pulsation du couple fourni par le moteur monophasé, il a été nécessaire, en plus de l'accouplement élastique entre le moteur et la pompe, de réaliser un appui élastique des moteurs. Les moteurs sont fixés par leurs attaches latérales sur des supports liés à des socles en béton (voir fig. 11). Ces supports sont munis d'éléments de liaison élastiques.

Pour l'entraînement des locomotives comme pour l'entraînement des pompes, l'emploi d'un accouplement élastique permet d'amortir l'effet de pulsation du couple d'entraînement, tout en laissant un certain mouvement radial entre le côté entraînant et le côté entraîné de l'accouplement. Alors que ce mouvement radial est réalisé sur les locomotives par l'appui à ressort du châssis sur les essieux, dans l'entraînement stationnaire, ce mouvement provient de l'appui élastique du moteur sur les fondations.

L'ensemble moteur - réducteur à appui élastique et l'ensemble rotorique présentant une certaine élasticité à la torsion (rotor du moteur, roues dentées du réducteur, accouplement et rotor de la pompe) ils ont tendance à entrer en vibration sous l'effet du couple pulsé du moteur. Il fallait donc s'assurer que les fréquences propres de ces systèmes oscillants ne coïncident pas avec la fréquence d'excitation du moteur.

Pour calculer la plus grande sollicitation de la fixation du moteur et de l'arbre de

la pompe, on a dû tenir compte du couple considérable provoqué par un court-circuit au collecteur du moteur.

Dans le cas des moteurs de traction des locomotives, la lubrification des roues dentées du réducteur se fait par bain d'huile, celle-ci étant refroidie par circulation d'air environnant. Pour l'utilisation en service stationnaire, un système à circulation d'huile a été prévu. L'huile du carter du réducteur est pompée au travers d'un réfrigérant à eau et projetée sur la denture. La pompe à huile et le réfrigérant sont installés séparément à côté du réducteur de vitesse. La pompe de lubrification est entraînée par un moteur monophasé $16 \frac{2}{3}$ Hz à cage d'écureuil.

En outre, le réducteur est muni d'une surveillance automatique appropriée au service stationnaire. Le niveau, la pression et la température du lubrifiant, ainsi que la température des paliers de la roue dentée, sont surveillés en permanence. Deux capteurs de vitesse et du sens de rotation sont montés sur le capot du réducteur et fonctionnent sans aucun contact mécanique. Ces capteurs mesurent la vitesse et le sens de rotation du pignon monté directement sur l'arbre du moteur.

3.3 Particularités des moteurs d'entraînement et du transformateur

3.3.1 Principe de l'entraînement

Les moteurs d'entraînement sont alimentés par un seul transformateur. L'enclenchement et le déclenchement de chaque moteur se fait par un disjoncteur bipolaire (voir fig. 12).

Comme pour le service traction, le transformateur est ici aussi équipé d'un commutateur à gradins. Par ce commutateur, la tension du moteur peut être réglée avec 32 gradins, allant de 0 à 610 V. Puisqu'à chaque tension du moteur correspond une certaine caractéristique du couple en fonction de la vitesse du moteur, on a ainsi la possibilité de choisir la caractéristique requise. La figure 13 donne les caractéristiques du moteur pour différentes tensions ainsi que les caractéristiques de la pompe relatives à l'arbre du moteur. Lorsque la vitesse augmente, le couple fourni par le moteur diminue pour une tension constante aux bornes. C'est alors que le couple absorbé par la pompe augmente pour une hauteur géodésique constante. A la vitesse qui résulte d'une certaine tension aux bornes et d'une certaine hauteur géodésique correspond un débit pompé déterminé.

En raison de la variation de la vitesse par gradins, la constance du débit pour tout le domaine de la hauteur géodésique ne peut être maintenue que dans les limites d'une marge de tolérance d'environ $\pm 3\%$.

La figure 13 donne le domaine complet, relativement étroit, couvert en principe par la pompe. Ce domaine se compose d'une zone de démarrage (champ A), d'une zone d'exploitation effective (champ B) et d'une zone hors garantie (champ C).

Du fait du transformateur commun aux deux groupes, en marche en parallèle, les moteurs ont la même tension aux bornes et tournent donc ainsi à la même vitesse. Le déclenchement individuel d'un moteur est possible lors de la marche en parallèle. Par contre, un moteur

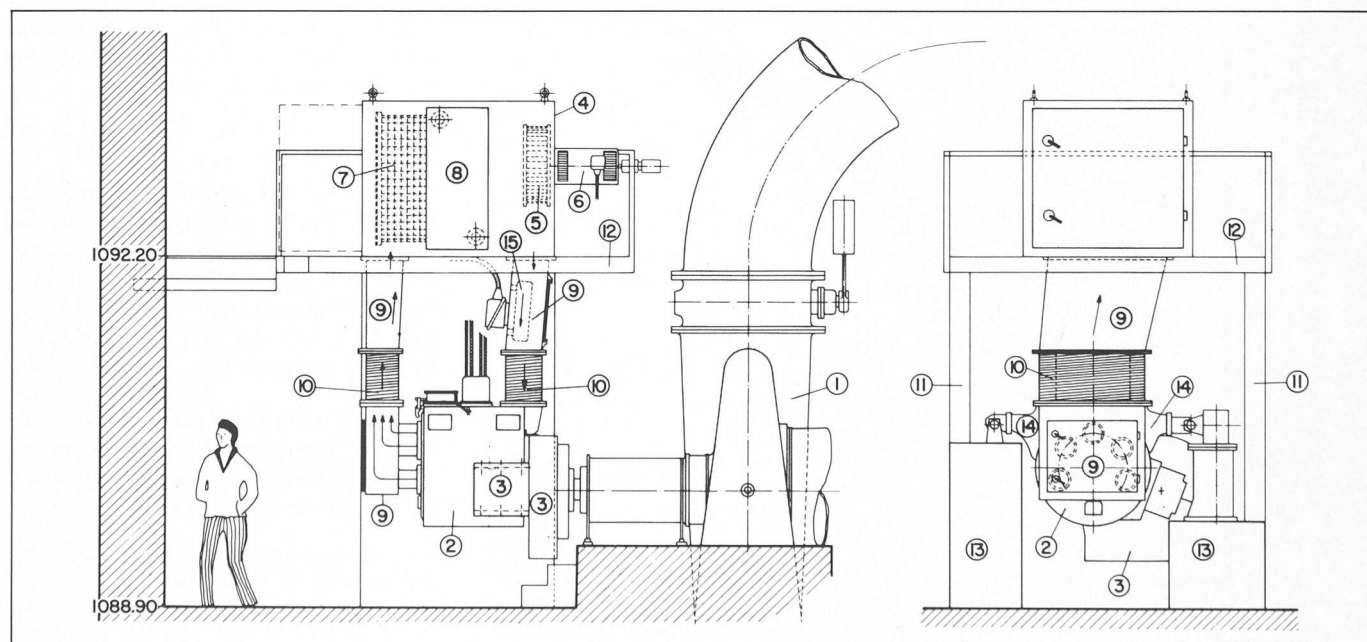


Fig. 11. — Pompe nourrice avec moteur et systèmes de ventilation et de refroidissement.

