MARCHE EN DÉCHARGEUR DES TURBINES-HÉLICES A PALES ORIENTABLES (KAPLAN ET BULBES) APPLICATION AUX USINES DU RHONE

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 16 novembre 1967

PAR P. CAZENAVE *

Rappel sur les ondes «de déclenchement» dans un aménagement de basse chute

Les aménagements de « basse chute » établis dans les zones à forte implantation humaine sont, le plus souvent, pour des raisons qu'il n'y a pas lieu de développer ici, du type « à longue dérivation », tels qu'ils peuvent être schématisés par la figure ci-contre. La particularité de ces aménagements est que, sur une ou plusieurs dizaines de kilomètres, le fleuve est doublé par un canal latéral, en sorte qu'entre l'entrée de la dérivation et la restitution l'eau dispose de deux « circuits » placés en parallèle. Sur chacun de ces circuits, le débit est contrôlé par un robinet : le barrage, sur le fleuve court-circuité, l'usine sur le canal de dérivation. Suivant la position de ces robinets sur les circuits, on peut avoir diverses variantes de schémas, dont les deux types extrêmes (dérivation toute en canal d'amenée, ou au contraire toute en canal de fuite) sont représentées sur la figure.

En régime normal et établi, les débits dans l'un et l'autre circuit ont une valeur constante en fonction du temps, et les organes de contrôle des positions fixes. Les niveaux en tous les points des circuits sont constants en fonction du temps et, bien entendu, l'aménagement est conçu de telle sorte que les niveaux en tous points sont inférieurs aux ni-

veaux des ouvrages chargés de contenir l'eau, qu'il s'agisse du barrage, de l'usine ou des digues.

La pente dans le canal de dérivation est sensiblement constante, tant à l'amont qu'à l'aval de l'usine, et la navigation (s'il y en a) est aisée sur tout l'aménagement.

Des perturbations peuvent être apportées à cet état permanent, qui constitue l'état normal, soit

Schémas d'aménagements de basse chute à longue dérivation.

* Directeur délégué à la Compagnie Nationale du Rhône.

par suite de manœuvres sur les organes de contrôle des débits, soit par suite de variations du débit même du fleuve. A cet égard, il convient de souligner tout de suite que les variations du débit du fleuve sont en toute hypothèse infiniment moins rapides que celles qui résultent des manœuvres « réflexes » de l'usine que nous allons étudier tout à l'heure : sur le tiers central du Bas Rhône, des variations de l'ordre de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'heure sont déjà rapides, et correspondent à des crues dont on garde le souvenir, alors que les variations de débit dues à l'action des régulateurs de turbine sont de l'ordre de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ à la seconde, soit largement plus de 500 fois plus rapide. Ce n'est donc pas une simplification abusive que de considérer toujours par la suite que le débit du fleuve est constant pendant toute la durée des phénomènes étudiés.

Nous ne retiendrons donc désormais que les perturbations apportées par les mouvements des organes de contrôle de débit.

A l'origine des perturbations, on trouve toujours l'usine, qui est le seul organe de réglage doué de réflexes rapides, réflexes que nous analyserons au chapitre suivant.

On peut trouver, assez rarement, de légères perturbations, toujours de courte durée, dues à une ouverture des distributeurs de turbine par suite d'un appel d'énergie sur le réseau (baisse de fréquence). Ce phénomène est rare; il n'entraîne dans nos aménagements que de faibles variations de débit, puisqu'en temps normal les machines sont toujours assez près de la pleine charge; enfin, le plus souvent, grâce à la masse imposante des machines réglantes, la fréquence du réseau se rétablit rapidement: s'il en est autrement, ce qui est rarissime, la situation a toutes chances d'évoluer vers des délestages ou débouclages qui entraîneront pour l'usine, soit le retour au débit normal, soit même un abaissement du débit par des déclenchements proches ou lointains sous l'action des protections. Nous retiendrons donc que les appels d'énergie ne peuvent entraîner que des ondes de faible amplitude et de faible volume. Nous n'étudierons pas davantage ce phénomène.

En revanche, notre attention portera sur les cas relativement fréquents où, pour les raisons que nous détaillerons plus loin, le débit de l'usine décroît brusquement de façon appréciable. Pour fixer les idées, il s'agira d'une variation du débit dérivé supérieure à la moitié du débit initial, dans un temps de 10 à 20 s.

Les conséquences hydrauliques d'une telle perturbation ont été souvent décrites; on pourra notamment se reporter utilement à cet égard à une communication présentée ici même il y a très exactement cinq ans par M. Claude Gemaehling, directeur à la Compagnie Nationale du Rhône [1].

Je me contenterai donc ici de rappeler que toute diminution rapide de débit à l'usine entraîne :

— *immédiatement*, le départ de deux ondes, l'une positive, à l'amont de l'usine, et se dirigeant vers l'amont, l'autre négative, à l'aval de l'usine, et se dirigeant vers l'aval.

Ces ondes subissent des réflexions et dérivations diverses, s'amplifient en certains points, mais ne s'amortissent que lentement. Il se superpose en ou-

tre aux ondes principales toute une série d'ondes secondaires que nous ne détaillerons pas.

Il nous suffit de retenir ici que les amplitudes des ondes principales (amont et aval) sont proportionnelles à la variation de débit, variation que nous appelons conventionnellement le « débit coupé »;

— *à long terme*, par ondes successives, un remplissage de la retenue amont et une vidange de la retenue aval.

Au-delà d'une certaine amplitude, les ondes positives peuvent être gênantes pour la navigation. Les ondes négatives, elles, peuvent même être franchement néfastes si leur amplitude est suffisante pour diminuer le tirant d'eau au point de faire talonner les bateaux.

L'inconvénient des effets à long terme est, lui, plus évident encore : si l'on n'y porte pas remède, on peut avoir, assez rapidement, un débordement de la retenue. A titre d'exemple, il est dit dans l'article précité que dans certains aménagements on atteindrait le débordement vingt minutes après la coupure totale du débit à l'usine.

Il importe de rappeler enfin la faible efficacité des manœuvres du barrage pour lutter contre les effets décrits :

L'inefficacité du barrage à lutter contre les ondes est assez évidente, et, instinctivement, on l'attribue surtout au fait qu'il n'est pas pensable, pour des raisons sur lesquelles nous reviendrons, d'ouvrir le barrage assez rapidement. Mais il faut souligner que même si l'on suppose un instant que l'ouverture du barrage peut être décidée à tout instant, sans aucune contrainte, et aussi vite qu'on le désire, il est impossible d'envisager une manœuvre de barrage capable d'annuler les ondes sur toute la longueur du canal : en effet, dans le cas d'un schéma à long canal de fuite, où usine et barrage sont au bord de la retenue amont, une ouverture du barrage dès le déclenchement, et avec une vitesse de manœuvre comparable à celle de l'usine créerait en amont du barrage une onde négative qui pourrait arriver sensiblement en même temps que l'onde positive venant de l'usine, et on pourrait ainsi espérer annuler à peu près les ondes dans la retenue amont (où l'on éviterait d'ailleurs difficilement les ondes transversales dues au fait que les deux ondes n'arrivent pas au même point). On pourrait également espérer (encore que ce soit beaucoup plus difficile du fait des différences de célérité des ondes dans le canal et dans le Rhône court-circuité) arriver à atténuer l'onde dans la retenue aval, après la restitution, en compensant l'onde négative créée par l'usine dans le canal de fuite par une onde positive obtenue par un lâcher approprié du barrage dans le Rhône court-circuité. Mais, même avec de telles manœuvres, les ondes de disjonction restent inchangées, aussi bien dans le petit tronçon de canal d'aménée que dans le canal de fuite. On peut tout juste espérer réduire ainsi les ondes de retour qui reviennent dans les canaux après réflexion sur les retenues. Mais les ondes primaires, qui sont les plus fortes, restent rigoureusement inchangées.

