LA HOUILLE BLANCHE

REVUE GÉNÉRALE DES EMPLOIS COORDONNÉS

DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE ET DE LA HOUILLE NOIRE

NOUVELLE SÉRIE. — DIX-NEUVIÈME ANNÉE

N° 165. — Juillet-Août 1920

SOMMAIRE N° 165

C'est la coordination des emplois de nos Forces hydrauliques et de notre Charbon qui rendra son indépendance à l'Industrie française.

Quelques récents travaux d'irrigation (J. LEMARCHANDS, Agrégé de l'Université). — L'Etude des Coups de Bélier dans les Canalisations métalliques sous pression (*suite*) C. CAMICHEL, Directeur de l'Institut électrotechnique de Toulouse et D. EYDOUX, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Ingénieur principal à la Compagnie du Midi. — Avantages et Inconvénients des divers systèmes de transformation de courant alternatif à haute tension en courant continu (*suite*) F. SARRAT, Ingénieur à la Compagnie générale de Railways et d'Electricité de Bruxelles. — Etude sur les différents systèmes de réglage de la tension des réseaux à courants alternatifs (V. SYLVESTRE, Ingénieur A. M. et I. E. G.) — Imprégnation, Sénilité et Ignifugation des Bois d'Industrie (*suite*) Jean ESCARD, Ingénieur civil, Lauréat de l'Institut. — L'Utilisation des Combustibles. — Revue des Sociétés savantes et des Publications scientifiques (Académie des Sciences, Académie d'Agriculture). — Revue des Publications étrangères. — Informations. — Législation. — Bibliographie (Lieutenant-Colonel AUDEBRAND, ancien élève de l'Ecole polytechnique).

QUELQUES RÉCENTS TRAVAUX D'IRRIGATION

Au cours d'articles parus dans la *Houille Blanche* ⁽¹⁾, nous avons signalé et étudié, en nous appuyant sur des expériences de longue haleine, quelques-uns des facteurs qui doivent régler la quantité d'eau à employer dans l'irrigation du sol ; nous avons montré comment les qualités physiques des terres étaient au premier rang dans les facteurs à considérer.

Une illustration concrète de ces études, des résultats désastreux obtenus par l'inobservance de ces règles premières, a été résumée par nous au sujet de l'irrigation du Rio-Grande (Etats-Unis).

Cela nous a valu, de divers côtés, des correspondances qui nous ont prouvé, d'une manière évidente, que l'exposition des faits signalés n'était pas sans intéresser quelques-uns des lecteurs de la *Houille Blanche*. Il nous a paru qu'il ne serait pas inutile, non plus, de rentrer dans quelques détails au sujet de la réalisation pratique des canaux d'irrigation, sans rien inventer d'ailleurs, l'improvisation en cette matière, étant, à coup sûr, beaucoup plus fâcheuse encore qu'à l'ordinaire. Mais nous nous sommes attachés à rechercher les

projets réalisés récemment concernant les travaux d'irrigation, afin d'en retirer quelques indications précieuses et utiles. Ce n'est malheureusement pas en France que nous aurions pu les trouver, les années qui viennent de s'écouler ont été occupées par des préoccupations d'ordre bien différent ; la guerre, en concentrant sur elle toutes les énergies, a obligatoirement détourné des travaux de cette sorte l'attention de tous. Récemment, cependant, une loi relative à l'achèvement du canal d'irrigation de Ventavon a été promulguée (*Journal Officiel*, du 29 août 1919) ; les articles qui la constituent ne donnent pas évidemment des renseignements techniques précis sur l'exécution du canal, cependant, la quantité d'eau donnée à chaque usager est fixée. Cette quantité s'élève à 1 l. 25 par seconde et par hectare pour les irrigations qui ne nécessitent pas de pompage, 1 litre pour celles qui en exigent. Voilà peut-être une singulière façon de fixer la quantité d'eau d'arrosage ; elle correspond sans doute à des préoccupations d'ordre pratique : donner moins d'eau lorsqu'elle coûte plus cher pour sa distribution, en donner plus dans le cas contraire. Les chiffres de 1 litre, 1 l. 25 eux-mêmes ont dû être fixés suivant la routine ordinaire, et les considérations d'ordre agricole ne semblent guère avoir pesé sur les décisions prises à ce sujet. Souhaitons cependant, sans trop oser l'espérer, que les études préalables à tout projet d'irrigation aient été faites, que le module du canal soit établi de manière à éviter des mécomptes analogues à ceux du canal de la Bourne.