1. Pompe nourrice
2. Moteur
3. Réducteur de vitesse
4. Ensemble de ventilation, comprenant les pos. 5 à 10
5. Ventilateur

6. Moteur d'entraînement du ventilateur
7. Filtre à air
8. Echangeur de chaleur air/eau
9. Canaux rigides de circulation d'air
10. Canaux flexibles de raccordement

11. Supports
12. Plateforme de service
13. Socles en béton
14. Suspension du moteur avec amortisseurs
15. Shunt

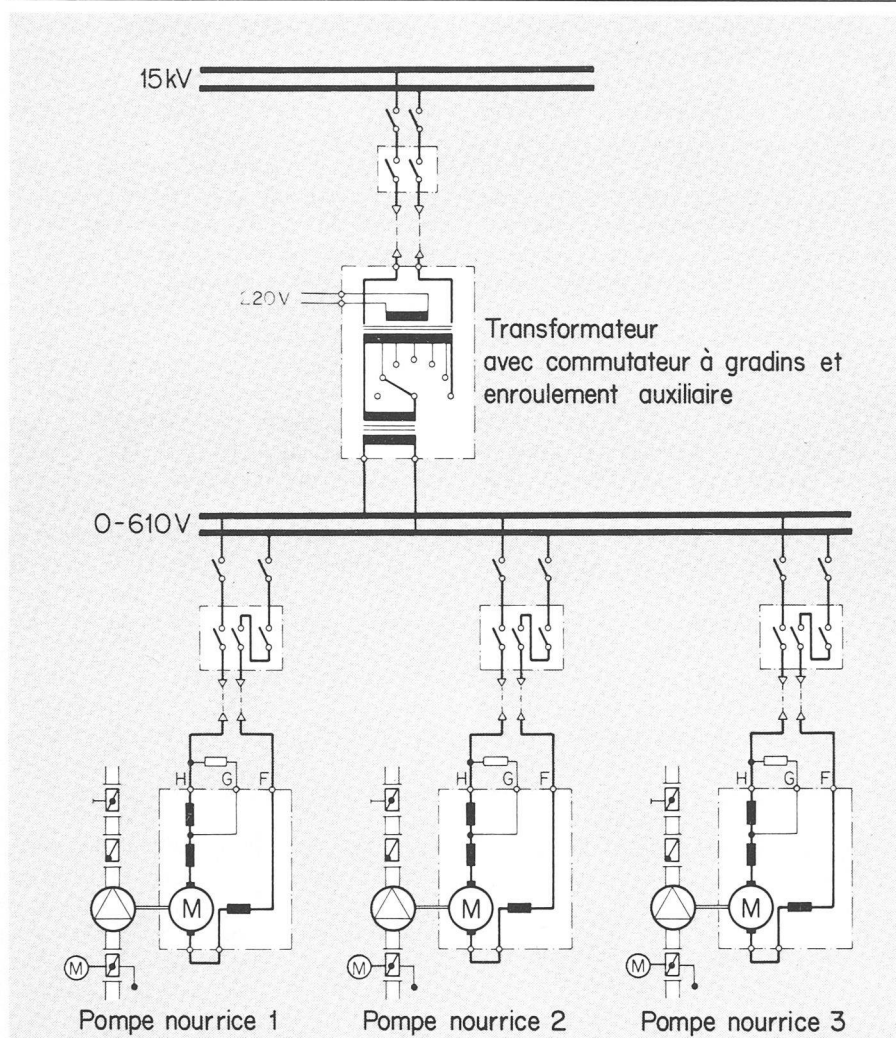
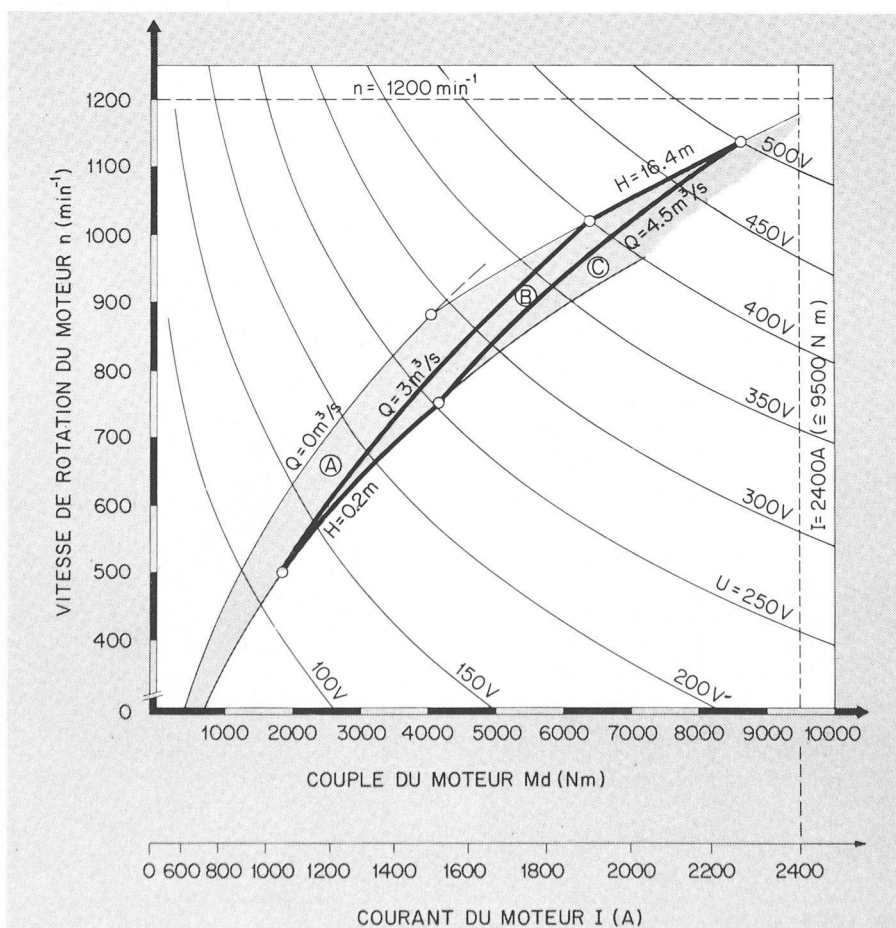


Fig. 12. — Schéma électrique de l'entraînement des pompes.



arrêté ne peut cependant être enclenché que sous une tension nulle. Cela signifie que, pour le service avec deux groupes, leur démarrage doit s'effectuer simultanément.