Un raisonnement analogue, que le lecteur établira facilement, montre que le second schéma, qui est d'ailleurs le plus courant, est encore moins favorable que le premier, car en raison des positions

relatives du barrage et de l'usine, il est même impossible d'éliminer à la fois l'onde dans la retenue amont et l'onde dans la retenue aval. Et de toute façon, comme on l'a vu plus haut, les manœuvres du barrage ne peuvent absolument rien contre les ondes primaires dans les canaux.

On pourrait penser en revanche que le barrage peut être une arme absolue contre les effets à long terme du déclenchement, c'est-à-dire contre le remplissage de la retenue amont et la vidange de la retenue aval. Il est important de savoir qu'il n'en est rien. En effet, hors des périodes de crues, le Rhône court-circuité est normalement à très bas niveau, le barrage étant presque complètement fermé, et le débit dans le fleuve court-circuité étant limité au « débit réservé ». A partir de telles conditions initiales, il est dangereux, pour diverses raisons que je ne détaillerai pas, d'ouvrir rapidement le barrage. On doit observer strictement une loi d'ouverture, qui n'est d'ailleurs pas linéaire : au début, on devra se contenter d'un très faible lâcher de débit ; on pourra, par la suite, faire des lâchers plus importants, lorsque le niveau dans le fleuve court-circuité se sera relevé. Pendant un temps appréciable, le volume d'eau évacué par le barrage restera donc faible.

En outre, en raison même des complications qu'entraîne l'ouverture du barrage, on ne peut décider cette ouverture systématiquement pour tout déclenchement (ce qui d'ailleurs entraînerait des pertes d'eau, le plus souvent inutiles puisque les déclenchements sont généralement de courte durée, et qu'on peut en conséquence accumuler un peu). La décision d'ouverture du barrage n'est donc prise qu'avec un certain retard après le déclenchement, lorsque, après avoir pris contact avec les services de mouvement d'énergie, l'exploitant a appris qu'il risque de ne pas pouvoir rétablir la marche normale de l'usine dans un temps convenable. Pour ma part, j'appelle ce retard r le « temps de réflexion », et il est intéressant de voir comment varie ce temps de réflexion en fonction du débit coupé. Bien entendu, le calcul de remplissage de la retenue est à faire dans chaque cas, et les indications que je vais donner ne sont que des ordres de grandeur, destinés à fixer les idées.

Je supposerai que le débit du fleuve est exactement égal au débit d'équipement, majoré du débit réservé, en sorte qu'avant déclenchement le débit dérivé dans le canal est le débit d'équipement, et qu'il n'y a dans le Rhône court-circuité que le débit réservé. J'admettrai que la retenue a une capacité telle qu'en coupant tout débit à l'usine, on puisse accumuler dans la retenue le débit d'équipement pendant 20 mn. Enfin, je supposerai que la loi de manœuvre du barrage autorise un premier lâcher maximal de 5 % du débit d'équipement, puis, un quart d'heure après, un lâcher supplémentaire de 10 %, puis encore un quart d'heure plus tard un lâcher supplémentaire de 15 %, etc., conduisant finalement à un rétablissement de 100 % du débit en une heure un quart.

Je supposerai enfin qu'il se produit un déclenchement total de l'usine de longue durée, et qu'on rétablit à l'usine, par un moyen de décharge quelconque, un certain débit d (débit déchargé) exprimé en % du débit d'équipement.

On montre alors que :

- si $d = 0$, c'est-à-dire si l'on ne rétablit rien à l'usine, le temps de réflexion défini plus haut est négatif, ce qui veut dire que même en décidant d'ouvrir le barrage dès l'instant du déclenchement on ne pourra éviter le débordement de la retenue (à moins de ne pas respecter la loi d'ouverture du barrage) ;
- si $d = 42$ %, le temps de réflexion s'annule, ce qui veut dire qu'on peut cette fois éviter le débordement en respectant la loi d'ouverture du barrage, mais à condition de commencer à ouvrir celui-ci dès le déclenchement ;
- enfin, si d est supérieur à 42 %, le temps de réflexion augmente rapidement, comme le montre le tableau ci-dessous :

DÉBIT DÉCHARGÉ d EN % DU DÉBIT D'ÉQUIPEMENT	TEMPS DE RÉFLEXION r EN MINUTES
42	0
50	10
60	24
70	47
80	85
90	193
100	∞

Cet exemple est évidemment très arbitraire et les résultats numériques donnés sont obtenus par un calcul très schématique, que, dans la réalité, on fait avec beaucoup plus de soin par une étude sur modèle mathématique. Il fournit néanmoins une image assez proche de la réalité, et qui a le mérite de montrer de façon frappante à la fois la nécessité du rétablissement rapide d'un certain débit à l'usine, et l'efficacité de ce rétablissement, qui est telle qu'il n'est généralement pas besoin, pour se mettre à l'abri de tout incident, de rétablir la totalité du débit d'équipement.

En s'en tenant toujours à notre schéma, on voit qu'en rétablissant à l'usine même, par un procédé de décharge quelconque, entre 50 et 60 % du débit d'équipement, on dispose de 10 à 24 mn pour prendre une décision d'ouverture du barrage, ce qui est suffisant pour s'informer de l'état du réseau, et même pour parer à quelques aléas de fonctionnement. Au surplus, on peut montrer que dans ce cas la décision n'est à prendre que pour des pannes de réseau d'une durée supérieure à 40 ou 50 mn, ce qui est tout de même rare, en sorte que dans une telle hypothèse on n'aura pratiquement jamais à ouvrir le barrage.

Si l'on retient en outre qu'il est établi sur le Rhône que l'onde de déclenchement correspondant à un débit coupé égal à la moitié du débit d'équipement est sans inconvénient pour la navigation, on peut retenir de toute cette étude préliminaire que le programme nécessaire et suffisant à imposer à l'équipement de l'usine est que, lors d'un déclenchement général, on rétablisse instantanément à l'usine (ou juste à côté d'elle) un débit au moins égal à la moitié du débit dérivé initial.

C'est à ce programme minimal que se rattachent

toutes les études et réalisations qui vous sont décrites dans la suite de ce rapport, et que vous décriront les autres rapporteurs.

Causes des variations de débit dans une usine hydro-électrique de basse chute

Nous avons rappelé les conséquences des variations de débit dans un aménagement hydroélectrique, et montré le programme minimal à respecter pour éviter que ces conséquences puissent être vraiment gênantes. Il est cependant naturel de se demander si le meilleur remède ne serait pas d'éviter ces variations de débit elles-mêmes, ce qui nous amène à en analyser sommairement les causes. Les groupes fonctionnant sous chute constante, le seul événement qui puisse affecter leur débit est la manœuvre de leur distributeur, manœuvre qui ne peut elle-même se produire que sous l'action d'organes de protection du groupe, ou sous l'action du régulateur de vitesse. Ces actions elles-mêmes sont causées par des incidents à l'usine ou sur le réseau, entraînant, soit des ouvertures des disjoncteurs situés à l'usine, soit des variations plus ou moins rapides de la fréquence, dues à des incidents lointains, et agissant sur les régulateurs de vitesse. Nous passerons rapidement en revue ces deux causes :

1. Déclenchement à l'usine.

Chaque groupe hydroélectrique évacue l'énergie produite par l'alternateur par une chaîne comportant :

- a) un éventuel disjoncteur à la sortie de l'alternateur;
- b) un transformateur élévateur, recevant en basse tension l'énergie d'un ou plusieurs alternateurs;
- c) un disjoncteur haute tension;
- d) éventuellement un jeu de barres, avec divers sectionneurs;
- e) une ou plusieurs lignes de départ d'énergie, munies ou non de disjoncteurs de lignes.