Si les travaux d'irrigation ont ainsi subi un arrêt regrettable dans notre pays, il n'en a pas été de même dans d'autres contrées souffrant moins de la guerre ; tel a été le cas spécialement des Etats-Unis où de vastes projets ont été réalisés pendant cette période même. Projets neufs à exécuter, vieux systèmes à améliorer ou à réparer, ont nécessité des travaux importants au sujet desquels les ingénieurs américains nous ont donné de précieux renseignements. La construction de canaux en béton armé, de conduites en bois, l'établissement d'usines élévatoires, les conditions matérielles et morales dans lesquelles se sont poursuivies les entreprises sont autant de points sur lesquels des ingénieurs américains de valeur comme MM. E. Court Eaton, Elbert M. Chandler

(1) Cf. *Houille Blanche* 1919 nos 159, 160 ; 1920 n° 162.

Dans l'article « A propos de l'Irrigation » paru sur le n° 152 (janvier-février 1920) se sont glissées quelques erreurs de chiffres, nous les rectifions ici.

1° Page 1, col. 2, ligne 16, lire 3.200 millions au lieu de 320 ;

2° Page 1, col. 1, ligne 56, lire 17 millions au lieu de 85 millions ; ligne 57, lire 34.000 au lieu de 1.700 ;

3° Page 6, col. 1, tableau, lire dans les colonnes Prix total, Par km, Par m³, les chiffres ci-dessous au lieu de ceux indiqués

Prix total	Par km	Par m ³
En Dollars	En Dollars	En Dollars
452.816	2.527	0,120
17 300	3 603,7	0,145
205 729	1.11,78	0,052
63 460	34 37	0,015
34.312	186,25	0,008
110.850	602,5	0,038
Totaux		
et Moyennes 884.467	4 806,8	0,230

nous renseignent et nous font profiter de leur grande expérience personnelle. Ces spécialistes ont résumé leurs travaux en divers fragments publiés dans la revue américaine bien connue « *Engineering News-Record* ». Pouvons-nous exprimer ici le vœu que nos ingénieurs hydrauliciens officiels ou non, veuillent, à leur tour, nous donner les résultats pratiques auxquels leurs travaux personnels les ont conduits, nous sommes sûrs que les colonnes de la *Houille Blanche* leur seraient grandes ouvertes.

Les études que nous résumerons ici ont trait essentiellement à deux sortes de travaux différents, l'une d'elle est relative à la reconstruction ou à vrai dire à la construction du canal principal d'irrigation du district de Naches-Selah, l'autre étudie la construction totale d'un système d'irrigation avec usines élévatoires et puits fournissant l'eau d'arrosage dans le district de Lindsay-Strathmore, en Californie. Quelques travaux plus secondaires sont également indiqués.

District d'Irrigation de Naches-Selah.

Le district d'irrigation de Naches-Selah se trouve situé dans l'Etat de Washington ; il comprend environ 4.250 hectares de terrains constitués essentiellement par des vergers très productifs. L'irrigation était pratiquée, dans ce district, depuis 1888, au moyen d'un canal de dérivation alimenté par les eaux de la rivière Naches.

Ce canal primitif avait 30 km. 500 de long et se terminait par trois conduits secondaires latéraux portant l'eau aux terrains d'arrosage ; sur sa longueur totale il était, soit creusé dans le sol, soit fait d'une conduite en bois. Après trente ans de fonctionnement, le système s'était fortement endommagé, et dans l'été 1917 des fuites considérables se produisirent ; il fallut, à diverses reprises, arrêter l'eau, d'où des arrêts d'irrigation dont le total s'éleva à trente jours au moins et une perte dans la récolte des pommes évaluée à 500.000 dollars. C'est à ce moment que l'on décida la reconstruction et la refonte totale du système.

La construction par l'Etat d'un canal parallèle à l'ancien canal de dérivation (canal de Selah) permit d'abord d'éviter la construction de 11 km. 250 à partir du point de prise. A partir de cette distance le système propre d'irrigation commençait ; il restait donc 19 km. 250, sur ce chiffre 8 km. 500 furent gagnés par redressement du tracé, des 11 kilomètres restants, 5 au plus, suivaient l'ancien parcours.

Tunnels.— La partie originale du nouveau plan consistait surtout en des parcours souterrains nécessitant la percée de 16 tunnels d'une longueur totale de 6 kilomètres $1/2$, ces tunnels étaient reliés entre eux par des conduites et des canaux de béton armé. 375.000 dollars furent consacrés, dès 1918, pour l'accomplissement de ce qu'il y avait de plus nécessaire ; depuis le 1^{er} mai 1918 jusqu'en avril 1919, 8 tunnels de 2.620 mètres environ au total, 935 mètres de revêtement bétonné de canaux, et 300 mètres de conduites furent construits, l'eau pouvait passer à cette époque. Avant cette période un tunnel de 180 mètres et 780 mètres de canaux bétonnés avaient aussi été exécutés pendant l'hiver 1917-1918.