3.3.2 Les moteurs

Comme déjà mentionné, des moteurs de traction ont été choisis; entraînent en ligne de compte des moteurs BBC-Oerlikon monophasés série, à collecteur, du type 10 HW 895 pour $16 \frac{2}{3}$ Hz, d'une puissance à l'arbre de 1113 kW en régime continu sous 525 V et un nombre de tours de 1195 min^{-1} [1]¹. A cette fin, deux unités supplémentaires ont été commandées dans le cadre d'une série destinée à l'équipement des locomotives du type Re 4/4^{II} des CFF [2].

L'utilisation des moteurs sur une locomotive et celle en centrale, telle que pour Châtelard II, présentent une différence notable dans le fait que la traction exige un double sens de rotation pour la marche avant et arrière, nécessitant une commutation de polarité de l'enroulement d'excitation. A Châtelard II un seul sens de rotation est requis. De ce fait, la connection de l'enroulement d'excitation des moteurs est fixe. Il en résulte cependant un certain danger pour les moteurs du fait que — comme dans toute station de pompage —, malgré les précautions prises, le dévissage des pompes ne peut pas être absolument exclu. Dans ce cas, sans que l'enroulement d'excitation soit commuté, il se peut que le moteur atteigne, par auto-excitation et accroissement de la vitesse de dévissage, des valeurs de tension dangereuses. Celles-ci pourraient endommager les bobinages par formation d'arcs électriques. Afin d'éviter ce danger, le dévissage de l'arbre moteur est contrôlé par deux systèmes indépendants, et un sectionnement sur toutes les bornes du moteur s'effectue au déclenchement.

3.3.3 Systèmes de ventilation et de refroidissement

L'utilisation stationnaire de moteurs de traction pour l'entraînement des pompes nourrices a exigé un certain nombre d'adaptations. Pour l'évacuation des pertes calorifiques et pour éliminer la poussière des balais, il a fallu trouver d'autres solutions que celles appliquées aux locomotives.

Les deux groupes de pompage sont installés profondément dans les fondations de la centrale dans un local pratiquement fermé sans accès extérieur. Les pertes

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Fig. 13. — Caractéristiques du moteur et de la pompe nourrice (ci-contre)

- (Q) Débit de refoulement pompe
- (H) Hauteur géodésique
- (U) Tension du moteur
- A Domaine de démarrage
- B Domaine d'exploitation utilisé
- C Domaine non-admis pour l'exploitation

calorifiques pouvant s'élever à 96 kW par moteur (y compris les pertes du shunt de l'enroulement de commutation) ne peuvent pas être transmises à l'air ambiant sans échauffement inadmissible. La mise en place de canaux d'aération menant à l'extérieur a dû être aussi abandonnée du fait de leur longueur excessive et des pertes de frottement qu'ils auraient engendrées, sans compter de nombreuses difficultés du côté du génie civil.

C'est pourquoi il a fallu munir chaque moteur d'un système d'air de refroidissement en circuit fermé, comprenant un filtre à air, un échangeur de chaleur, un ventilateur à entraînement séparé et l'appareillage de contrôle. L'air de refroidissement, après avoir absorbé les pertes du shunt et du moteur, circule dans l'ordre indiqué ci-dessus à travers les éléments du système de ventilation et de refroidissement.

A cause des vibrations du stator, l'unité de refroidissement et de ventilation ne pouvait pas être montée directement sur la carcasse du moteur, ce qui du reste n'aurait pas été facile à réaliser du fait de la construction très compacte du moteur. L'unité de refroidissement a donc été placée sur une plate-forme de service en acier profilé avec recouvrement en caillebotis, appuyée sur quatre supports et située directement au-dessus du moteur (voir fig. 11). Des canaux en tôle et des éléments flexibles raccordés aux ouvertures d'entrée et de sortie d'air du moteur forment la liaison entre l'unité de refroidissement et le moteur. Le shunt de l'enroulement de commutation a pu être placé dans le canal en tôle de l'air froid, muni d'une ouverture de contrôle fermée par un couvercle en plexiglas.

Du côté commutateur du moteur où l'air chaud sort par cinq orifices circulaires, un collecteur d'air chaud a été prévu. Une ouverture de contrôle permet d'observer la commutation. Du collecteur d'air chaud l'air rejoint le filtre à air à travers un élément flexible et un conduit en tôle.

Les balais de charbon du commutateur produisent une très fine poussière qui est entraînée par la circulation d'air et retenue par le filtre à air. L'encrassement du filtre à air est surveillé en permanence par un manomètre différentiel. Celui-ci déclenche une alarme aussitôt que la perte de charge à travers le filtre à air devient excessive.

L'alimentation du réfrigérant d'air en eau de refroidissement à partir du système principal est réglée par une vanne à action pneumatique. La charge du moteur variant constamment, il a fallu prévoir un réglage de température de l'air de refroidissement. Une commande par thermostat règle le débit d'eau de refroidissement de façon à maintenir constante la température de l'air froid à l'entrée du moteur.

Aussi bien en traction qu'en service stationnaire, les moteurs sont ventilés séparément. Cependant, sur les locomotives, les quatre moteurs travaillent toujours en parallèle et sont refroidis par groupe de deux par un ventilateur commun. Dans le cas de Châtelard II, où les deux groupes de pompes nourrices ne tournent que rarement en parallèle, l'utilisation de l'équipement de ventilation des locomotives se révélait inadéquate. C'est pour cette raison que l'on a prévu des systèmes de ventilation séparés tenant compte des besoins de réfrigération de chaque moteur.

Une étude approfondie a été réalisée pour optimiser l'entraînement du ventilateur en tenant compte de la condition de n'utiliser, pour l'alimentation de tous les auxiliaires, que du courant monophasé à $16 \frac{2}{3}$ Hz. Cette contingence a conduit à un entraînement du ventilateur par un moteur à courant continu, alimenté par redresseur $16 \frac{2}{3}$ Hz, 220 V. Un interrupteur à action centrifuge monté sur le bout d'arbre libre court-circuite la résistance de démarrage lors du démarrage automatique du moteur.

3.3.4 Le transformateur

Comme la tension disponible de 15 kV au point d'alimentation correspond à la tension utilisée en traction, un transformateur de locomotive avec une tension secondaire de 0-610 V pour les moteurs principaux et de 220 V pour les services auxiliaires a été prévu. Au cours des études de détail il s'avérait cependant que des adaptations assez importantes étaient nécessaires.