Chacune de ces lignes aboutit en divers postes du réseau, où se trouvent évidemment de nouveaux organes de coupure; mais ces organes échappent généralement à l'action des protections de l'usine.

Au contraire, les disjoncteurs (a), (c) et quelquefois ceux qui sont cités en (e) sont placés sous le contrôle de la salle de commande de l'usine, et reçoivent des ordres d'ouverture de la part des divers relais de protection qui assurent la sécurité de fonctionnement des groupes, transformateurs, et circuits énumérés de (a) à (e). L'ouverture d'un de ces disjoncteurs provoque l'annulation brusque de la puissance d'un groupe, ou d'un ensemble de groupes. C'est un phénomène de ce genre que nous appellerons « déclenchement à l'usine ».

De tels déclenchements peuvent être dus :

- A) à des défauts sur des auxiliaires de groupes, essentiels au fonctionnement de ceux-ci;
- B) à des défauts sur le groupe hydroélectrique ou le circuit électrique qui y est directement relié;

C) à des défauts de transformateur;

D) à des défauts au-delà du transformateur, qu'on désignera très généralement sous le nom de défauts de réseau.

Les défauts du type B peuvent être assez fréquents, surtout au début d'une exploitation, mais ils ne peuvent, par définition, affecter qu'un seul groupe à la fois, et n'entraînent donc le déclenchement que d'un seul groupe. Comme on admet en général (voir page 104) que les coupures de débit ne sont vraiment gênantes que si elles sont supérieures à la moitié du débit d'équipement, ces défauts du type B, ne sont gênants que pour les usines à un seul groupe, ce qui n'est le cas d'aucune usine importante. Nous n'y reviendrons donc pas.

Les défauts du type C sont rares (même si on range dans cette catégorie les défauts à la masse côté basse tension dans les schémas où plusieurs alternateurs sont accordés à un transformateur) et, pour les mêmes raisons que ci-dessus, ces défauts ne sont gênants que pour les usines à transformateur unique, ce qui n'est et ne sera le cas d'aucune usine du Rhône ou du Rhin. Nous ne reviendrons donc pas non plus sur ce type de défaut.

Les défauts du type D et A sont au contraire gênants, car ils peuvent très bien affecter plus de la moitié des groupes, voire la totalité. Ils sont, le plus souvent, dus à des coups de foudre sur le réseau, ou à la conséquence de ces coups de foudre (amorçages de lignes entre phase et masse, ou entre phases, destructions d'appareils de réseau, etc.). Si l'on n'y prend garde, il peut y avoir une certaine dépendance entre les défauts du type D et A, et il arrive parfois qu'un défaut du type D qui n'aurait à lui seul entraîné qu'un déclenchement partiel entraîne un défaut du type A qui provoque un déclenchement général.

Lorsque nous parlerons des remèdes, notre attention devra porter uniquement sur ces défauts D et A.

2. Défauts ou délestages lointains.

Il arrive, assez exceptionnellement d'ailleurs, qu'il se produise sur le réseau des perturbations diverses, entraînant des déclenchements dans des postes plus ou moins éloignés de l'usine, qui se traduisent finalement par un ilotage de l'usine sur un réseau restreint, dont la fréquence d'équilibre est différente de la fréquence de réglage initial. Ce glissement de fréquence peut être plus ou moins rapide, et durer plus ou moins longtemps, suivant les moyens d'intervention dont disposent les exploitants du réseau. Si les machines sont munies de régulateurs de vitesse, ceux-ci détectent ce glissement de vitesse, et modifient les positions des organes des groupes hydroélectriques, pour amener leur puissance à la valeur qui, compte tenu du statisme de régulation, correspond à la nouvelle fréquence. En théorie, cette sorte d'incident peut entraîner aussi bien une augmentation de puissance (par baisse de fréquence) ou une diminution (par hausse de fréquence). Nous avons vu page 102, que l'appel de puissance ne pouvait guère avoir qu'une amplitude faible; il n'y a donc pas lieu de s'en préoccuper ici. En revanche, les diminutions de puissance peuvent être gênantes si elles dépassent

la moitié de la puissance initiale. C'est un phénomène rare mais qui exige une parade un peu particulière, que nous devons examiner plus loin.

Moyens de réduction du nombre de défauts

1. Déclenchements à l'usine.

L'analyse faite ci-dessus montre que les déclenchements gênants à l'usine sont essentiellement des deux types repérés A et D, à savoir :

A : défauts affectant les auxiliaires essentiels de groupes;

D : défauts provenant du réseau.

L'ingénieur chargé du projet d'une usine ne peut pas grand chose pour supprimer les défauts provenant du réseau. Tout au plus pourra-t-il espérer une certaine réduction des coups de foudre, qui sont les défauts les plus fréquents, en faisant installer des fils de garde sur les lignes d'évacuation d'énergie.

Il pourra en revanche réduire les conséquences des défauts du réseau en adoptant un schéma d'usine tel que ces défauts n'aient qu'une faible probabilité d'affecter plus de la moitié des groupes.

Dans ce but, il y aura en général intérêt à diviser l'usine en au-moins deux « tranches » électriques aussi indépendantes que possible, ce qui exige notamment que l'évacuation de l'énergie soit faite par deux lignes au moins, assez éloignées l'une de l'autre et débitant si possible sur des postes ou des jeux de barres différents. On ne devra consentir de connexion entre ces tranches que dans des cas exceptionnels (pour parer, par exemple, à la défaillance d'une ligne). Mais ces précautions extérieures, touchant au circuit d'énergie, risquent d'être illusoire s'il n'est pas pris des dispositions du même genre sur les auxiliaires. C'est la technique que nous adoptons maintenant sur le Rhône, chaque fois que les dispositions du réseau le permettent : c'est ainsi qu'à Pierre-Bénite ou à Vallabrègues l'usine est séparée en deux demi-usines rigoureusement indépendantes, ce qui rend très faible la probabilité d'un déclenchement affectant plus de la moitié des groupes.

Enfin, il y a lieu de prendre des précautions particulières pour que des pompages de fréquence apparaissant sur le réseau en certaines périodes troublées ne risquent pas d'entraîner une consommation d'huile excessive dans les circuits de régulation, sur tous les groupes, aboutissant à des déclenchements en chaîne par manque d'huile. Dans les usines les plus récentes, des précautions sont prises à cet égard, consistant par exemple à bloquer la régulation en cas de pompages excessifs.

Dans les usines du tiers central du Bas-Rhône, le nombre des déclenchements à l'usine affectant plus de la moitié des groupes est compris entre 1 et 3 par an, suivant les usines et les années.

On peut espérer que l'ensemble de précautions décrit ci-dessus abaissera un peu cette fréquence, mais il serait utopique d'espérer éviter complètement ces défauts. En première approximation, il se produira un défaut de ce genre chaque année.

2. Délestages lointains.

On a vu que les déclenchements lointains n'ont d'action sur l'usine que par le jeu des régulateurs de vitesse des machines.