Tous les tunnels ont 2 m. 10 de large, leur fond est plat, les parois latérales s'élèvent de 1 m. 20 à 1 m. 65 jusqu'au départ d'une voûte de 0 m. 60. Les revêtements ont 15 cm. 20 sauf dans les parties rocheuses où seulement 10 cm. 2 sont utilisés.

La largeur de 2 m. 10 fut adoptée d'une façon uniforme afin que les moules utilisés pour le revêtement puissent s'employer partout, et également parce que c'est la largeur mini-

mum permettant de travailler avantageusement. Cette largeur permet aux mulets employés pour sortir les déblais de tourner sans difficulté. Les tunnels furent perforés à la main, quelques-uns entrepris par les deux extrémités, dans ce cas l'avance journalière maximum fut 42 mètres ; la percée se fit au moyen de perceuses à vapeur dans tous les cas, sauf un, les matériaux étant très tendres (sables, schistes) et secs.

D'après *Engineering News Record*
Forage d'un tunnel.

Le revêtement des tunnels fut posé de la manière suivante : on établissait d'abord le revêtement du fond, mais en laissant de chaque côté une bande de 5 x 15 cm. pour que l'on puisse placer ensuite les moules verticaux d'une manière exacte ; entre ces limites le béton du plancher était coulé. Des moules ordinaires furent ensuite utilisés pour le revêtement des parois latérales, déplacés au fur à mesure que le travail avançait. Ces formes étaient reliées à la fois au sommet et à la base pour empêcher tout gonflement, tout voile intermédiaire. Les parois faites, on pratiqua le bétonnage du plafond au moyen de moules à deux parties, l'une mâle, l'autre femelle s'emboîtant et se joignant à la clef de voûte. Ces moules avaient 1 m. 20 de long, ils étaient supportés par des supports de bois très exactement adaptés ; on les remplissait de béton avec la pelle. Quatre hommes y travaillaient : deux enfournaient le béton au-dessus de la tête, deux autres, un de chaque côté, bourraient le remplissage. En huit heures, 18 mètres de plafond étaient, en général, faits ; le maximum fut de 22 m. 80. Un mélange relativement sec était plus satisfaisant pour le plafond, un mélange humide pour le plancher et les côtés ; le béton était fait dans les proportions suivantes 1 : 2 : 4 pour le plancher et les côtés, 1 : 3 : 5 pour le toit.

Le prix de revient est donné dans le tableau I, il comprend à la fois la percée et le revêtement ; il convient de noter que ce travail fut fait en pleine guerre, à un moment où le salaire d'un ouvrier variait de 3 dollars 6 à 4 dollars 5, le dernier prix étant, en fait, le plus souvent pratiqué, qu'enfin les travailleurs étaient rares et souvent âgés. Le bénéfice de l'entrepreneur, la rémunération des ingénieurs ne sont pas compris dans l'établissement de ce prix de revient.

Conduites de béton. — Les conduites de béton armé reliant les tunnels, avaient 2 m. 10 de large x 1 m. 80 de profondeur ; leur largeur était donc celle des tunnels ; la profondeur, en admettant un bord libre de 0 m. 30 assurait un débit de 3 m³ 65 par seconde. Ces conduites sont supportées par des arches distantes les unes des autres de 3 mètres ; tous les trois mètres, une armature d'acier de 7 cm. $1/2$, placée dans le béton, renforce les parois, les branches verticales de

l'armature servent de points d'appui à une poutrelle transversale. La base des murs latéraux est soutenue par des tiges d'acier enfouies dans le béton du plancher. On n'utilisa pas des joints de construction, mais on ajouta 0,4 % du volume de béton en acier; le volume d'acier étant calculé à la température du travail, cet acier s'étendant dans le tunnel faisait en somme l'office d'ancre.

utiliser la section transversale la plus économique au point de vue hydraulique (largeur égale à une fois et demie la profondeur d'eau), on adopta une largeur de 2 m.55 pour une profondeur de 1 m. 50. De même que pour les conduites précédentes, le plancher de celle-ci fut supporté par des arches distantes de 3 mètres mais la conduite elle-même n'eut pas de poutrelles de liaison transversales, les murs furent

TABLEAU I

Prix de revient de l'excavation et du revêtement de 8 tunnels construits pour l'irrigation du district de Naches Selah (Washington).