En service de traction l'un des deux pôles du système 15 kV est mis à la terre, alors qu'en centrale les deux pôles sont isolés. De plus, en service de traction, la distance entre le point d'alimentation et la locomotive limite le courant de court-circuit à des valeurs assez faibles, alors qu'en centrale les courants de court-circuit sont très élevés du fait que le transformateur est connecté assez près du jeu de barres. Il fallait donc adapter l'isolation et la résistance aux courts-circuits du transformateur à la nouvelle situation. Puisque de toute façon l'enroulement du transformateur devait être adapté aux nouvelles conditions de service, on a saisi l'occasion pour adapter les gradins de réglage aux exigences des moteurs entraînant les pompes.

Il a été possible de réaliser l'enroulement de telle façon que, sur toute la gamme des hauteurs de refoulement de 0,2 à 16,4 m, la variation de débit de 3 à 4,5 m³/s soit réglée avec 6 gradins de tension. La variation de tension d'un gradin au transformateur provoque ainsi sur tout le champ de fonctionnement de la pompe une variation de débit d'environ 0,25 m³/s.

Le commutateur à gradins a été repris sans modifications, ce qui permet lors

d'un défaut de disposer rapidement de pièces de rechange en dépôt. Le commutateur fonctionne à l'air comprimé commandé par des soupapes à commande magnétique.

Pour permettre l'installation du transformateur sur la locomotive, une forme compliquée de la cuve s'impose. Pour l'installation fixe, une cuve cylindrique avec réservoir d'expansion et galets de roulement a été choisie comme solution plus économique.

Contrairement au service de traction, où le refroidissement se fait par radiateurs huile/air extérieurs, en centrale le refroidissement se fait par deux réfrigérants huile/eau montés sur la cuve du transformateur. Un réfrigérant étant suffisant pour les pertes totales du transformateur, le second est utilisé comme réserve en cas de défaut.

3.3.5 Les disjoncteurs

La tâche principale des disjoncteurs est d'enclencher et de déclencher les moteurs principaux des groupes. Contrairement au fonctionnement sur locomotives, où un seul pôle est déclenché, il faut prévoir à Châtelard II un déclenchement bipolaire des moteurs. En cas de défaut, ces disjoncteurs doivent aussi pouvoir couper le courant de court-circuit.

Des disjoncteurs standard, tripolaires, avec soufflage magnétique et commande à moteur, type SACE P2C 2500 A ont été choisis. Pour tenir compte des conditions plus défavorables du réseau $16 \frac{2}{3}$ Hz, et obtenir le pouvoir de coupure nécessaire, deux pôles ont été connectés en série (voir fig. 12). Les disjoncteurs sont munis de relais directs de protection thermique et de protection contre les court-circuits. Les caractéristiques de ces relais ont été adaptées au réseau $16 \frac{2}{3}$ Hz.

3.3.6 Surveillance de la vitesse et du sens de rotation

Du fait de la variation du nombre de tours pendant le service, et spécialement par suite des caractéristiques propres aux moteurs utilisés qui s'emballent à faible charge (voir fig. 13, courbes caractéristiques des moteurs), une surveillance du nombre de tours devient de première importance. Deux systèmes indépendants ont été prévus.

Dans le système principal, le nombre de tours est capté, en tant que fréquence, par deux détecteurs inductifs sur le pignon du réducteur de vitesse.

Le système électronique intercalé est muni de sorties analogiques de 0... 5 mA et 4... 20 mA pour la commande d'appareils indicateurs, et pour les signaux d'entrée pour le réglage. Par l'intermédiaire de relais à fréquence, l'arrêt, la survitesse et la rotation en sens inverse sont signalés, cette dernière étant extraite de la différence de phase des signaux des deux détecteurs. Avant

chaque enclenchement des groupes de pompes, la fonction de l'ensemble du système de surveillance de la vitesse de rotation est contrôlée par une injection de fréquence externe, qui actionne les relais à fréquence. Pendant le service, le système se contrôle lui-même par comparaison des fréquences produites par les deux détecteurs.

Le second système assure une sécurité supplémentaire. Il est fixé au bout d'arbre libre du moteur et fonctionne mécaniquement. La survitesse est captée par un contact centrifuge et la marche inversée par blocage d'un dispositif à roue libre.

3.4 Commande et réglage

3.4.1 Alimentation en énergie électrique

Afin d'obtenir une grande disponibilité de l'installation, on a cherché à dépendre le moins possible de sources additionnelles externes.

Comme sur une locomotive, les services auxiliaires sont alimentés par l'intermédiaire d'un enroulement auxiliaire du transformateur qui fournit une tension monophasée de 220 V, 16 $\frac{2}{3}$ Hz. Une alimentation à 220/380 V, 50 Hz n'est utilisée que pour des fonctions secondaires comme le chauffage à l'arrêt des moteurs, l'éclairage et le chauffage des tableaux de commande. Leur défaillance n'a donc pas d'influence sur le fonctionnement des pompes.

De même que pour le commutateur à gradins du transformateur, actionné à air comprimé, tous les robinets d'eau de refroidissement et de réglage du système de refroidissement des moteurs sont à commande pneumatique. L'alimentation en air comprimé provient du système propre à la centrale par une sous-distribution située dans le local des pompes nourrices. A défaut d'alimentation externe en air comprimé, il est possible d'assurer, au moyen d'un réservoir d'appoint, un service autonome des pompes pendant environ 60 min, suivi d'une mise hors service de l'installation.

Les circuits de commande et de surveillance de toute l'installation sont alimentés en 48 V cc par la batterie de la centrale travaillant en service tampon. L'alimentation des différents circuits est faite à partir d'une sous-distribution protégée par des coupe-circuits automatiques.

3.4.2 Les différents niveaux de commande

Pour réaliser les différents modes d'exploitation et les possibilités d'intervention correspondantes, la commande a été conçue d'après une hiérarchie de commande représentée par la figure 16.

La commande individuelle permet la commande mécanique, hydraulique, pneumatique ou électrique d'éléments et d'appareils séparés sur place. Elle est

utilisée lors de mises en service ou de révisions. Elle n'est pas utilisée en service normal des pompes.

La commande directe permet de faire fonctionner l'ensemble de l'installation à partir du tableau de commande directe, d'où l'on a également une bonne vue d'ensemble sur l'installation (voir fig. 9). Depuis là, l'installation peut être commandée manuellement ou par l'automatisme.

En fonctionnement manuel, les différents éléments et appareils sont enclenchés et déclenchés séparément. Les fausses manœuvres et celles dangereuses pour les machines et l'opérateur sont verrouillées. Si l'installation est exploitée en dehors des limites admissibles, son déclenchement se fait par l'intervention des organes de protection.

En fonctionnement automatique il n'y a qu'un seul ordre de démarrage ou d'arrêt qui est donné à chaque groupe. L'automatisme, réalisant une séquence d'ordres pas à pas, prend en charge la mise en service des différents éléments dans l'ordre correct et les ramène ensuite dans leur position initiale.

La régulation du débit a lieu aussi bien en fonctionnement manuel qu'en fonctionnement automatique par des ordres « plus » ou « moins » au commutateur à gradins. Ceci provoque une variation de tension au moteur et par conséquent un changement de la vitesse de rotation et finalement du débit des pompes.

