

Variations de la perte de charge du canal d'amenée de la centrale de Bévercé

Variation of the head losses in the Bévercé plant head-race tunnel

ALB. SCHLAG,
PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE

PAR
ET

R. SIMONS
INGÉNIEUR A LA SOFINA

English synopsis, p. 577.

La centrale de Bévercé, appartenant au groupement des « Centrales Electriques de l'Entre-Sambre-et-Meuse et de la région de Malmédy », filiale de la Sofina, est située en Belgique, à proximité de la frontière allemande; elle est alimentée par le réservoir artificiel de Robertville, créé par un barrage établi sur la Warche (fig. 1).

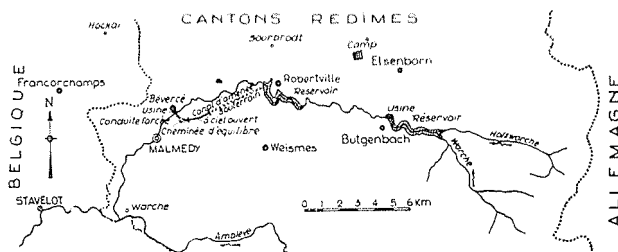


FIG. 1.

L'eau est retenue à la cote normale de 496 m. Du réservoir part un canal d'amenée sous pression, dont la partie amont, comportant environ les 4/5 de la longueur, est constituée par un tunnel, tandis que dans le tronçon aval, sur le dernier cinquième, le tunnel est remplacé par une tuyauterie métallique rivée, courant à flanc de coteau.

La conduite d'amenée, d'une longueur totale de 5.465 m, peut être divisée en cinq parties, composées chacune de tronçons non consécutifs, mais pouvant se grouper comme suit, d'après leur nature :

	Longueur (m)	Section (m ²)
a) Béton lisse.....	1.252	2,68
b) Béton lisse.....	2.600	2,98
c) Fond lisse, parois gunite, irrégulières.....	426	3,80
d) Fond lisse, parois gunite, lissées à la truelle.....	120	3,80
TOTAL POUR a à d ...	4.398	
e) Conduite métallique ou tunnel recouvert de métal.....	1.067	3,10
	5.465	

La section moyenne, compte tenu des longueurs, est, pour l'ensemble des parties a à d, exactement de 3 m² correspondant à un diamètre de 1,955 m; pour la conduite d'amenée entière, elle est de 3,02 m², correspondant à un diamètre de 1,96 m.

Nous admettrons dans les deux cas une valeur de 3 m².

La conduite d'amenée aboutit à une cheminée d'équilibre d'où part la conduite forcée, en tôle d'acier rivée, longue de 265 m et d'un diamètre intérieur de 1,755 m. Elle se termine à la centrale de Bévercé. La hauteur de chute est de 154 m. La centrale comporte trois groupes de 5.700 ch, soit une puissance totale installée de

11.500 kW environ (turbines Escher-Wyss du type Francis à axe horizontal, tournant à 750 t/m, alternateurs SEM de 5.500 kVA à 6 kV).

Des essais furent exécutés sur l'installation les 10 juin 1932 et 30 juillet 1935, dans le but de fixer le coefficient de conversion, c'est-à-dire le nombre de watts-heure fourni par m³ d'eau turbinée, et accessoirement de contrôler le rendement des machines et les pertes de charge dans les ouvrages d'aménée d'eau.

En 1947, il fut estimé nécessaire d'entreprendre de nouveaux essais; on avait en effet constaté une réduction importante de la puissance maximum productible (qui était tombée de 10.100 kW en 1930 à 8.600 kW en 1947). Elle fut attribuée à un accroissement de la perte de charge dans la conduite d'aménée, en raison des deux constatations suivantes :

Une machine débitant seule continuait à produire pratiquement la même puissance qu'autrefois;

Les trois machines démarrées rapidement continuaient à donner une puissance voisine de 10.000 kW pendant un court moment (alimentation par la cheminée d'équilibre).

De nouveaux essais effectués le 12 avril 1949 confirmèrent cette supposition : le coefficient de résistance λ moyen de la conduite d'aménée a été trouvé égal à 0,0263 contre 0,0202 aux essais de 1932 et 0,0208 à ceux de 1935, soit une augmentation de 30 ou de 26,5 %.