TUNNEL No	LONGUEUR (mètres)	PRIX (Dollars)		PRIX (Dollars) par excavation		PRIX (Dollars) du revêtement		MATÉRIAUX ENLEVÉS
		Total	par mètre	Total	par m ³	Total	par m ³	
1	576,0	40.095	69,6	18.173	5,12	22.522	27,75	Grès de dureté variée.
2	234,7	18.949	80,58	9.353	6,50	9.596	28,50	Conglomérats, gros blocs Impossible d'extraire par excavatrices.
9	408,9	27.357	66,66	10.437	4,16	16.920	29,25	Grès tendre.
10	324,1	21.293	65,60	8.445	4,23	12.848	27,87	Grès tendre.
11	264,9	16.294	60,60	6.973	4,86	9.321	26,25	Schistes tendres avec graviers
12	267,9	16.047	59,94	6.285	4,38	9.762	27,50	Schistes tendres. Eau amenée de plusieurs km dans de mauvaises conditions.
13	195,3	12.204	63,27	4.645	4,15	7.559	28 »	Schistes tendres. Béton amené de 8 à 10 km.
14	343,5	22.468	65,26	7.162	3,91	15.306	34 »	Schistes tendres. Béton amené de 9 ¹ / ₂ ; eau amenée de 4 ¹ / ₂ l'hiver sur des routes presque impraticables.
TOTAL...	2.615,3	175.307	66,93	71.473	4,66	103.834	28,75	Le prix de revient avait été estimé en 1917 à 4 dollars pour l'excavation et 20 pour le revêtement.

D'après Engineering News Record

Conduites de béton joignant deux tunnels

Des barres d'acier cylindriques furent utilisées à la place de barres façonnées afin de faciliter les mouvements du béton, un mélange très humide fut utilisé car il y avait peu de possibilité pour un pilonnage de quelque importance. Le béton fut, d'ailleurs, ajouté sans arrêt jusqu'à achèvement total de la conduite suspendue. Pour l'une d'elles, une tranchée de 9 mètres dans le rocher fut nécessaire, elle était suivie d'une partie supportée par une arche de béton de 18 mètres d'ouverture, les conditions du sol sous-jacent ne se prêtant pas à l'établissement des fondations nécessaires pour des arches rapprochées.

Pour la jonction entre le tunnel n° 10 (voir le tableau précédent) et la section trapézoïdale du canal cimenté, un type de conduite en béton armé fut établi d'après des principes variés. Comme il n'y avait ici aucune raison de ne pas

construits en encorbellements de manière à résister à la pression de l'eau. La position de cette conduite est d'ailleurs telle que les parois latérales n'ont pas à résister à d'autres pressions que celle de l'eau intérieure, alors que cela put être le cas pour les conduites précédemment décrites. Là encore on ne fit pas de joints de contraction, mais on ajouta 0,5 % du volume de béton en acier. La conduite de 180 mètres de long fut établie par un temps froid, 2 degrés de température, là où elle se joint au revêtement trapézoïdal du canal par une surface de transition, on a établi un mur d'ancrage en quelque sorte à l'intérieur duquel se prolongent les barres d'acier; à l'autre extrémité, les barres d'acier se poursuivent pendant 3 mètres à l'intérieur du tunnel. Peu de temps après sa construction la température descendit à — 15°, durant dix jours au moins, or on ne nota, au plus, que deux ou trois fêlures dues à la contraction; lorsque la température revint à 0° et au-dessus, les fentes se fermèrent de telle façon qu'on ne pouvait les apercevoir à l'œil nu.

Depuis lors, la température s'est élevée à 29°, l'eau étant dans la conduite, sans que des fuites s'établissent.

Bétonnage. — Dans les parties où le canal reconstruit, suit le tracé primitif, on a bétonné le vieux canal. La forme de ce dernier était très irrégulière avec, en beaucoup d'endroits, une paroi verticale revêtue de bois et une pente souvent forte; on choisit alors une section pour la pente la plus commune, la largeur de base fixée à 3 m. 60, inclinaison des parois variant de 1 à 1 1/2, la profondeur valant 1 m. 20. Le plancher fut incliné de chaque bord vers le centre, la différence du niveau étant 15 cm., un drain de tuiles de 8 cm. fut placé sous ce centre et muni d'ouvertures tous les 180 mètres. Un rebord de 17 cm. 5 fut enfin établi de chaque

côté, des cables d'acier formant maille de 30×30 cm. soudés électriquement, furent inclus dans le béton. Des joints de construction plus faible furent établis tous les mètres et demi de manière à concentrer toutes les fissures de contraction dans des points définis. Le bétonnage fut fait dans les temps les plus froids, sans dommages causés par le gel.