La commande locale de l'installation a lieu à partir de la salle de commande. Il s'agit d'une commande automatique, c'est-à-dire de la transmission d'ordres « en » et « hors » pour tout un groupe, le débit de pompage étant réglé manuellement.

Lors de commande et réglage automatiques, aucune intervention manuelle est nécessaire en cours d'exploitation. Sur la base de la différence entre les débits d'apports et les débits évacués ainsi que du niveau dans le canal de fuite, le système de réglage calcule le débit de pompage nécessaire. Il donne les ordres pour l'enclenchement et le déclenchement des groupes de pompage ainsi que pour l'actionnement du commutateur à gradins.

Pour qu'on ne puisse intervenir dans le processus de pompage qu'à partir d'un seul niveau de commande, chaque niveau est pourvu d'un commutateur déterminant l'endroit de commande. Par principe, les priorités sont fixées de telle façon que le lieu de commande se trouvant plus près du processus passe en premier par rapport à un lieu de commande plus éloigné. Un tel lieu peut dès lors reprendre la commande à tout moment, alors qu'une délégation à un lieu de commande plus éloigné n'est possible que lorsque toutes les conditions pour le service à partir de ce lieu de commande sont remplies et que celui-ci accepte le transfert.

3.4.3 Protection et verrouillage

Le domaine de fonctionnement possible de la pompe fait l'objet du diagramme de la figure 13 et comporte trois zones distinctes A, B et C. Pour la protection des groupes de pompage l'application des deux critères suivants s'est avérée appropriée.

Une protection de survitesse, réglée à un nombre de tours du moteur de 1200 min⁻¹, et une protection contre les surcharges réglée à 2400 A, correspondant à un couple de 9500 Nm rapporté à l'arbre du moteur. Il revient alors au réglage automatique, ou lors d'opération manuelle à l'opérateur, de faire en sorte que la zone de démarrage A soit traversée le plus rapidement possible et que la zone C, non admise à l'exploitation, ne soit pas atteinte.

Les deux pôles des circuits moteurs sont isolés et reliés symétriquement à la terre au moyen de deux résistances à haute valeur ohmique. Ceci permet une surveillance des défauts de terre des moteurs. Le dispositif de protection contre mise à la terre est commun pour tous les moteurs et son fonctionnement provoque un déclenchement de toute l'installation. Le rapport de transformation du transformateur étant variable, une protection différentielle ne pouvait être prévue. Le transformateur est cependant muni d'une protection Buchholz et d'un dispositif de surveillance de température de l'huile. Les deux protections ont deux niveaux de fonctionnement, le premier donnant une alarme, le second provoquant le déclenchement de l'installation.

En plus des conditions de démarrage et des verrouillages habituels, deux conditions supplémentaires ont dû être considérées, ceci du fait des caractéristiques propres aux moteurs, notamment :

- En premier lieu, en cas de renversement du sens de rotation, le groupe doit être immédiatement débranché du réseau. Ce débranchement est verrouillé jusqu'à l'arrêt du groupe, afin d'éviter une auto-excitation du moteur.
- En second lieu, à l'arrêt, un moteur ne peut être réenclenché qu'à tension nulle, afin d'éviter des courants de démarrage trop élevés. En outre, compte tenu du fait que les moteurs des pompes sont alimentés par un transformateur commun, une condition supplémentaire s'impose : notamment que, lorsque l'enclenchement d'un second groupe s'avère nécessaire, le groupe étant déjà en service doit d'abord être déconnecté pour permettre ensuite l'enclenchement des deux groupes en parallèle. Aussi faut-il, à chaque manque de tension externe, déconnecter les groupes sinon, lors du rétablissement de la tension, le courant de démarrage des moteurs, qui entre-temps ont ralenti, serait trop élevé.

Le fonctionnement d'une protection d'un groupe donne lieu à un déclenchement d'urgence de ce groupe. Il comporte en fait la déconnection bipolaire du moteur et la fermeture de la vanne d'entrée de la pompe. Le groupe non concerné reste en service.

Lors d'un défaut dans la partie commune de l'installation (par exemple le transformateur), un déclenchement d'urgence de l'ensemble de l'installation a lieu. Il comporte la déconnection électrique côté 15 kV de l'ensemble de l'installation ainsi que le déclenchement d'urgence de tous les groupes de pompes.

3.4.4 Détermination du débit

Le débit des pompes n'est pas mesuré directement, mais puisque sa valeur effective est nécessaire pour le réglage, elle est déterminée à partir d'autres grandeurs. Si l'on considère l'installation des pompes nourrices comme une unité, on constate que le débit des pompes (Q) est essentiellement une fonction de deux variables: la tension aux bornes des moteurs (U) et la hauteur de refoulement (H) (voir fig. 14). Alors que la tension (U) peut être mesurée directement, la hauteur (H) résulte de la différence des niveaux dans le canal de fuite (N_{CdF}) et dans le bassin de compensation (N_{BC}). Le niveau dans le canal de fuite pendant le service de pompage étant pratiquement réglé à une valeur constante, la hauteur de refoulement des pompes est dérivée directement du niveau d'eau dans le bassin de compensation (N_{BC}).

Tension et hauteur de refoulement sont indiquées en abscisses et ordonnées par deux curseurs sur un instrument indicateur placé dans le tableau de commande (voir fig. 15). Au croisement des deux curseurs se fait la lecture de la valeur instantanée du débit à l'aide d'un ensemble de courbes.

3.4.5 L'appareillage de réglage

L'appareillage de réglage se compose d'un système digital de traitement de données et d'un système de réglage à structure de processeur. Le processeur à programme fixe travaille selon un système multiplex par partage du temps. L'échange des signaux entre les modules se fait à travers des lignes de données. Toutes les valeurs limites et les paramètres de réglage sont ajustables au moyen de commutateurs de codage se trouvant sur la face des modules correspondants.

La mesure des débits d'apports et des débits évacués ainsi que des niveaux a lieu à l'aide de balances à pression d'après la méthode Bubbler, à l'exception des mesures dans le puits blindé, où un système de mesure par ultrasons a été installé. Les valeurs mesurées sont transmises à l'appareillage de réglage comme signaux analogiques (4...20 mA).