On peut donc totalement éliminer les inconvénients de ces défauts en supprimant les régulateurs de vitesse. C'est une solution évidemment brutale, mais qui présente de gros avantages d'économie et de simplicité; nous pensons qu'une telle solution pourrait être adoptée en France pour les usines à groupes bulbes fonctionnant sur le réseau général, eu égard au fait que, sans précautions coûteuses, ces groupes participent mal au réglage, et qu'en tout état de cause, la puissance totale des usines de ce type n'aura jamais qu'un poids très faible dans le réseau [2].

Si l'on ne veut pas recourir à cette solution extrême, il faudra, ou bien consentir à de fortes variations de débit des groupes, et compenser alors obligatoirement ces variations par *des moyens de décharge n'utilisant pas les groupes* (ce qui est coûteux), ou transformer les défauts du type « lointain » en déclenchements à l'usine (ce qui permet de passer des groupes en déchargeur, selon les procédés décrits plus loin), le nombre de groupes déclenchés étant déterminé par un automatisme simple sensible à la fréquence ou aux variations de puissance. On notera d'ailleurs qu'une disposition de déclenchement partiel de ce type peut également être adoptée dans une usine sans régulation, afin d'apporter une aide partielle au réseau en réduisant la puissance « par tout ou rien » (*).

Au total, on doit retenir qu'il existe des moyens de transformer les défauts lointains en déclenchements à l'usine, ce qui permet ensuite de les traiter de la même façon.

Les déclenchements ainsi provoqués s'ajoutent à ceux qui ont été signalés en 1, mais leur nombre est très réduit.

En conclusion, nous retiendrons que dans chaque usine on peut s'attendre chaque année à subir au minimum un déclenchement de plus de la moitié des groupes. Il n'est donc pas possible, compte tenu des conséquences décrites page 103, de négliger cette éventualité. Mais, pour juger de la qualité à exiger des fonctionnements destinés à lutter contre ces incidents, il faut retenir également que, compte tenu des précautions décrites, ces incidents sont rares. D'autre part, l'ensemble du réseau français est organisé de telle sorte qu'il est très rare et très peu probable que ces défauts soient de longue durée.

* On ne décrit ici que les procédés utilisés, ou dont l'utilisation est effectivement projetée. On notera pour mémoire qu'il existerait encore un autre procédé intéressant pour résoudre ce problème, consistant à faire, plus ou moins finement, le réglage de la puissance par la vanne aval, ce qui permet de rester à débit sensiblement constant.

Il serait facile en particulier d'admettre que, lors d'une réduction de puissance dépassant un seuil fixé, une vanne aval descende dans l'aspirateur à une position fixe convenable, ce qui aurait pour effet de faire fonctionner le groupe sous chute réduite, dans des conditions présentant quelque analogie avec celles de la marche en déchargeur contrôlée par vanne aval, mais avec production de puissance. Pour l'instant, cette sorte de fonctionnement n'est pas envisagée sur le Rhône.

Moyens de lutter contre les conséquences des déclenchements - Déchargeurs et marche en déchargeur

Compte tenu de ce qui précède, nous ne retiendrons ici comme incidents que des déclenchements francs de groupes à l'usine. Nous nous placerons en outre d'emblée dans la situation la plus défavorable, où, l'usine fonctionnant initialement au plein débit, il se produit un déclenchement général de tous les groupes. En une telle hypothèse, sauf précautions particulières, le déclenchement entraîne, par action des régulateurs (ou de détecteurs de vitesse s'il n'y a pas de régulateurs) la fermeture des distributeurs et, par l'intermédiaire de la conjugaison, la fermeture des pales. Au bout de quelques secondes (5 ou 6 dans les projets anciens, 10 à 20 dans les projets les plus récents), les groupes se trouvent en marche à vide établie, à vitesse synchrone (au statisme près), et à débit très faible (5 à 10 % du débit de pleine charge). Le déclenchement a ainsi entraîné une coupure de débit de 90 à 95 % du débit maximal de la machine. On a plus haut analysé les conséquences de cette coupure. Pour fixer les idées, disons que, dans les usines du Rhône, la coupure totale du débit crée une onde initiale dont l'amplitude est de 1 à 1,30 m suivant les sites, et que, par suite de réflexions, cette onde atteint 2 à 2,30 m dans les garages à bateaux.

On a vu plus haut la nécessité, pour éviter le débordement de la retenue, de rétablir très rapidement 50 à 60 % du débit coupé. Il est clair que, pour ce phénomène de remplissage, il importe peu que le rétablissement rapide de débit se fasse en un point ou un autre de l'usine.

En revanche, on peut valablement penser qu'en ce qui concerne les ondes, il est essentiel que la compensation de débit se fasse à l'endroit même où le débit a été coupé, et au même instant.

En fait, les études, et de nombreux essais, montrent que cette réserve n'a de valeur que si l'on s'intéresse à l'analyse fine des ondes dans la partie du canal la plus proche de l'usine : dans cette zone, en effet, il n'est pas indifférent que le débit ait été rétabli dans les groupes eux-mêmes, ou au centre de l'usine, ou dans une passe latérale à l'usine ; dans ce dernier cas, par exemple, il se produit un basculement transversal du niveau qui vient compliquer l'allure des ondes. Mais, si l'on observe le phénomène à des distances de l'usine de l'ordre d'une fois et demie à deux fois la largeur du canal, on peut montrer que la position du point de rétablissement du débit ne joue qu'un rôle très secondaire, et que le seul paramètre qui intervient dans le calcul de l'onde est la différence entre le débit coupé par les groupes et le débit rétabli, en n'importe quel point de l'usine, à la seule condition que la loi de rétablissement du débit en fonction du temps soit identique, au signe près, à la loi de coupure du débit par les groupes (*).

Compte tenu de cette précision, il reste deux grands moyens de rétablir le débit :

— L'un consiste à le rétablir par les groupes eux-

mêmes : c'est le procédé de la marche en déchargeur, objet essentiel de notre étude d'aujourd'hui, et dont nous donnerons les principes plus loin ;

— l'autre consiste à le rétablir par un ouvrage spécial, distinct des groupes, et placé en n'importe quel point de l'usine, sous forme d'un ouvrage très fractionné (comme cela s'est fait sur certaines centrales du Rhin ou certaines centrales russes où il est associé à chaque groupe un conduit de décharge) ou relativement concentré (comme c'est le cas dans la plupart des centrales du Rhône et du Rhin).

L'ouvrage déchargeur devra être muni de vannes à *ouverture* très rapide, capables de rétablir le débit dans un temps qui, suivant les cas, se situera entre 6 et 20 s. Pour atteindre un tel résultat, il faudra toujours faire appel à de puissants servomoteurs actionnés par des réserves d'huile sous pression. Il s'agira toujours de gros ouvrages, puisqu'en toute rigueur ils doivent être conçus pour permettre le rétablissement, sous la chute existant au débit d'équipement, 50 % de ce débit avec une passe de déchargeur défailante. Ainsi, pour un aménagement équipé à 2 400 m³/s, il faudra un déchargeur à :

— deux passes capables chacune de

$$2\,400 \times 0,5 = 1\,200 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ ou à :}$$

— trois passes capables chacune de

$$1\,200 \times 0,5 = 600 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Notons à titre de comparaison que si l'usine est équipée de 6 groupes, il faudra, pour tenir compte de l'hypothèse où un groupe tombe en défaillance au moment du défaut, que chaque groupe fonctionne en *déchargeur* à un débit de :

$$0,5 (2\,400/5) = 240 \text{ m}^3/\text{s},$$

soit 60 % du débit de pleine charge du groupe.