Canal d'irrigation de Naches-Selah
Conduite d'irrigation sur arches. — Section normale.

Dans beaucoup de cas le revêtement fut établi sur des sols absorbant beaucoup l'humidité ; des expériences préliminaires avaient donné des résultats peu satisfaisants, cela était dû à l'action de la gelée. En conséquence, on prit les plus sérieuses précautions, le revêtement fut fait en temps froid de façon à ce que toute fêlure due aux variations de température soit close par dilatation durant la période d'irrigation. Ce résultat fut, en effet, atteint; en outre, le plancher fut creusé vers le centre de façon à faciliter un courant rapide vers le drain et augmenter ainsi la résistance à la gelée. Le drain est environné de graviers grossiers et élimine rapidement tout excès d'eau. Un réseau d'acier fut ajouté, pour donner au béton une résistance plus grande vis-à-vis des forces de tension et empêcher toute fêlure venant par exemple d'un tassement du terrain sous-jacent, quoique le sol fut soigneusement drainé avant de revêtir. Ce réseau n'est pas suffisant

pour empêcher les fissures produites par la contraction en temps froid, mais à ce moment le canal est vide et les fêlures se localisent aux parties plus faibles établies dans ce but. La bordure du sommet est faite pour empêcher l'humidité superficielle de pénétrer sous les revêtements latéraux et de causer leur désagrégation par soulèvement. L'épaisseur du revêtement est de 7 cm. 5, le béton est constitué dans les proportions 1 : 2 : 4. La pente de $1 \times 1,5$ des côtés fut adoptée de préférence à d'autres plus raides car elle était déjà suffisamment inclinée pour le bétonnage fait avec un mélange humide. Le réseau d'acier fut acheté en rouleaux de largeur telle que l'on puisse en placer deux sur le fonds et un de chaque côté, on les plaça facilement en les déroulant et on les lia les uns aux autres par de petits cables fixés sur les côtés.

Prix de revient. — Le salaire le plus élevé pour le revêtement fut 4 dollars $1/2$ par jour, les finisseurs avaient 6 dollars ; la préparation du sous-sol fut très coûteuse, faite à peu près toute à la main. Pour le revêtement entier le prix s'éleva à 27 dollars 88 par mètre courant, sans compter le bénéfice de l'entrepreneur et la part de l'ingénieur ; sur ce total, la préparation du sous-sol, y compris le drain, s'élevait à 8 dollars 78 par mètre, il restait donc 19 dollars 10 pour le béton, le réseau d'acier ; soit 32 dollars 1 par m^3 . Tous les tunnels et les encorbellements furent reliés au revêtement des canaux par des surfaces de transition en béton armé.

Ce travail nécessita l'établissement de 16 km. de chemin de fer, et cinq camps de travailleurs. On leur fournissait d'excellents repas à 2 francs, les baraquements étaient éclairés à l'électricité, pourvus d'eau courante, de poêles, etc. Le sable et le gravier nécessaires furent trouvés dans le lit de la rivière Naches ; une usine mobile d'extraction fut installée sur un banc de graviers long et étroit, elle était actionnée par une équipe de cinq hommes.

Agrandissement du canal de Tieton (Washington) Etats-Unis.

Nous pouvons signaler aussi dans le même district la reconstruction ou mieux, l'élargissement du canal de Tieton ⁽¹⁾ faite d'une manière très rationnelle. Ce canal, construit de 1907 à 1909 était destiné à irriguer 9.000 hectares, cette surface d'arrosage fut portée à 12.800 hectares; en même temps la croissance d'algues dans l'intérieur en réduisant le débit, vint s'ajouter aux causes qui nécessitaient un élargissement rapide du canal. De $8 m^3$ 100 par seconde, le débit fut porté à $9 m^3$ 450. L'intérêt d'une amélioration pareille se découvre immédiatement si l'on se reporte aux chiffres de la récolte en 1918, 2.500.000 dollars. La quantité d'eau allouée est de $23.600 m^3$ par hectare.

Le canal primitif était en béton armé, il fut construit en apportant les sections totalement achevées sur l'emplacement préparé et en les cimentant ; sa forme était circulaire, le diamètre valait 3 m. 30, le sommet du canal était à 0 m. 55 au-dessus du diamètre horizontal. Enfin, les bords étaient reliés par des bancs de béton armé de 0 m. 60 $\times$ 0 m. 10 $\times$ 0 m. 15. L'agrandissement commencé à la fin de l'année 1916 fut continué pendant l'hiver 1917-1918 et complété en 1918.