Sous toutes les conditions de service, le niveau du canal de fuite (N_{CdF}) doit être maintenu constant dans des limites pré-

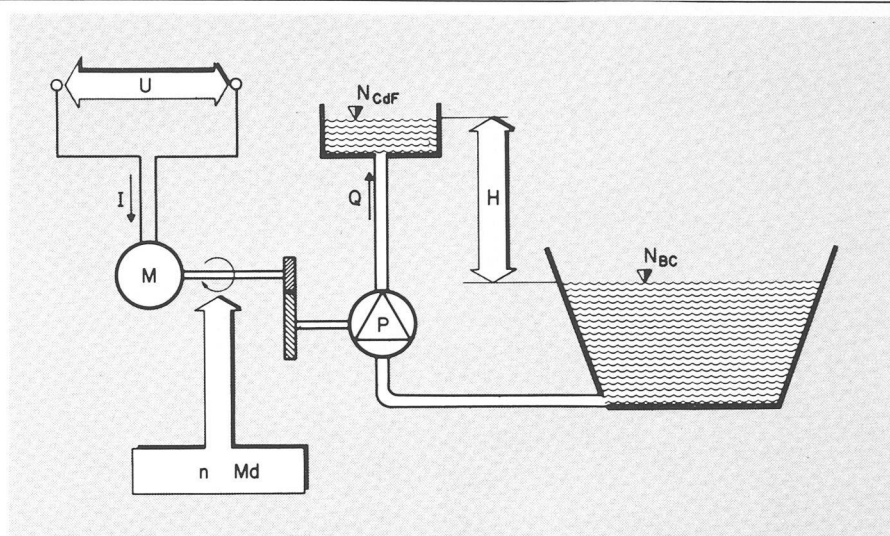


Fig. 14. — Schéma de principe du système pompes nourrices.

(n)	Vitesse de rotation du moteur	(H)	Hauteur de refoulement
(Md)	Couple du moteur	(Q)	Débit de refoulement
(U)	Tension du moteur	(N _{CdF})	Niveau d'eau du canal de fuite
(I)	Courant du moteur	(N _{BC})	Niveau d'eau du bassin de compensation

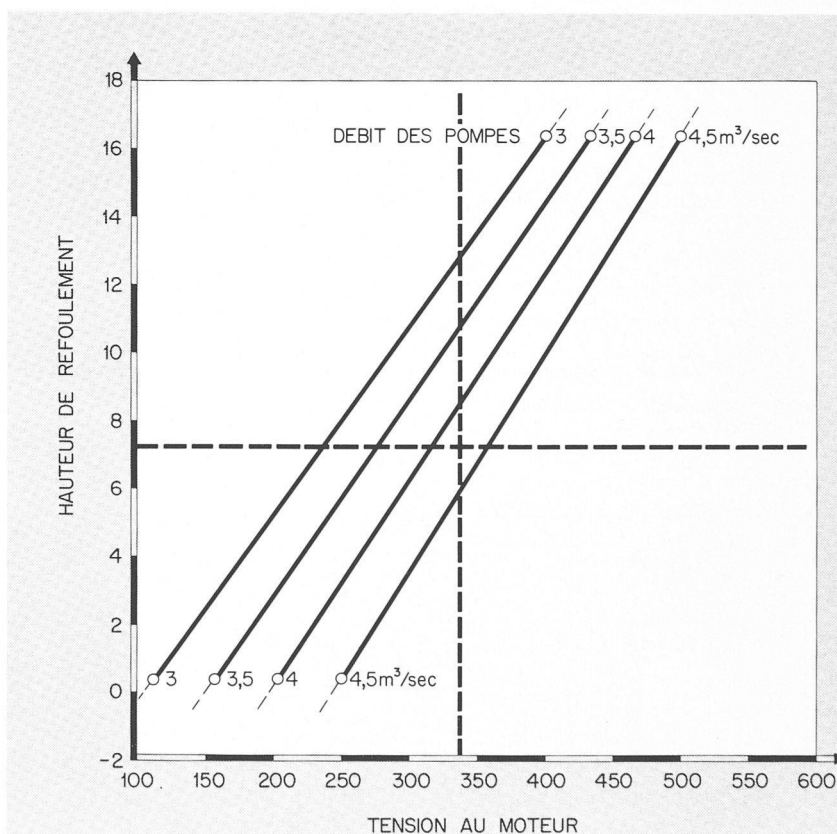


Fig. 15. — Instrument d'indication des débits pompés, en fonction de la hauteur de refoulement et de la tension.

établies pour assurer la contrepression nécessaire à la pompe d'accumulation d'une part et l'écoulement maximal possible vers Les Marécottes d'autre part (voir fig. 16).

Comme première opération, le processeur du système de réglage détermine — indépendamment du niveau N_{CdF} — la grandeur de conduite, c'est-à-dire le débit que les pompes nourrices doivent livrer, en tant que différence ΔQ entre les apports et les prélèvements d'eau du canal de fuite (voir fig. 18):

$$\Delta Q = Q_C + Q_T - Q_P - Q_M \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Si ΔQ atteint une valeur $\geq -3,0 \text{ m}^3\text{/s}$, correspondant au débit minimal admis d'une pompe nourrice, la logique de démarrage des pompes donne l'ordre d'enclenchement à une des pompes. Si la valeur ΔQ augmente jusqu'à $\geq -6,0 \text{ m}^3\text{/s}$, cette logique donne aussi l'ordre d'enclenchement à la seconde pompe. Sous les conditions inverses, un ordre de déclenchement est transmis à la seconde pompe quand $\Delta Q \leq -4,5 \text{ m}^3\text{/s}$. Dès que ΔQ devient nul ou positif, la pompe restante est également déclenchée.