Il fut décidé en conséquence de procéder au nettoyage de la conduite d'aménée. Cette opération eut lieu en septembre-octobre 1949. Elle fut limitée, faute de temps, à la seule partie en tunnel de la conduite d'aménée, la partie métallique ayant d'ailleurs déjà été nettoyée en 1935-37 en vue de la repeindre.

On constata dans la conduite d'aménée un dépôt de boues de couleur noire et d'épaisseur assez uniforme, comprise entre 12 et 17 mm; sa surface extérieure présentait des ondulations de même nature que celles qu'offre le sable des plages. Les dimensions de ces ondulations ne furent malheureusement pas relevées; les ouvriers qui avaient procédé au nettoyage ont été interrogés par la suite; leurs estimations variaient dans de très fortes proportions. Il semble (mais ces valeurs doivent être acceptées avec prudence) que la hauteur des ondulations variait de 2 à 6 mm, avec une moyenne de 3,5 mm, tandis que l'écart de deux ondulations successives avait été apprécié comme variant de 20 à 500 mm, avec une moyenne de l'ordre de 110 mm.

Aussitôt après la vidange de la conduite, la consistance de ce dépôt était molle et le nettoyage pouvait se faire à la main. Il se produisait ensuite un durcissement à l'air, et des raclottes en tôle ont dû être employées.

Un échantillon prélevé à une hauteur de 1,40 m de la conduite a été analysé par les Laboratoires de la Sofina. L'analyse a donné les résultats suivants :

COMPOSITION GÉNÉRALE :

Humidité	84,2 %
Matières sèches	15,8 %
Produits solubles dans l'eau..	1,3 %

COMPOSITION DU PRODUIT SEC :

Pertes au feu.....	16,4 %
Manganèse (calculé en bi-oxyde de Mn)	57,6 %
Silice	16,4 %
Oxyde de fer.....	7,6 %
Alumine	5,3 %
Oxyde de zinc.....	0,9 %
Oxyde de baryum.....	0,9 %
Chaux	5,6 %

Absence de magnésie, anhydride sulfurique, chlore, anhydride phosphorique.

Après le nettoyage, de nouvelles mesures de perte de charge furent effectuées le 30 novembre 1949. Elles donnèrent pour l'ensemble de la conduite d'aménée un coefficient de résistance λ de 0,0154, soit inférieur de 24 % à la valeur 1932 et de 41,5 % à la valeur 1949 avant nettoyage. D'autre part, dès le 10 octobre 1949, une puissance de 9.400 à 9.500 kW put être obtenue pour une cote de 490,70 au lac de Robertville (contre 8.600 kW avant nettoyage pour une cote de 495).

ORGANISATION DES ESSAIS. — Les essais devaient comporter la mesure des débits et celle des différences de charges entre les deux extrémités du canal d'aménée.

Le débit a été déterminé dans une section de la conduite forcée, par la méthode du moulinet. Les vitesses ont été relevées en 9 points d'un diamètre vertical et le débit en a été déduit par intégration graphique du diagramme des vitesses. La section de mesure étant située à une distance de 34 diamètres du coude amont le plus proche, il a été admis qu'il suffisait de faire le relevé des vitesses selon un seul diamètre.

Lors des essais du 12 avril 1949 est apparue une petite incertitude quant à l'aire exacte de la section de mesure : alors que le diamètre intérieur vertical mesuré était de 1,7555 m, le périmètre extérieur mesuré de la virole était de 5,504 m correspondant, compte tenu de l'épaisseur, à un diamètre intérieur de 1,752 m. Sa section semble donc s'être déformée et si l'on admet qu'elle est devenue elliptique, on trouve que sa surface est de 4 % inférieure à celle d'un cercle de 1,7555 m de diamètre. Pour rendre les résultats de 1949 comparables à ceux de 1932

et 1935, on a toutefois admis que la section était circulaire et de 1,7555 m de diamètre. Il se pourrait donc que les débits calculés en 1949 soient surestimés d'environ 4 %.

La perte de charge dans le canal d'aménée résulte de la différence des niveaux d'eau dans le réservoir de Robertville et dans la cheminée d'équilibre.

Le niveau d'amont a été relevé avec soin à l'échelle limnimétrique du lac d'alimentation.