Principe de la marche en déchargeur des groupes hélice à pales orientables (Kaplan et bulbes)

L'étude et la réalisation de la marche en déchargeur des groupes hélice à pales orientables sont un très bon exemple de travail d'équipe, de très longue haleine (puisque j'y participe moi-même depuis plus de dix ans, et que l'étude était amorcée à mon arrivée), et dans lequel il serait souvent malaisé de définir l'apport de chacun, tant les demandes, les idées théoriques ou pratiques, les essais sur modèles ou sur prototypes se sont enchevêtrés ; bien plus, comme dans les études de servomécanisme, il a fallu tenir compte en cours de route de perturbations extérieures à l'étude, mais qui influaient sur elle et lui donnaient des orientations nouvelles. Pour clarifier l'exposé, nous sommes convenus avec nos coéquipiers que chaque laboratoire et chaque constructeur exposera sa participation propre dans les études théoriques, dans les essais et dans les réalisations pratiques, tandis qu'il reviendra à un maître d'œuvre de définir le seul apport qu'il ait

(*) L'article [1] déjà cité précise l'influence des lois de manœuvre comparées du groupe et du déchargeur.

en propre, c'est-à-dire ses exigences, nuancées en fonction des évolutions générales des équipements. En outre, je donnerai un bref aperçu synthétique des principes mis en œuvre et de l'évolution des études, qui sera pour vous un guide, bien imparfait d'ailleurs, à travers les exposés de chacun.

L'idée de base de la marche en déchargeur des groupes de basse chute est essentiellement d'ordre économique : il s'agit de rechercher le moyen le moins coûteux d'évacuer à l'usine, sans production d'énergie électrique, un débit donné.

Étant bien entendu qu'une étude économique globale d'optimisation, dans laquelle interviennent les coûts des digues, des ouvrages de béton, d'un déchargeur éventuel, et les divers paramètres qui jouent un rôle dans le calcul (débit déchargé à l'usine, loi de manœuvre du barrage, etc.) est toujours à faire dans chaque cas, nous admettrons dans la suite, pour fixer les idées, que le débit à décharger rapidement à l'usine est la moitié du débit d'équipement.

Nous nous sommes alors fixé comme objectif final de passer la totalité de ce débit déchargé par les groupes eux-mêmes, étant posé en principe fondamental qu'il ne devrait être apporté à ces groupes aucun aménagement coûteux et que notamment ces groupes resteraient dans leurs parties principales essentiellement conçus pour la production d'énergie dans les conditions économiques les plus favorables. Seuls sont autorisés des aménagements mineurs portant sur les auxiliaires des groupes (schémas électriques, régulation, aération des roues, par exemple) et, au début de l'étude, quelques renforcements mécaniques peu coûteux (tels que l'appui d'un palier supérieur sur le béton par des vérins). On s'est toujours interdit en revanche toute modification de tracé hydraulique (qui eût pu altérer les performances) ou tout aménagement mécanique coûteux. En particulier, bien qu'on ait su très vite qu'une grande ouverture de roue était favorable, on s'est refusé la facilité qu'aurait pu apporter une augmentation de cette ouverture, car cette augmentation eût été très coûteuse, et eût exigé un détalonnage des pales susceptible d'affecter les rendements.

En d'autres termes, la marche des groupes en déchargeur doit être gratuite — ce qui n'est pas seulement une exigence de client, mais bien une exigence de techniciens, qui fut acceptée par tous comme une règle du jeu intangible.

Cela dit, il faut avoir présent à l'esprit que la marche en déchargeur recherchée est une marche du groupe sans production de puissance, c'est-à-dire une *marche à l'emballlement*, dont l'habituelle marche à vide n'est qu'un cas particulier. Le problème est donc de rechercher la marche à l'emballlement la plus satisfaisante pour tous les organes de la machine qui permette en même temps de passer le plus gros débit possible (*).

(*) A ce titre, les véritables précurseurs des essais de marche en déchargeur ne sont pas forcément ceux qui sont cités ici, mais tous ceux qui ont eu l'audace de faire fonctionner de gros groupes à l'emballlement, dans des conditions parfois redoutables (emballlements à vitesse « maximum maximorum », ou « à gueule bée » par exemple).

Il est bien sûr apparu à chacun dès le début qu'on pouvait pour cela jouer sur la position relative des organes de réglage de la turbine (pales et distributeur) en leur donnant des positions différentes (et en particulier des ouvertures plus fortes) que celles qu'on adopte habituellement en marche à vide.

Bien entendu, avant de chercher d'emblée à passer de la marche en charge à la marche en déchargeur, on a voulu examiner les régimes en déchargeur établis en partant de la marche à vide, et en ouvrant la roue progressivement; au surplus, on estimait alors préférable à l'origine, par simplicité, de réaliser tous ces fonctionnements à la vitesse synchrone.

La Compagnie Nationale du Rhône a effectué les premiers essais du genre à Bollène en 1955 et à Châteauneuf en 1958, après une étude sur modèle de Neyrpic qui avait mis au point un fonctionnement à bulle stable avec ressaut vertical sous la roue moyennant une large entrée d'air sous le couvercle. Le détail de ce fonctionnement est décrit dans le rapport SOGREAH.

Sur ce principe, E.D.F. a fait aussi des essais à Cusset et à Beaumont-Monteux et réalisé un fonctionnement systématique en exploitation sur deux machines d'importance moyenne (diamètre de roue 3,35 m) à l'usine de Palaminy [3].

Les résultats de ces divers essais en conjugaison ont été assez variables; certains essais encourageants du passé semblent, avec le recul, ne pas être homogènes à des essais plus récents, parce que les premiers expérimentateurs étaient plus confiants qu'ils ne l'ont été par la suite. On a pu mettre cependant en évidence que les essais les plus satisfaisants étaient ceux où l'on pouvait admettre de grosses quantités d'air, ce qui exigeait un calage de roue plutôt haut. Les autres éléments favorables étaient la grande ouverture de roue et la faiblesse de la chute; la conception mécanique du groupe joue aussi certainement un grand rôle, et, toutes choses égales par ailleurs, les résultats seraient d'autant meilleurs que les dimensions du groupe sont plus petites. Le rapport SOGREAH qui va suivre développera tous ces points et tentera de dégager, surtout d'après les essais sur modèles, des conclusions.

Mais en ce domaine, seuls les essais sur machine industrielle peuvent être vraiment probants, et il est apparu dès les premiers essais qu'il y avait un danger certain à se borner, pour juger de la qualité des fonctionnements, à des notions trop subjectives. On a estimé très vite nécessaire de disposer en ce domaine de critères objectifs, par des mesures d'efforts et de vibrations. On se contenta, au début, de mesures de vibrations et déplacements d'arbre, et d'efforts sur des patins de palier. Puis, lors des essais de Beauchastel, grâce au concours éminent du laboratoire de Chatou, qui exposera tout à l'heure ses essais en détail, on put mesurer directement les efforts sur les organes jugés les plus fragiles, à savoir les pales de la roue.

Quoi qu'il en soit, il faut bien reconnaître que les fonctionnements obtenus dans l'optique de la déconjugaison à vitesse synchrone étaient médiocres.

C'est alors que sont intervenus coup sur coup

dans l'étude deux éléments nouveaux, deux « perturbations extérieures » dont les motifs n'avaient rien à voir avec la marche en déchargeur.

Tout d'abord, l'emploi systématique, sur le Rhône, puis ailleurs, de vannes de protection contre l'emballement situées à l'aval des groupes, et non à l'amont. Ceci pour des raisons économiques d'abord (sur les grosses Kaplan, deux vannes au lieu de trois, sections totales plus faibles, meilleure organisation des rainures) et hydrauliques (la coupure des débits est bien meilleure par vanne aval que par vanne amont).