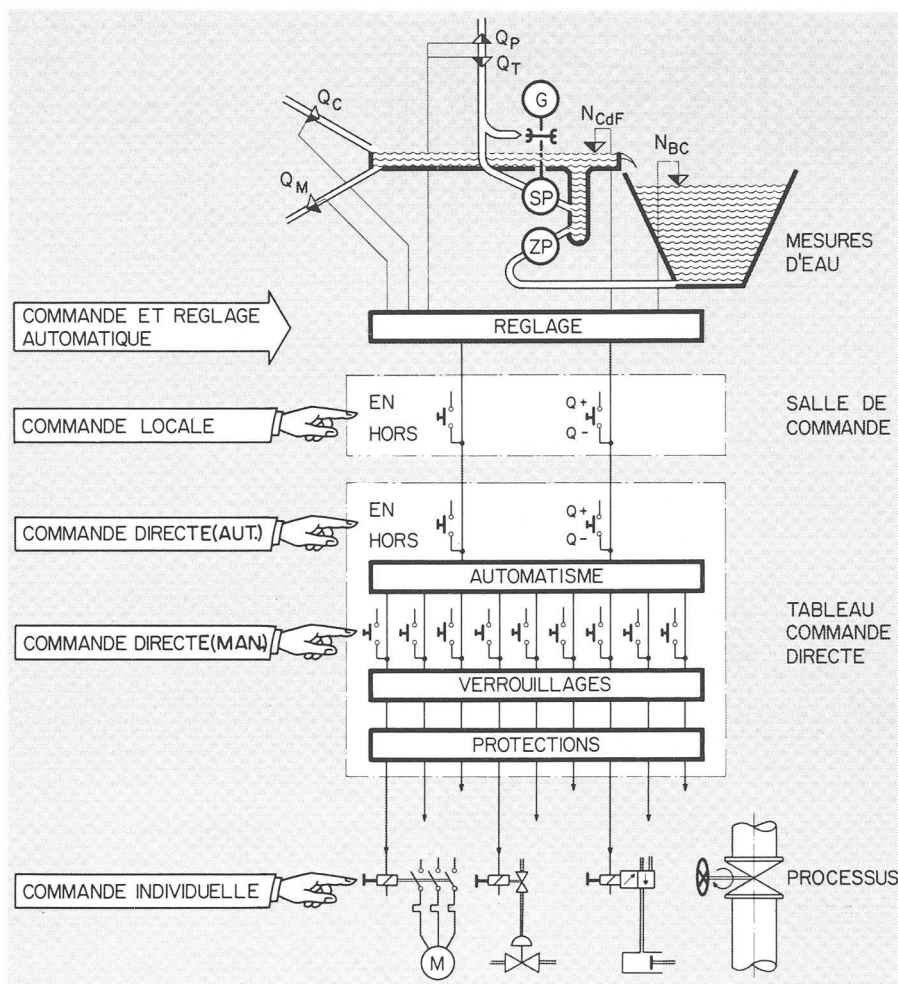


Fig. 16. — Schéma de principe pour commande et réglage.

- (Q_c) Adduction d'eau de rivière
 (Q_m) Ecoulement vers les Marécottes/Ver-nayaz
 (Q_p) Débit de la pompe d'accumulation
 (Q_t) Débit turbine
 (N_{cdF}) Niveau d'eau du canal de fuite
 (N_{bc}) Niveau d'eau du bassin de compensation
 (G) Moteur-alternateur
 (SP) Pompe d'accumulation
 (ZP) Pompe nourrice

Pour le réglage du débit, le signal ΔQ , qui représente la grandeur de conduite, et le signal d'erreur, formé dans le comparateur par la différence entre le niveau dans le canal de fuite et sa valeur prescrite, sont additionnés. Le débit exigé qui en résulte est transmis à travers le limiteur aux valeurs admissibles au régulateur de débit comme valeur prescrite. Le régulateur de débit détermine, à l'aide de la différence entre la valeur prescrite et la valeur instantanée, la grandeur réglante. Le débit étant réglé par l'actionnement du commutateur à gradins, des impulsions adéquates lui sont transmises par l'intermédiaire d'un convertisseur de signaux.

La valeur instantanée utilisée par le régulateur de débit est calculée en utilisant la hauteur de refoulement et la vitesse de rotation des pompes.

Le démarrage de la pompe d'accumulation provoque un besoin d'eau supplémentaire, pour lequel dans la plupart des cas une pompe nourrice additionnelle doit être mise en service. La pompe nourrice déjà en service devant d'abord être déclenchée, il existe le danger que pendant la mise en charge de la pompe d'accumulation le niveau dans le canal de fuite descende trop bas. A cette fin, un manque fictif d'eau est introduit dans le réglage avant le démarrage de la pompe d'accumulation. Le surplus momentané de débit des pompes nourrices qui en résulte reflue par le déversoir dans le bassin de compensation de Châtelard, jusqu'à ce que le débit de la pompe d'accumulation soit stabilisé.

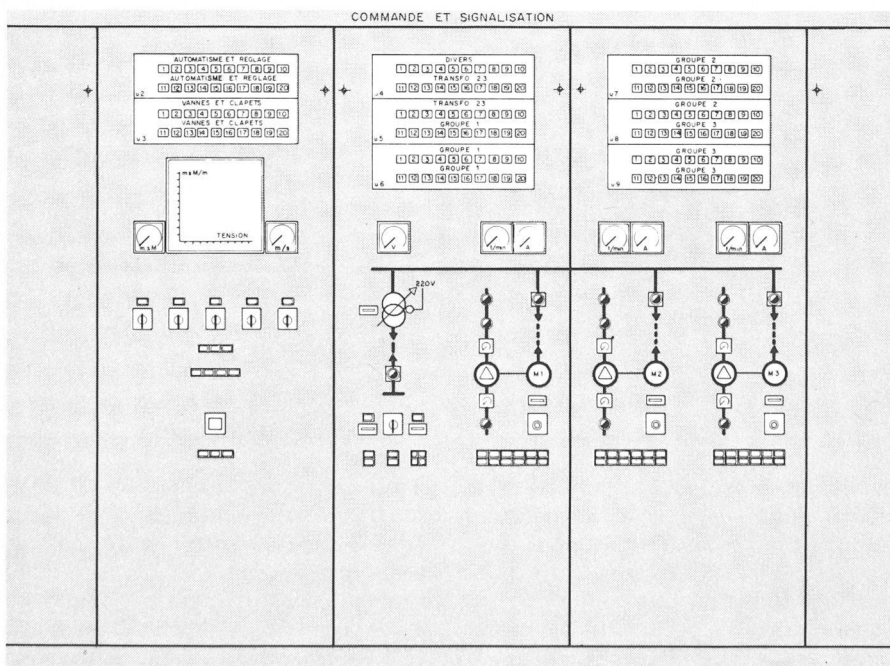


Fig. 17. — Partie commande et signalisation du tableau commande directe.

3.5 Conclusion

L'installation est en service depuis janvier 1977 et offre, malgré sa complexité, un haut degré de disponibilité.

En dépit des aspects inusités des équipements mis en œuvre, des conditions de service difficiles à remplir et des nombreuses innovations exigées, le choix de ce système de pompage s'est avéré judicieux du point de vue de l'exploitant.

Adresse des auteurs :

R. Linz (ingénieur mécanicien ETS, c/o Motor-Columbus, Ingénieurs-Conseils SA, Baden, Département Installations Mécaniques)

G. Leupin (ingénieur electricien dipl. EPF, c/o Motor-Columbus, Ingénieurs-Conseils SA, Baden, Département Installations Mécaniques)