Un point original est à signaler dans ce travail, c'est l'utilisation même du canal primitif comme route, où circulaient mulets et chariots amenant le matériel nécessaire.

Les parois latérales furent rehaussées, pour cela les traverses de jonction furent enlevées, un sillon longitudinal dans les parois tracé pour amorcer les nouveaux murs. Ce

(1) V. article de M. FINLEY (*Engineering News Record*).

Destruction des conduites de béton.

Les conduites de béton du système d'irrigation de Naches-Selah sont, en somme, des canaux ouverts, les dilatations qu'elles peuvent subir ont ainsi la faculté de s'exercer au moins dans un sens et les fissures produites sont essentiellement dues aux forces de contraction. Il n'en est pas de même pour les conduites totalement fermées.

Ces conduites de béton, surtout lorsqu'elles sont souterraines, peuvent subir des détériorations assez importantes du fait de causes variées, cela fut le cas au début de leur construction alors qu'on ne tenait pas compte suffisamment des pressions extérieures ou intérieures auxquelles elles étaient soumises. Un des facteurs principaux dans ces accidents était l'écrasement sous le poids du sol sus-jacent, actuellement on a déterminé scientifiquement cette pression et une formule satisfaisante tenant compte de ce facteur a été établie ; il serait à souhaiter que chaque usine assurant ces constructions de conduites fût munie d'une machine destinée à contrôler l'effort extérieur que peut subir une conduite achevée. Les ruptures, sous l'effet d'une pression intérieure due à l'eau, sont beaucoup plus rares et les essais en vue de déterminer la pression intérieure maxima qu'une conduite supporte sont faciles à effectuer. Un cas spécial de rupture dû à des causes bien différentes fut observé récemment par Smith, à Tucson (Etat d'Arizona, E. U.) dans une contrée semi-aride au cli-

mat sec ; les fractures observées étaient longitudinales et furent attribuées à des variations de dilatation de la conduite. La conduite en question était exceptionnellement lourde et forte, son diamètre atteignait 50 cm. ; les fêlures longitudinales se produisirent au sommet et au fond peu de temps après l'introduction de l'eau ; en certains endroits même sans eau, mais par action du sol environnant légèrement humide. Les réparations nécessitées amenèrent évidemment la suppression de l'irrigation et la perte d'une récolte totale, l'eau

D'après Engineering News Record

Fêlures dans une conduite de béton.

ayant fait défaut deux mois. Les causes ne pouvaient être trouvées dans la pression intérieure faible, ni dans le poids du sol : quinze centimètres de terre au plus recouvrent la conduite. D'autre part, la destruction de portes de soupape montrait qu'une dilatation longitudinale de la conduite s'était produite ; or cette extension ne pouvait être attribuée à une variation de température, il fallait songer donc au contenu. Des recherches furent faites sur les antécédents de la conduite, elle fut construite dans l'été 1917, et laissée plusieurs mois en chantier avant d'être posée, exposée par suite à un soleil très chaud, à des vents desséchants. Or, la saturation de la paroi par l'eau pouvait développer des forces de tension amplement suffisantes pour amener la destruction des portes de béton de 10 cm. d'épaisseur. Seulement, comment une

pression longitudinale pouvait-elle causer des fêlures transversales, le problème semblait difficile à résoudre. La première cassure s'étant produite à un endroit où la conduite fait un angle de 30° pour suivre une pente nouvelle, on pensa qu'il y avait là, peut-être, un facteur déterminant.

L'analyse des causes pouvant amener une rupture dans ces cas, montra bien que sur une courbe de cette nature les pressions longitudinales peuvent être triples de celles observées dans le cas d'une conduite rectiligne mais ne pouvaient causer la fracture. On eut recours, alors, à l'expérience, des essais furent faits au laboratoire sur des spécimens de la conduite elle-même après dessiccation ; quelques-uns furent munis de cercles métalliques et d'un extensomètre afin de mesurer exactement les variations, le poids fut soigneusement déterminé. Enfin, une partie fut immergée totalement dans l'eau, l'autre couchée de manière à ce que seulement le quart inférieur fût dans le liquide ; des diagrammes reproduits ici donnèrent les temps d'absorption et les temps d'expansion, l'absorption était très rapide, l'expansion très lente. L'absorption était rapide extérieurement, plus lente intérieurement, à cause de la carapace dure formée par l'action de la machine. Durant l'essai la conduite partiellement plongée, se fissura, une fracture de 12 cm. 5 fut constatée au sommet à partir de l'intérieur, cette fissure se prolongea jusqu'à la partie la plus dense de la conduite, partie où l'absorption de l'eau était la plus faible ; l'eau atteignait, en effet, seulement 2 cm. 5 en ce point alors qu'ailleurs elle parvenait à 12 cm. 5. L'expansion obtenue était les

56

100.000 de la longueur, la force développée telle que le béton ne pouvait résister ; une expansion transversale se produisait également et provoquait des fissures dès que l'eau atteignait le centre.