Ensuite, l'emploi de plus en plus généralisé, pour des raisons économiques, des groupes bulbes à la place des traditionnels groupes Kaplan.

La première perturbation, l'arrivée des vannes aval, a marqué le tournant définitif des études de marche en déchargeur.

En effet, les différents procédés que l'on peut utiliser pour réaliser la marche en déchargeur sont déterminés par l'organe que l'on choisit pour contrôler le débit. Dans toute installation de turbines hélice à pales orientables, on a donc quatre procédés, correspondant aux quatre organes de contrôle que l'on peut trouver sur le circuit hydraulique du groupe, soit d'amont en aval :

- 1° la vanne ou le batardeau amont;
- 2° le distributeur;
- 3° les pales;
- 4° la vanne aval.

En pratique, le procédé 1 est inutilisable, en raison de la très mauvaise alimentation de la roue que procure l'obturation partielle de l'entrée d'eau par l'organe de bouchure amont, vanne ou batardeau.

Le procédé 3 est théoriquement valable et des essais sur modèle ont montré qu'il était intéressant, mais il conduit à des fonctionnements très hypersynchrones qui impliquent des renforcements coûteux de tous les mécanismes du moyeu, pour maintenir les pales aux positions intermédiaires. Ces renforcements risquent même d'être impossibles pour des raisons d'encombrement. En pratique, le procédé 3 n'est donc pas appliqué non plus et il reste seulement les procédés 2 et 4.

On a, en outre, très vite pensé à faire une sorte de synthèse des deux procédés, en les utilisant successivement. Mais le passage d'un fonctionnement à l'autre apparaissait alors très délicat en raison du rôle néfaste joué par le régulateur de vitesse [4]. C'est de cette difficulté qu'est née une des idées les plus fructueuses de toute l'étude : s'affranchir enfin de la vitesse synchrone, et accepter délibérément d'explorer tout le champ des vitesses possibles. Ce sont les fonctionnements très hyposynchrones, avec roue entièrement ouverte, qui sortiront vainqueurs de cette exploration. On a alors établi que pour les grosses turbines Kaplan à roue de 7 m de diamètre, on peut passer, à une vitesse de l'ordre de 60 % de la vitesse nominale, un débit tel que la puissance totale dissipée dans la turbine soit de l'ordre de 10 MW.

A un tel fonctionnement, il est facile de faire succéder, une fois abaissée la vanne aval, un fonctionnement encore plus calme, sensiblement à la

même vitesse, mais avec un débit double; le distributeur est alors entièrement ouvert, et la presque totalité de la puissance est alors dissipée dans un ressaut noyé, derrière la vanne. Sur la colline d'emballement, le point correspondant à ce fonctionnement est celui de l'emballement à « gueule bée » (débit maximal). Mais la chute sur la roue est réduite à 1,50 m environ.

C'est le fonctionnement essayé, et réalisé industriellement, à Beauchastel.

MM. Arnoud et Cante rendront compte en détail de ces résultats.

La seconde perturbation, l'arrivée des groupes bulbes, apporta également un stimulant à l'étude, car les groupes horizontaux sont avantagés dans les fonctionnements en déconjugaison, du fait que, comme le montrera M. Campmas dans son rapport sur Beaumont-Montoux, l'écoulement axial assure une meilleure alimentation d'ensemble de la roue; par suite, la plus grande partie de l'énergie est dissipée à l'aval de la roue.

Il en résulte une majoration importante du débit acceptable dans un groupe horizontal, de telle sorte qu'en se référant à nos critères actuels, on peut compter, sous une chute de 10 m, sur un débit de 100 m³/s, avec un groupe vertical de 7 m de diamètre de roue, et sur 150 m³/s avec le groupe bulbe équivalent de 6,10 m de diamètre de roue (*).

Mais les fonctionnements ainsi obtenus ne permettaient pas encore de réaliser complètement l'objectif fixé. Car, si la marche avec vanne aval permettait d'atteindre largement le débit de 50 % du débit d'équipement, le passage obligatoire, lors du déclenchement, par la marche déconjugée, abaissait le pourcentage à 30 % seulement, ce qui permettait déjà une économie sensible sur le déchargeur, mais n'autorisait pas à le supprimer complètement, puisque l'onde initiale gardait encore 70 % de sa valeur maximale, ce qui était jugé excessif.

Pour aller plus loin, il fallait passer directement du fonctionnement en charge au fonctionnement 3, ce qui exigeait l'utilisation d'une vanne aval capable d'atteindre la zone où elle contrôle le débit dans un temps comparable à celui d'une fermeture de distributeur.

Technologiquement, une telle vanne est à peine plus coûteuse qu'une vanne lente, car on dispose ici d'un moteur gratuit, qui est la gravité. Le seul supplément porte précisément sur les systèmes de freinage, qui doivent être très sûrs. Le supplément qui en résulte est de l'ordre de 20 000 F par vanne, ce qui est très peu de chose. Mais on pouvait redouter que ce changement brusque d'organe de contrôle n'entraînât également en certains points de la machine, de dangereuses surpressions. Des études mathématiques, puis des études analogiques

(*) Dans la comparaison des performances, il convient de souligner que le débit de marche en déchargeur par déconjugaison ne dépend que du diamètre de la roue, tandis que le débit nominal dépend aussi de la vitesse de rotation. Il serait donc illusoire d'indiquer le débit de décharge en pourcentage du débit turbiné car deux machines identiques fonctionnant de façon identique en déchargeur, peuvent avoir des vitesses nominales de rotation différentes; le pourcentage serait alors faible ou fort suivant que, dans son utilisation normale, le groupe serait « poussé » ou ne le serait pas.

menées encore par le laboratoire de Chatou, permirent de définir des lois de manœuvre simples et entièrement satisfaisantes [2].

En outre, les idées du pilotage à vitesse constante, de la commande de toutes les manœuvres à partir de la vanne utilisée comme base de temps, et de l'utilisation judicieuse et sûre d'un limiteur de fermeture, ont permis de modeler à volonté, avec des schémas très simples, la courbe de débit, de telle sorte que l'on passe directement par une courbe pratiquement monotone que M. Megnint présentera dans sa communication, du débit en charge au débit en déchargeur : 200 m³/s à Pierre-Bénite, soit 58 % du débit d'équipement; 280 m³/s à Vallabrègues, soit 70 % du débit d'équipement. L'objectif initialement fixé est atteint, et très largement.

Conclusion

Les études et essais menés par la Compagnie avec la collaboration des laboratoires et des constructeurs ont permis de mettre au point trois types de fonctionnement automatique de groupes en déchargeur :

— *Un fonctionnement par simple déconjugaison*, permettant de passer de façon monotone de la marche en charge à une marche en déchargeur permanente; le fonctionnement obtenu est mécaniquement et hydrauliquement calme tant que, pour une turbine ayant, comme sur le Rhône, un diamètre de roue de l'ordre de 7 m, la puissance dissipée dans la turbine ne dépasse pas 10 MW (ce qui permet par conséquent un débit d'environ 100 m³/s sous 10 m). Ce fonctionnement est utilisé à l'usine du Logis-Neuf.