Le niveau dans la cheminée d'équilibre a été mesuré à l'aide d'un dispositif, constitué d'un flotteur suspendu à un câble passant sur 2 poulies et équilibré par un contrepoids. Un repère fixé au câble permettait de suivre les déplacements du flotteur : sa position « zéro » avait été préalablement déterminée, lorsque, aucun débit ne traversant le canal d'aménée, le niveau dans la cheminée était identique au niveau du lac.

La différence des niveaux entre le bassin et la cheminée d'équilibre a été corrigée, pour donner la perte de charge :

de l'énergie cinétique au débouché du canal d'aménée dans la cheminée,

et, pour certains essais, de la perte (calculée) propre à un petit débit ($\pm 0,035 \text{ m}^3/\text{s}$) alimentant une station d'ozonisation, installée à environ 700 m en amont de la cheminée.

Pour la plupart des essais, cette station avait d'ailleurs été arrêtée.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES ESSAIS. — De la connaissance du débit Q et de la perte de charge totale H dans le canal d'aménée, il était aisé de déterminer le coefficient de résistance λ et le nombre de Reynolds, par les formules :

$$H = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{U^2}{2g} \cdot L \text{ et } Re = \frac{UD}{\nu}$$

(U = vitesse moyenne).

On a arbitrairement adopté pour ν les valeurs correspondant aux températures suivantes (les températures de l'eau n'ayant pas été relevées) :

- 12° pour les essais du 10 juin 1932,
- 15° pour les essais du 30 juillet 1935,
- 5° pour les essais du 12 avril 1949,
- 2° pour les essais du 30 novembre 1949.

La connaissance exacte de la température ne paraît pas avoir d'ailleurs une importance essentielle.

Nous avons pu de la sorte reporter les résultats obtenus sur le diagramme classique de NIKURADSE (fig. 2).

On voit que les valeurs moyennes de λ peu-

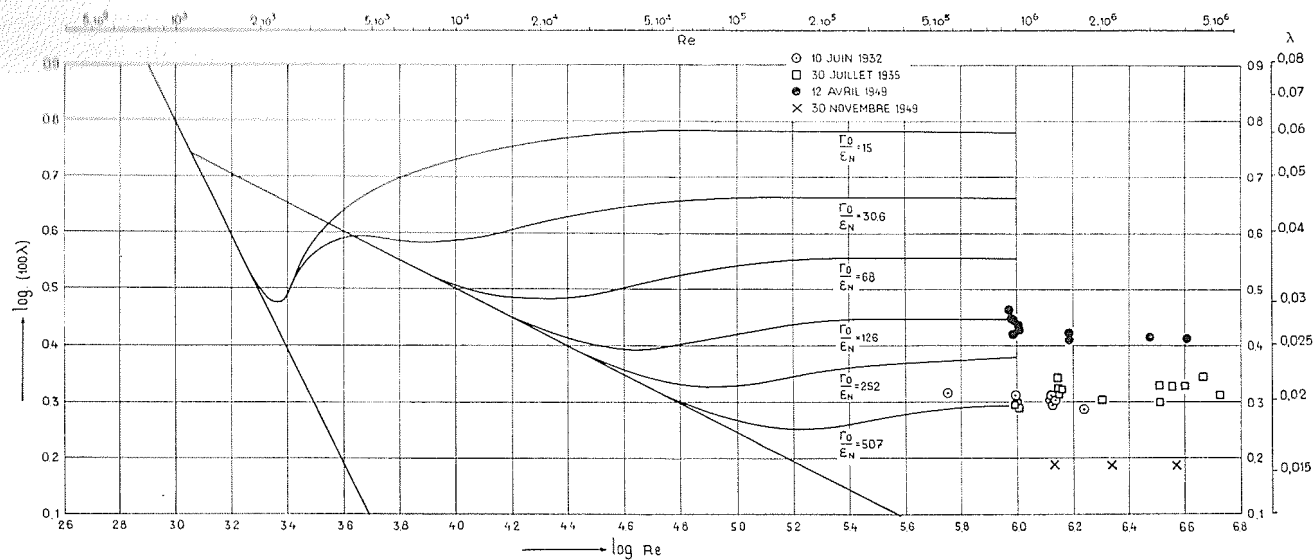


FIG. 2.

vent être prises égales à celles figurant au tableau I (1).