D'après Engineering News Record

Ainsi les résultats de l'arrivée initiale de l'eau remplissant partiellement une conduite sont bien nets : une expansion transversale se produit du fait que la partie supérieure n'est pas humidifiée, des forces de tension s'ensuivent, d'où les fêlures latérales ; pour une pénétration d'eau de 1/4 seulement des fissures s'établissaient dans la partie restée sèche. La dilatation de la partie inférieure de la conduite et l'expansion des parties radiales sont aussi les facteurs principaux de la rupture dans le cas étudié ; l'humidité, d'ailleurs, réduit la résistance à la pression, une conduite sèche résiste à 1.311 kilos au m², la suite d'une immersion de cinq heures

elle ne supporte que 900. La propagation de magnésie contenue dans le mélange influe aussi, la magnésie ayant une grande vitesse de dilatation suivant sa teneur en eau ; ainsi pour résumer : la haute teneur en magnésie, la longueur de la conduite, une longue période d'emmagasinement, un climat aride, interviennent activement dans la rupture, si l'une de ces conditions avait été absente, l'accident sans doute n'eût pas eu lieu. Les remèdes à appliquer : faire des joints d'expansion, immerger la conduite totalement pendant une heure et demie à deux heures avant de la poser ; si elle est petite cette précaution est inutile, mais il faut alors amener l'eau dès la pose et noyer la tranchée.

Des recherches faites en Californie, à climat plus humide, n'ont pas fourni de pareils exemples ; dans la vallée de Saint-Joaquin ils sont nombreux, c'est l'influence du climat sec. L'exemple est donc tout à fait intéressant pour nous, nous ne manquons pas, en effet, de régions sèches ; sans parler du Midi de la France, les projets d'irrigation actuellement à l'étude dans nos colonies africaines, Tunisie-Algérie particulièrement, devront tenir compte de ce facteur.

(A suivre.)

J. LEMARCHANDS,
Agrégé de l'Université.

L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

DANS LES

CANALISATIONS MÉTALLIQUES SOUS PRESSION

RÉSULTATS OBTENUS PENDANT LA GUERRE (SUITE)

Les coups de bélier dans les conduites forcées.

On appelle « coups de bélier » les variations de pression qui prennent naissance dans les conduites sous l'influence du changement de vitesse de l'eau, provenant par exemple du fonctionnement du régulateur de la turbine alimentée. Ces phénomènes ont actuellement un grand intérêt en raison du développement des installations hydroélectriques qui comprennent, sauf de très rares exceptions, des canalisations de grande importance ⁽¹⁾ dont la rupture entraîne

⁽¹⁾ On peut dire que les conduites représentent une dépense comprise environ entre 1/12 et 1/5 de la dépense à engager. Pour des installations importantes, cette dépense varie de 500.000 francs à 3 ou 4 000.000 de francs et même plus.

Les conduites sont installées de plusieurs façons distinctes, que nous allons résumer rapidement :

1° Dans les usines utilisant de très fortes chutes, on rencontre après la prise d'eau un canal d'aménée à écoulement libre dont la longueur varie couramment entre 1 et 10 kilomètres. Ce canal se termine à son extrémité aval par une chambre de mise en charge d'où partent des conduites sous pression à très forte pente, amenant l'eau aux moteurs hydrauliques. On peut trouver de très nombreux exemples de cette disposition, depuis l'usine de Vouvry (Valais) avec sa chute de 1.650 m., jusqu'à, pour prendre des exemples dans la région pyrénéenne qui nous est plus familière, l'usine d'Orlu de 20.000 chevaux avec une chute de 940 m., l'usine de Soulom appartenant à la Cie du Midi où des canaux de 6 kilomètres et 4 kilomètres de longueur permettent de réaliser des chutes de 120 et 210 m., l'usine de Sarrancolin où un canal d'aménée de 5.500 m. amène l'eau à une conduite où se réalise une chute de 50 m. Les diamètres de ces conduites varient entre 0 m. 60 pour Orlu et 2 m. 80 pour Sarrancolin.