— *Un fonctionnement par « batardage aval partiel »* utilisant une vanne aval lente (ou deux vannes s'il y a deux pertuis aval) qui, étranglant le conduit aval, ramène la chute sur la roue à une valeur très faible, de l'ordre de 1 m à 1,50 m, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement à régime établi à gros débit, tout en étant très calme, la puissance dissipée dans la roue étant beaucoup plus faible que précédemment (environ 3 MW au lieu de 10). Le débit qu'on peut passer ainsi dans des turbines Kaplan à roue de 7 m, ou dans des turbines bulbes à roue de 6,10 m à 6,25 m varie un peu suivant le type de turbines (les bulbes, qui ont un débit spécifique plus élevé que les Kaplan, donnent de meilleurs résultats) et le calage (la limite de fonctionnement est due à la cavitation, en sorte que plus le calage est bas, plus le débit peut être élevé; pour cette raison, le débit peut être d'autant plus grand que la chute nominale est plus forte). Pour fixer les idées, disons que ce débit est compris entre 200 m³/s (Kaplan) et 280 m³/s (bulbes).

Avec une vanne lente, il n'est pas possible de passer de façon monotone à ce fonctionnement à partir de la marche en charge; il faut obligatoirement passer d'abord par le fonctionnement précédent, en sorte que l'efficacité de ce procédé est plus grande pour lutter contre les effets à long terme

des déclenchements (phénomènes de remplissage) que contre les effets à court terme (ondes).

Ce fonctionnement est utilisé à l'usine de Beau-chastel.

— *Un fonctionnement par « batardage aval partiel »* utilisant une vanne rapide, qui permet de passer de façon quasi monotone du régime en charge au régime établi décrit ci-dessus. Ce procédé est alors aussi efficace pour les effets à court terme que pour les effets à long terme.

Ce fonctionnement est utilisé à l'usine de Pierre-Bénite, et le sera aux usines de Bourg-lès-Valence et de Vallabrègues.

Dans cette dernière usine, compte tenu des résultats obtenus à Pierre-Bénite, et de l'ensemble des études résumées plus haut, on a pu supprimer totalement le déchargeur de fond, rapide et à gros débit, et on n'a gardé qu'un déchargeur très limité, à deux clapets de surface, qui permettra de passer encore un certain débit, mais dont la justification principale est de permettre l'évacuation des corps flottants.

Il est intéressant à cette occasion de donner le bilan de cette opération.

Le débit d'équipement est de 2 400 m³/s.

Sans aucune marche en déchargeur, il aurait fallu un déchargeur tel qu'avec une passe indisponible on puisse rétablir au moins 1 200 m³/s. On aurait donc eu, en une telle hypothèse, un déchargeur rapide à trois passes de 600 m³/s, dont le coût global, comportant le génie civil, les obstacles et l'équipement en vannes rapides, eût été d'au moins 17 millions de francs (12 millions de génie civil et 5 millions d'équipement).

En regard de cette dépense avec la marche en déchargeur telle qu'elle est réalisée (280 m³/s par groupe, ce qui permet une évacuation de :

$$5 \times 280 = 1\,400 \text{ m}^3/\text{s},$$

donc plus des 1 200 m³/s précédents, avec un groupe indisponible, et sans compter le déchargeur de surface), on trouve un déchargeur de surface de 6 millions de francs (5 millions de génie civil et 1 million d'équipement), auquel il faut ajouter :

- 0,5 million de francs de protections supplémentaires à l'aval de l'usine, déterminées par des essais sur modèle à fond mobile pour des marches en déchargeur de durée illimitée, dans les conditions les plus défavorables (une demi-usine en déchargeur, l'autre demi-usine arrêtée);
- et 0,5 million de francs (estimation volontairement très exagérée) pour aménagements divers sur les vannes (réglage des vitesses de descente; freinages) et sur les schémas électriques de vannes et de groupes;

en sorte que la dépense globale s'élève au grand maximum à 7 millions de francs. Encore eût-elle pu être plus faible si l'on n'avait gardé, par précaution, un déchargeur résiduel encore important.

L'économie globale apportée par ce fonctionnement est, compte tenu de tout, d'au moins 10 millions de francs (*).

(*) Encore cette somme ne tient-elle pas compte de l'économie apportée au barrage : du fait que le débit déchargé par les groupes est constant quelle que soit la chute (jus-

Cette conclusion est assurément la meilleure récompense qu'on puisse offrir à l'ensemble des ingénieurs qui, depuis plus de dix ans, à travers les difficultés et les incertitudes, se sont attachés aux recherches, aux études, aux essais et aux réalisations de marche en déchargeur.

qu'aux chutes les plus basses, de l'ordre de 2 m, qui se produisent lors de la crue millénaire), il est possible de compter toujours sur un certain débit dérivé dans le canal. On peut tenir compte raisonnablement de cette participation du canal à l'évacuation des crues dans le dimensionnement du barrage. Au contraire, le déchargeur n'apporterait ici qu'un allègement insignifiant puisque, si son débit est de 1 200 m³/s sous 10 m, il n'est plus que de 535 m³/s sous 2 m.

En ouvrant la séance, M. le Président présente dans les termes ci-après, le thème des exposés qui figurent à l'ordre du jour de celle-ci.

« Qu'il me soit permis, avant de donner la parole aux conférenciers, de vous dire quelques mots qui seront ceux, non pas d'un président de séance, mais plutôt d'un exploitant de centrales hydrauliques.

« Le mérite des auteurs des rapports est d'avoir approfondi un problème d'ordre pratique qui touche à la recherche appliquée, et qui tend à la réalisation d'économies directes sur le prix de revient du kilowatt-heure hydraulique. Et l'on peut dire que ces économies sont d'autant plus significatives qu'elles sont le fruit non pas d'une adjonction au matériel d'exploitation, mais d'une meilleure utilisation de celui existant : la turbine, ce qui permet de supprimer des ouvrages de décharge coûteux en place, en matière et en matériaux, et qui fonctionnaient, comme le dira excellemment M. Cazenave, une fois ou deux, parfois quatre ou cinq fois par an seulement.

« Si l'on a pu dire de l'architecte et même de l'artiste que son travail était terminé lorsqu'il n'avait plus rien à retrancher à son œuvre, on peut en dire autant de l'ingénieur et particulièrement dans le domaine qui nous préoccupe : celui de la meilleure rentabilité des ouvrages.

« C'est donc bien le métier d'ingénieur, dans toute l'acception du terme, que les auteurs des études — qui ont des responsabilités, soit de maître d'œuvre projeteur, soit d'ingénieur hautement qualifié — ont exercé en faisant ces études qui ont été suivies d'applications immédiates.

« Naturellement — cela va sans dire, mais cela va mieux en le disant — ces modifications qui utilisent mieux la place et le matériel doivent se faire à niveau de sécurité égal, qu'il s'agisse de la sécurité de l'exploitation (et du réseau, en particulier), ou de celle des biens et des personnes; sans cela, ainsi que vous le savez, il n'y aurait pas de véritable accomplissement. »

M. le Président remercie M. CAZENAVE pour la densité et la clarté de son exposé.

M. DUPORT fait les deux remarques suivantes :

1° la marche « en orifice » des turbines d'usine marémotrice offre un autre exemple de fonctionnement sur la colline d'emballlement au point de « gueule bée ». Cette marche « en orifice » présente une grande analogie avec la marche en déchargeur avec vanne aval; mais, ici la réduction de la chute est en quelque sorte « naturelle » puisqu'elle résulte du jeu des marées;

2° *a priori*, la vanne aval à fermeture très rapide n'est pas impossible à réaliser et à utiliser pour le fonctionnement en déchargeur des turbines de basse chute; on peut citer, à titre d'exemple, la vanne de prise de grande dimension de l'installation de Bort-Rhue dont le temps de fermeture est d'une seconde. Mais, jusqu'ici on a reculé devant

Bibliographie

- [1] Claude GEMAEHLING. — Quelques aspects des études hydrauliques des aménagements du Bas-Rhône. Communication à la Session du Comité technique S.H.F. du 16 novembre 1962. *La Houille Blanche*, n° spécial B-1962.
- [2] BOUSSUGES, CAMPMAS, CAZENAVE, CHEVALIER et LECRIQUE. — La régulation des groupes bulbes de grosses dimension. S.H.F. IX^{es} Journées de l'Hydraulique, juin 1966.
- [3] R. MONTEIL et J. ABBO. — Le fonctionnement en déchargeur des turbines Kaplan de Palaminy. *La Houille Blanche*, numéro spécial B-1958.
- [4] P. CAZENAVE. — Marche en déchargeur des turbines Kaplan de basse chute. A.I.R.H., Symposium « Recherches sur les turbines hydrauliques », Nice 1960.