(1) Pour les essais du 12 avril 1949, nous n'avons retenu pour le calcul du λ moyen, que les 5 valeurs correspondant aux plus faibles valeurs de λ . Pour les 4 autres essais, effectués en fin de journée, on n'a pas disposé du temps nécessaire pour l'établissement d'un niveau stable dans la cheminée d'équilibre.

Par la formule classique de NIKURADSE :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 + 2 \log \frac{r_0}{\varepsilon_N}$$

nous en avons déduit les valeurs de $\frac{r_0}{\varepsilon_N}$ et de là, celles de ε_N , rugosité selon NIKURADSE.

Il faut remarquer que l'essai de novembre 1949 correspond à une valeur de $\frac{r_0}{\varepsilon_N}$ (1445) bien supérieure à la plus élevée de celles adoptées par NIKURADSE (507). L'extrapolation est donc assez forte.

TABLEAU I

DATES	λ	$\frac{r_0}{\varepsilon_N}$	ε_N mm
10 juin 1932.....	0,0202	452	2,15
30 juillet 1935....	0,0208	398	2,45
12 avril 1949.....	0,0263	166,5	5,9
30 novembre 1949.	0,0154	1.445	0,675

La rugosité absolue selon NIKURADSE déduite de la valeur de λ (5,9 mm) pour le canal recouvert de boue est donc nettement supérieure à la rugosité moyenne appréciée par les ouvriers ayant procédé au nettoyage ($\pm 3,5$ mm). Leur rapport est 1,65 à 1,70.

Une correction doit pourtant être apportée à la valeur de λ calculée ici comme moyenne pour toute la tuyauterie en ce qui concerne les mesures de novembre 1949.

Comme nous l'avons dit plus haut, tout le canal d'amenée n'a pas été nettoyé, mais seulement les parties bétonnées et nues du tunnel (soit 4.398 m), plus le petit tronçon métallique d'Angister (soit 84 m), c'est-à-dire en tout 4.482 m sur une longueur totale de 5.465 m. D'autre part, il a été noté que la « boue déposée sur la conduite métallique ne présente pas l'aspect ondulé caractéristique que l'on trouvait dans le tunnel avant nettoyage ». Enfin, le nettoyage du tronçon irrégulier de 426 m ne doit pas avoir eu grand effet, les irrégularités de paroi de plusieurs centimètres étant considérables par rapport à celles du dépôt.

Si l'on admet que les 983 m non nettoyés avaient un coefficient λ compris entre les valeurs moyennes de 1935 : 0,0208 et d'avril 1949 : 0,0263, soit en moyenne 0,0235, la valeur moyenne du λ de la partie nettoyée aurait été, en avril 1949 : 0,027, peu différente de la valeur calculée plus haut, et en novembre 1949 : 0,0135, soit la moitié de la valeur avant nettoyage.

A une valeur de λ de 0,027 correspondent des valeurs de $\frac{r_0}{\varepsilon_N}$ de 151 et de $\varepsilon_N = 6,5$ mm (selon NIKURADSE).

Le rapport entre la valeur absolue de la ru-

gosité de NIKURADSE et la rugosité réelle est $\frac{6,5}{3,5} = 1,85$.

Dans un mémoire publié dans la *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* (1), MM. SEIFERTH et KRUGER avaient signalé l'augmentation considérable de λ subie, en peu d'années, par la conduite en acier de l'Ecker. Cette résistance, mesurée sur un tronçon long de 178,1 m et d'un diamètre de 496 mm, correspond aux valeurs suivantes de λ (variable avec le nombre de REYNOLDS) :

$\lambda =$ en moyenne 0,016 à la mise en marche (1943?) et après nettoyage en juillet 1949;

$\lambda =$ en moyenne 0,048 (0,0564 à 0,0412) en février-mars 1948.

En quelques années, la conduite s'était recouverte d'un dépôt de boue, se présentant sous forme d'ondulations, normales au sens de l'écoulement, hautes d'environ 0,7 mm et écartées d'environ 3 à 8 mm. Il y correspond une rugosité de NIKURADSE de 6,2 mm (pour $Re = 4,92 \cdot 10^5$) à 14,6 mm (pour $Re = 1,38 \cdot 10^5$).