2° Dans des usines utilisant de faibles chutes avec de gros débits (jusqu'à 6 et 7 m. de chute), il n'y a pas de conduite sous pression, la différence de niveau étant créée par un barrage et les turbines prenant directement l'eau dans le bief amont. Mais au-dessus de cette hauteur

toujours des conséquences très graves : arrêt prolongé de l'usine, dégâts causés parfois à la partie intacte de la conduite, au bâtiment de l'usine, à sa machinerie, aux terrains riverains, etc...

Il est nécessaire, pour l'économie, de réduire le plus possible l'épaisseur de ces conduites ; il faut pour cela connaître exactement les pressions produites par les divers fonctionnements possibles du régulateur, et donner à la paroi de la conduite l'épaisseur juste suffisante pour que le métal, sous l'influence de la pression statique augmentée des surpressions, travaille au taux habituel de 8 à 10 kgm. par mm². La tendance actuelle de l'industrie est d'augmenter la vitesse de l'eau dans les conduites : celle-ci ne dépassait pas récemment encore 2 à 3 mètres par seconde, on atteint aujourd'hui, dans certains pays, 5 et 6 mètres par seconde ; ce qui rend encore plus importante la question des coups de bélier. Néanmoins, cette augmentation de vitesse est limitée par la perte de charge.

Les appareils de protection employés : réservoirs d'air, cheminées d'équilibre, viennent encore compliquer cette étude.

En outre, les usines métallurgiques tendent de plus en plus à l'emploi des presses hydrauliques, alimentées soit par des chutes d'eau, soit par des pompes avec interposition d'accumulateurs ; on sait combien les coups de bélier sont violents dans ces installations.

Nous allons résumer l'état actuel de cette question et indiquer les méthodes employées dans l'industrie pour le calcul de ces phénomènes, dans les projets de conduites forcées.

Nous diviserons les coups de bélier en deux classes distinctes : *ondes se propageant avec une vitesse finie, oscillations en masse*. A la première catégorie appartiennent les phénomènes qui se produisent dans les conduites entièrement purgées ; à la seconde les conduites munies de réservoirs d'air, de cheminées d'équilibre, de parechocs, lorsque la dilatation de l'enveloppe et la compressibilité du liquide peuvent être négligées vis-à-vis des autres phénomènes. Cette division des coups de bélier est commode, mais artificielle, car souvent les deux catégories de phénomènes coexistent.

Quant aux conduites, certaines ont sur toute leur longueur la même épaisseur, le même diamètre et la même nature : nous les appellerons conduites à *caractéristique unique*. Le plus souvent, les conduites sont plus épaisses à leur extrémité aval et plus minces à leur extrémité amont ;

de chute, on rencontre fréquemment une conduite forcée partant de la prise d'eau même et aboutissant directement par une faible pente aux turbines. Nous citerons comme exemple l'usine de Champ dans l'Isère, où une conduite en charge de 4.500 m. de longueur totale et de 3 m. 20 de diamètre intérieur, exécutée partie en béton armé, partie en acier doux, permet de réaliser une chute de 35 m. environ avec un débit de 20 à 25 m.³ emprunté aux eaux du Drac.

3° Enfin dans certaines usines du 1^{er} type, qui ont à fournir de l'énergie en quantité variable, à chaque instant, ou, comme on dit, à faire face à des pointes, la tendance actuelle est de mettre le canal d'aménée en charge. On évite ainsi les réglages à la prise d'eau en mettant en communication directe, par l'ensemble du système en charge, la prise d'eau en rivière et la turbine, qui prend ainsi constamment et automatiquement dans le cours d'eau la quantité d'eau dont elle a besoin. On peut ainsi créer à peu de frais des réservoirs de pointe dans le lit même de la rivière ou aux abords immédiats.

Le système en charge se décompose ainsi en deux parties : une conduite longue et à faible pente pouvant atteindre 6 à 8 kilom. de longueur et où la pression statique peut varier de 3 à 6 m. de hauteur d'eau à la prise jusqu'à 9 à 25 m. à l'extrémité aval ; une conduite à forte pente, aussi courte que possible, dans laquelle se réalise la partie la plus importante de la chute. Pour faire les conduites dans les parties à faible charge, on remplace le métal par le béton armé, plus économique et plus commode pour l'exécution. Parfois une âme très mince en métal, destinée uniquement à assurer l'éanchéité, est enrobée dans une chemise en béton armé assurant la résistance.