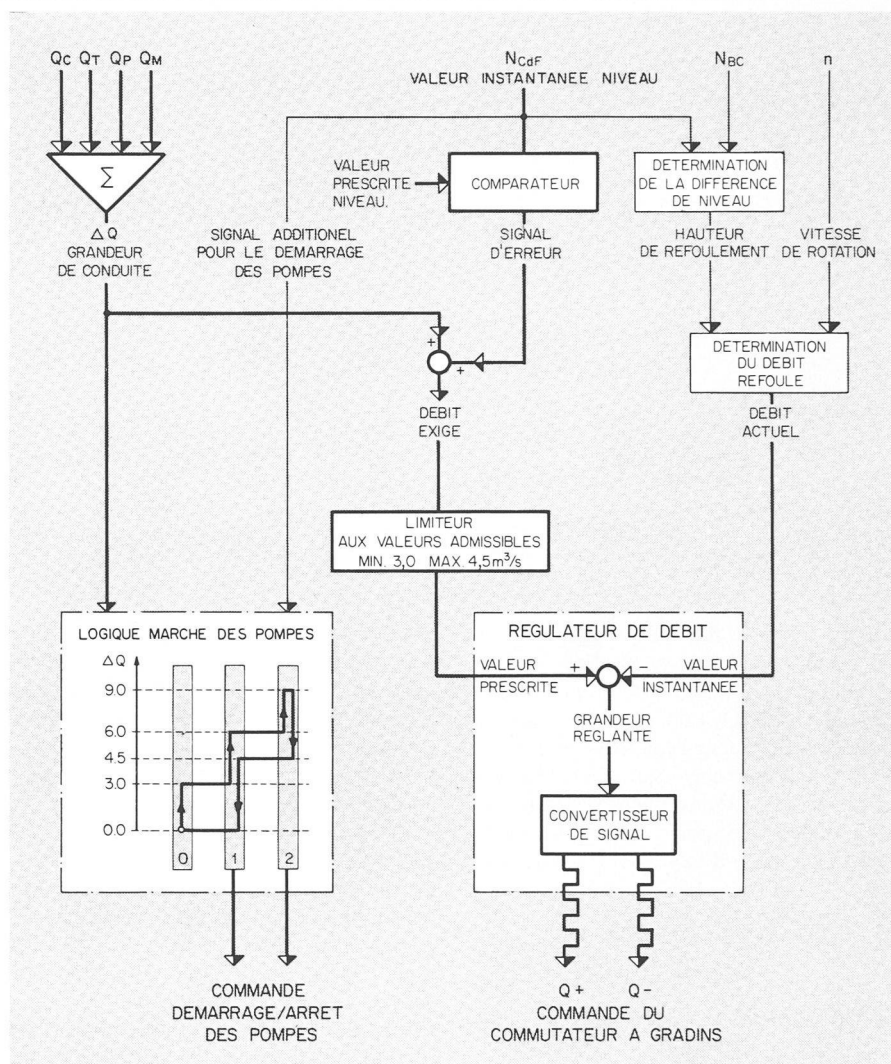
R. Lécho (ingénieur electricien ETS, ibidem, Département Electrotechnique)

E. Hasler (ingénieur electricien ETS, ibidem, Département Réglage et traitement de l'information)

Comme le niveau dans le canal de fuite peut aussi s'abaisser avec un $\Delta Q < -3,0 \text{ m}^3/\text{s}$, une pompe nourrice est aussi enclenchée lorsqu'un certain niveau mini-

mal est atteint. Dans ce cas la pompe reste en service avec un débit de $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ jusqu'à ce que le niveau maximal (déversement) est atteint, et est alors déclenchée.

Fig. 18. — Schéma de principe du réglage des pompes nourrices. (ci-contre)



Bibliographie

- (1) R. MOSER, H. HAAS, E. DÜNNER : *Les moteurs de traction de la locomotive Re 4/4 II des CFF*. Bulletin Oerlikon 1966 (368/369), p. 26-35.
- (2) M. A. BOREL, C. FLORIN : *La locomotive de grande puissance Re 4/4 II des Chemins de fer fédéraux suisses*. Revue Brown Boveri 1970 (10), p. 398-409.

Actualité

L'électrolyse à haute température

Le principe de l'hydrolyse à haute température, connu depuis les années soixante, offre la possibilité de décomposer électrolytiquement, dans des conditions énergétiquement favorables, l'eau en phase gazeuse en hydrogène et oxygène. A des températures de service de 800-1000°C, le déroulement de la réaction sur les électrodes est fortement accéléré sans faire emploi à des catalyseurs de métaux précieux, ce qui permet de largement éviter les pertes de tension par polarisation et d'obtenir de hautes densités de courant. Un des autres avantages de la température de service élevée réside dans le fait que le travail électrique nécessaire pour l'électrolyse de l'eau décroît avec l'augmentation de la température et qu'on peut dans ce but utiliser de l'énergie calorifique moins coûteuse, par exemple la chaleur de processus disponible à haute température des réacteurs à haute température (fig. 1 et 2). Les difficultés technologiques liées à la température de service élevée constituent les désavantages de l'électrolyse à haute température.

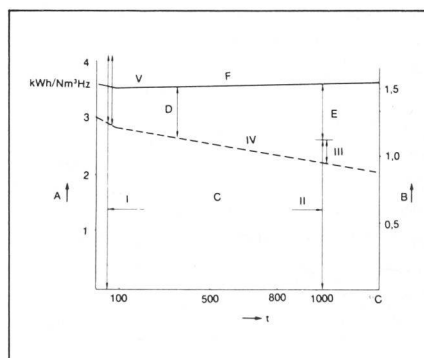


Fig. 1. — Comparaison des besoins énergétiques de l'électrolyse à haute et basse températures.

Légende :

- A Besoin d'énergie
- B Tension de la cellule (V/cellule)
- C Besoin d'énergie électrique global
- D Energie calorifique théorique
- E Besoins de chaleur du réacteur à haute température
- F Energie théorique globale (H₂O liquide)
- I Electrolyse basse température
- II Electrolyse haute température
- III Pertes électriques
- IV Energie électrique théorique
- V Pertes électriques

Le principe de l'électrolyse de l'eau à haute température avec des cellules d'électrolyte solide à l'oxyde de zirconium est représenté à la figure 3. La cellule est, pour l'essentiel, constituée

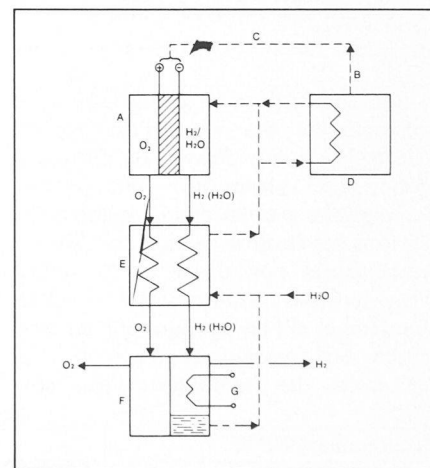


Fig. 2. — Schéma d'une installation d'électrolyse à haute température. Légende :

- A Electrolyseur à haute température
- B Chaleur du processus
- C Energie électrique
- D Réacteur à haute température
- E Echangeur calorifique
- F Condenseur
- G Eau de refroidissement

d'un tube de céramique étanche au gaz, conducteur d'ions d'oxygène sur les surfaces intérieures et extérieures duquel sont appliquées des couches poreuses conductibles d'électrons formant des électrodes. La conductibilité des ions d'oxygène de l'électrolyte solide d'oxyde de zirconium est assurée par les trous de