SEIFERTH et KRUGER avaient pu expliquer la forte proportion entre la rugosité de NIKURADSE et la rugosité réelle, en recourant à des essais de SCHLICHTING (2). Celui-ci a expérimenté une série de types de rugosités, différents du type clas-

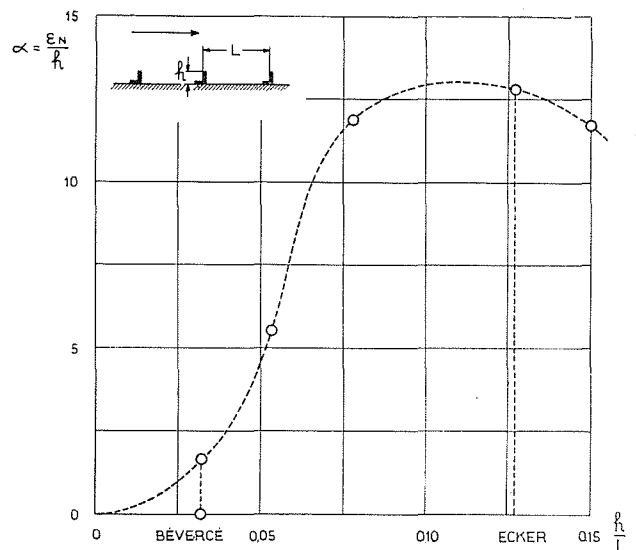


FIG. 3.

(1) *Ueberraschend hohe Reibungsziffer einer Fernwasserleitung* (Z.V.d.I., 11 mars 1950).

(2) SCHLICHTING. — *Experimentelle Untersuchungen zum Rauheitsproblem* (Ingenieur-Archiv, vol. 7, n° 1, 1936).

sique de NIKURADSE, parmi lesquels figure celui qu'il appelle « Lange Winkel » : il est constitué de longues cornières disposées sur un fond poli et orientées perpendiculairement à l'écoulement (fig. 3).

Trois modèles ont été expérimentés se distinguant par les rapports $\frac{h}{L}$ de la hauteur h de la saillie à la distance L de deux saillies voisines (tableau II). SCHLICHTING a déterminé pour chacun de ces trois modèles le rapport $\alpha = \frac{\varepsilon_N}{h}$ de la rugosité équivalente de NIKURADSE ε_N , à la hauteur h de la saillie.

TABLEAU II

MODÈLE	L mm	h mm	$\frac{h}{L}$	ε_N mm	α
Schlichting I XX...	60	3,2	0,0535	18,1	5,61
XI...	40	3,1	0,0775	37,0	11,9
XII...	20	3	0,15	35,6	11,75

Nous avons tracé au mieux le diagramme de α en fonction de $\frac{h}{L}$ passant par ces trois points et aboutissant, tangentielllement, à l'axe des abscisses, à $\alpha = 0$ et $\frac{h}{L} = 0$ (surface polie) (fig. 3). Nous y avons fait figurer le point correspondant à la conduite de l'Ecker ($\frac{h}{L} = \text{env. } \frac{0,7}{5,5} = 0,127$) et donnant $\alpha = 12,8$. Avec $\varepsilon_N = 6,2$ à 14,6 mm, soit en moyenne 10,4 mm, on trouve comme hauteur moyenne d'irrégularité $\frac{10,4}{12,8} = 0,8$ mm très proche de la valeur 0,7 observée.

Le dépôt de boue de Bévercé donnait une valeur moyenne de $\frac{h}{L} = \frac{3,5}{110} = 0,032$, soit au diagramme $\alpha = 1,9$, valeur pratiquement égale à celle constatée plus haut : 1,85.

Nous nous rendons sans doute bien compte de ce que l'explication que nous proposons a de fragile et de ce qu'il y a d'imprécis dans les bases sur lesquelles elle repose.

Nous pensons cependant pouvoir l'énoncer, avec l'espoir que de nouvelles observations, aussi précises que possible, permettront soit de la confirmer, soit de l'infirmer.

DISCUSSION

M. le Président remercie M. SCHLAG d'avoir bien voulu venir spécialement à Paris pour présenter ce mémoire, souligne la clarté de son exposé, et le paradoxe qu'il contient, à savoir la moindre résistance de la conduite vieille après nettoyage vis-à-vis de la conduite neuve.

M. SCHLAG observe toutefois que la conduite, mise en service en 1929 n'était plus tout à fait neuve lors des premières mesures en 1932 et 1935 (*).

En cas de publication, M. le Président suggère de graduer directement les axes du diagramme en valeurs λ et R correspondant à l'échelle logarithmique adoptée.