Discussion

Président : M. POUSSE

la difficulté d'assurer la sécurité de l'installation en cas de descente intempestive de la vanne, alors que le groupe est encore couplé au réseau ou tourne sur son inertie au voisinage de la vitesse de synchronisme; dans ces conditions, la roue fonctionnant en pompe, peut engendrer des pressions trop importantes pour la sécurité des ouvrages.

M. OSTERWALDER demande à quelle position d'ouverture des vannes s'effectue le fonctionnement en déchargeur.

M. CAZENAVE observe que l'orifice équivalent à la turbine est d'autant plus grand que l'ouverture du distributeur et celle des pales de la turbine sont elles-mêmes plus grandes. Mais, si la vanne aval n'intervenait pas pour réduire la chute effective, les ouvertures admissibles seraient rapidement limitées par les phénomènes de cavitation et les vibrations qui en sont la conséquence. En fait, la vanne aval est généralement fermée aux deux tiers.

M. ARNOUD fait remarquer que dans certaines réalisations de machines devant fonctionner en déchargeur, il a été demandé de passer à ce fonctionnement à partir d'une marche à vide. A quel problème d'exploitation ceci répond-il?

M. CAZENAVE explique qu'une erreur d'exploitation peut se produire; par exemple, on peut oublier de placer sur la position « marche en déchargeur » l'organe de commande de ce fonctionnement. Si un déclenchement des groupes survient, ceux-ci reviennent normalement en marche à vide en restituant un débit réduit; on peut alors restituer un débit plus élevé si la manœuvre visée plus haut est possible.

M. CAZENAVE signale également le cas du « déversement sur programme ». Dans ce mode de fonctionnement, la puissance demandée à l'usine étant inférieure à sa puissance maximale, une partie du débit naturel doit être déversé; ce déversement est généralement réalisé au barrage de prise; mais si la durée de ce déversement doit être assez courte, il peut être plus facile d'assurer l'opération par une ou plusieurs turbines fonctionnant en déchargeur. Un tel fonctionnement peut être aussi envisagé pour aider à l'évacuation des grandes crues (en cas d'indisponibilité de l'une des vannes du barrage, par exemple); dans ce cas, le fait que le débit évacué par la turbine fonctionnant en déchargeur est pratiquement indépendant de la hauteur de chute à l'usine, est particulièrement avantageux.

Revenant sur l'intervention de M. DUPORT, M. CAZENAVE remarque que, si l'on s'est borné jusqu'ici à utiliser des vannes qui parcourent les deux tiers de leur course en quinze secondes environ, c'est au premier chef pour les raisons de sécurité indiquées mais aussi du fait qu'on désirait que le prix de l'ensemble turbine-vanne ne soit pas significativement modifié du fait de son aménagement pour la marche en déchargeur. Or, des vannes fonctionnant

encore plus rapidement que ce qui a été réalisé à Pierre-Bénite (ou décidé pour Vallabrègues) exigeraient des suppléments de dépenses pour l'augmentation de la puissance des servomoteurs et des réserves d'huile sous pression.

M. RACT-MADOUX demande que l'on continue à étudier des vannes aval à fermeture très rapide car cela permettrait — quand la présence de celui-ci n'est pas nécessaire pour d'autres raisons — de supprimer le distributeur à aubages mobiles et de le remplacer par des directrices fixes plus économiques.

C'est là, dit M. CAZENAVE, un autre aspect du problème qui peut être économiquement important; bien que certai-

nes études récentes aient donné des résultats peu encourageants, la question mérite d'être examinée plus à fond.

M. le Président se félicite de toutes les simplifications génératrices d'économies qui ont été proposées; toutefois, il tient à souligner à nouveau que ces simplifications (par suppression pure et simple d'un organe, notamment), ne doivent être préférées aux dispositions actuelles que si elles permettent de maintenir *un niveau équivalent de sécurité d'exploitation*. Il donne comme exemple la suppression des régulateurs de vitesse dans certaines usines hydroélectriques, solution admissible seulement si l'on a une certitude raisonnable que l'usine ne fonctionnera jamais « en réseau séparé ».

Abstract

Relief operation of variable-pitch Kaplan and bulb turbines The case of power plants on the Rhône

by P. Cazenave *

In low-head power schemes with a long diversion channel, a most economical way of avoiding unduly high storage levels is to provide relief arrangements at the power house enabling at least half the rated plant discharge to be bypassed through the diversion canal. Arrangements of this type are necessary because of the moderate size of the flows liable to be released at the river barrages while the bypassed river section remains below a certain level. Quick-acting relief facilities able to pass roughly half the rated total power plant flow are also required at the power house as a means of attenuating waves caused by power sets cutting out, which are a particularly bad navigation hazard.

Analysing the causes of discharge variations in power plants, it is seen that troublesome cutting-out of power units (i.e. involving more than half the units) due to internal power house faults can be almost completely eliminated, and that insidious power variations due to units cutting out a long way away can be transformed into local effects. This only leaves faults originating from the network to deal with; though these are seldom troublesome, one may on the average expect one such fault each year, whose effects it is most important to attenuate. This makes some form of relief arrangement absolutely essential, which may be dimensioned solely for operation during the infrequent short emergencies when it will be required.

The relief arrangements may either be a separate structure from the power house, with quick-opening gates—i.e. a gated bypass—or alternatively, the power sets themselves can be set for no-load relief operation passing a high flow.

It is shown that a correctly dimensioned separate structure is expensive and that it is more economical to do without it if the power units can be made to do the same job cheaper.

The developments which led to use of the power units for relief operation are reviewed, showing the various stages of research and development, which the manufacturers concerned describe in detail in a separate paper. The effect of such outside factors as the increasingly widespread use of individual downstream gates and the advent of bulb units on the design and development work is demonstrated. It is shown how this work finally led to three different policies for power plants on the Rhône, one being a layout without a gate designed for a relief capacity of around 100 cu.m./sec. per unit under 10 m head, another featuring a slow-operating downstream gate finally giving very calm operation with a 200 cu.m./sec. flow, after an initial period at a lower flow, and the third, with a quick-acting downstream gate enabling an immediate transition (i.e. with one same time discharge curve) to be achieved from the flow under head to a very high relief flow (200 cu.m./sec. at Pierre-Bénite and at least 250 cu.m./sec. at Vallabrègues, both of which have this type of system operational). The Compagnie Nationale du Rhône have thus been able to do away with the bottom relief outlet at Vallabrègues, which has saved at least 10 million Francs compared to the conventional single-bypass layout. Future new power schemes will also be so equipped.

* Directeur délégué à la Compagnie Nationale du Rhône.

Gravure extraite de *Architectura curiosa nova* par G. A. BÖCKLERN
(Nuremberg (1664))