M. RÉMÉNIÉRAS rend compte de phénomènes analogues constatés dans une galerie en béton lisse, de diamètre utile comparable à celle de Bévercé, alimentant l'usine d'Electricité de France à Monceau-la-Violle : une diminution de la puissance maximum constatée peu de temps après la mise en service suscita des mesures de pertes de charge, qui révélèrent une augmentation de la

résistance de 53 % en quelques mois; cette perte de charge attribuée par M. RÉMÉNIÉRAS à un « enduit biologique », disparut effectivement après grattage de l'enduit et lavage de la galerie, mais reparût bientôt, au fur et à mesure de la croissance des algues microscopiques poussant sur le béton. M. RÉMÉNIÉRAS donne les chiffres des divers essais de Monceau-la-Violle, et en tire la valeur de la rugosité ε de Nikuradse : celle-ci passe de 0,7 mm quand la galerie est propre à 1,7 mm quand les algues ont proliféré; la différence, soit 1 mm, pouvant être attribuée aux algues en vie dont les poils assez longs donneraient des pertes de charge plus grandes que celles qui pourraient être déduites de leurs dimensions purement géométriques. La suppression des enduits biologiques par l'emploi de peintures stérilisantes se heurte à des conditions de non-toxicité pour les poissons et pour les usagers de l'eau à l'aval. L'intérêt pratique de ces recherches se chiffre annuellement par des millions de kilowatts-heure et paye très largement le lavage des conduites pour lequel on pourrait d'ailleurs trouver des procédés plus rationnels que le travail manuel.

M. LARONDE confirme que l'enduit biologique est formé d'algues dont les poils rabattus quand la conduite est vide, lui donnent une apparence lisse, mais peuvent flotter dans l'eau et créer à la faveur de la turbulence, une ondulation de surface de l'enveloppe des extrémités des algues qui arriverait à produire un effet analogue à celui qu'on constate par les ondulations fixes. Une étude

(*) Les premières années ont pu être assez « lourdes », le terrain n'étant pas encore stabilisé. Ce fait semble confirmé par les puissances maxima atteintes, pour une cote de 495 à 495,50 au réservoir, soit :

9.900 kW à 10.000 kW en 1930 :	
Maximum de 1/4 d'heure, les 19 et 20 mai.....	10.100
9.300 kW en 1931 :	
Maximum de 1/4 d'heure, le 16 mai.....	9.500
9.100 kW en 1932 :	
Maximum de 1/4 d'heure, le 11 novembre.....	9.400

complémentaire d'une plaque mise artificiellement dans la conduite et transportée ensuite en canal vitré pourrait permettre de préciser l'évolution de ce phénomène en fonction de la vitesse de l'eau.

M. Christian BEAU s'est inquiété avec ses collaborateurs à l'*Energie des Mers*, de la perte de charge et même de l'obstruction qui pourraient être causées dans les longs tuyaux de prise d'eau des centrales thermiques en exploitation par les dépôts d'organismes sous-marins : algues, coquillages, etc... Les biologistes qui ont déjà étudié la question à propos des câbles sous-marins, croient savoir qu'à l'abri de la lumière (dans les grandes profondeurs sous-marines ou les conduites opaques) seules les espèces animales peuvent proliférer, ce qui semble en contradiction avec les constatations faites par les hydrauliciens dans les conduites forcées ou galeries. Cependant, les thermodynamiciens, qui ont éprouvé de semblables difficultés pour leurs prises d'eau en Seine, ont détruit

les micro-organismes par injection de chlore dans les puisards.

M. GAGE confirme l'emploi du chlore dans les centrales thermiques parisiennes et précise qu'il est injecté sporadiquement pendant une demi-heure toutes les huit heures; au bord de la mer dans certaines centrales thermiques, on tue les moules incrustées dans les conduites d'amenée par choc thermique, en inversant les circulations d'eau chaude et d'eau froide.

M. SCHLAG précise que l'augmentation de résistance de la conduite de Bevercé coûtait environ 640.000 kWh par an, soit, en valeur, la moitié du prix du nettoyage.

M. le Président conclut, d'après les commentaires, qu'il y aura probablement encore quelques expériences à faire pour préciser la nature de « l'enduit biologique », son influence sur les pertes de charge et les moyens de l'éliminer.

