RELEVÉS D'INTUMESCENCES DANS LES OUVRAGES D'AMENÉE ET DE RESTITUTION DE L'USINE DE KEMBS

par **M. P. BOURGUIGNON,**

Ingénieur des Arts et Manufactures,

Chef de la Division « Essais Extérieurs » du Service des Etudes et Recherches Hydrauliques d'Electricité de France.

(COMMUNICATION PRESENTÉE AU COMITÉ TECHNIQUE DE LA SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE
DE FRANCE DANS SA SÉANCE DU 24 NOVEMBRE 1947)

I. — OBJET DES ESSAIS

Les essais effectués les 2 mars et 15 mai 1947 avaient pour but de contrôler, à l'échelle grandeur, les connaissances actuelles relatives à la formation et à la propagation d'intumescences provoquées dans un canal par la variation brusque du débit.

Ils avaient été entrepris par l'Electricité de France en vue de l'étude de certaines basses chutes en projet, dont les canaux doivent être utilisés pour la navigation.

En raison de ses analogies avec les chutes en projet sur le Rhône et le Rhin, l'usine de Kembs a été choisie pour ces essais.

La planche n° 1 reproduit les principales caractéristiques de l'usine de Kembs.

Les ouvrages d'aménée se composent d'un canal, d'une longueur totale de 6 kilomètres, composé de deux tronçons. Le premier, commun à l'alimentation de l'usine et à la navigation sur le Rhin, est couramment appelé canal de navigation par les services d'exploitation; sa longueur est de 4 kilomètres. De section trapézoïdale, il a une largeur au plafond de 80 mètres en moyenne; ses berges ont un fruit de 3/1.

Le « canal de force » constitue le deuxième tronçon; il alimente exclusivement l'usine de Kembs. Sa largeur au plafond est de 40 mètres et sa longueur de 2 kilomètres. Ses berges ont un fruit de 2/1.

En dérivation avec ce dernier, le canal de navigation alimente le « garage amont », qui aboutit à deux écluses. A la sortie de ces dernières, le « garage aval » se raccorde au canal de fuite à 200 mètres environ à l'aval de l'usine et à une centaine de mètres en amont de la restitution dans le Rhin.

II. — CONDUITE DES ESSAIS ET JUSTIFICATION DES MÉTHODES EMPLOYÉES

1. — Emplacement et installation des appareils de mesure

Les moyens d'observation ont été surtout concentrés dans le canal d'aménée, qui, par ses caractéristiques géométriques simples et relativement régulières, pouvait se prêter à une bonne interprétation des résultats de mesure.

Deux limnigraphes et trois échelles limnimétriques y ont été installés, ainsi qu'on peut le constater sur la planche n° 1.

Les limnigraphes I_L et II_L enregistraient la cote du plan d'eau à l'entrée et à la sortie du canal de force. A titre de sécurité, une échelle limnimétrique I_E avait été aménagée en regard du limnigraphe I_L sur la rive gauche du canal.

Deux échelles limnimétriques IV_E et V_E per-

Fig. 1

mettaient de suivre la propagation des ondes dans le canal de navigation.

Le dispositif de mesure se complétait par un limnigraphe III_L installé sur la berge rive gauche du « garage amont ».

Cette disposition devait permettre de suivre l'évolution des intumescences dans l'ensemble des ouvrages d'amenée et d'étudier l'amortissement des ondes du fait des pertes de charge en section courante et de celles dues à la singularité créée par la bifurcation du canal de force et du garage amont.

Signalons enfin l'utilisation d'un puits de mesure monté sur une perche ovoïde maintenue

verticalement par câbles au milieu de la section transversale du canal de force au point kilométrique 5,95 en regard du limnigraphe I_L (figure 1). Les oscillations du flotteur installé dans ce puits de mesure étaient cinématographiées de la berge rive droite au moyen d'un appareil de prise de vues muni d'un téléobjectif. La comparaison des relevés ainsi obtenus et des résultats de l'enregistrement limnigraphique I_L devait mettre en évidence les différences éventuelles de forme ou d'importance entre les intumescences relevées dans l'axe du canal d'une part et sur la berge rive droite d'autre part.

La courte longueur du canal de fuite et la

Fig. 2

Installation des échelles et limnigraphes sur les ouvrages de dérivation de l'usine de Kembs

Schéma général d'installation des échelles et limnigraphes

sur le Rhin

PROFILS EN TRAVERS

Canal de force: Profil Km 5,750

Garage aval: Profil Km 5,885

Canal de force: Profil Km 4,950

Garage amont: Profil Km 5,000

Canal de navigation: Profil Km 3,650

Profil en long du fond du canal

trop grande proximité du raccordement avec le garage aval et le Rhin ne permettaient pas une étude détaillée de la formation des ondes provoquées par la décharge de l'usine.

Une seule échelle limnimétrique I_k avait été installée à 200 mètres à l'aval de l'usine, sur la rive gauche du canal de fuite. Un limnigraphe contrôlait les oscillations du plan d'eau dans le garage aval.

Sur le cours du Rhin, 3 limnigraphes et 5 échelles étaient utilisés pour les relevés. Les échelles limnimétriques étaient celles installées par le service de navigation sur la rive gauche du Rhin, entre l'usine de Kembs et Biesheim.

Les 3 limnigraphes avaient été répartis sur un tronçon de 15,7 kilomètres de longueur, et placés, autant que possible, en des points homologues de l'extrados des courbes du canal, de sorte que les intumescences soient aussi peu perturbées que possible, et d'une manière sensiblement analogue, par les épis de régularisation du cours.

Tous les postes de mesures étaient dotés d'un

chronomètre accordé avec la pendule-mère de l'usine.

2. — Installation des appareils de mesure

Les limnigraphes utilisés avaient été réalisés spécialement pour ces essais. Conçus pour assurer avec précision un enregistrement continu de longue durée, ils permettaient de suivre, à 0,5 cm. près, les fluctuations de la cote du plan d'eau pendant 2 heures consécutives.

La figure n° 2 représente les limnigraphes utilisés. Les mouvements du flotteur étaient transmis à une plume d'enregistrement, par l'intermédiaire d'un câble, d'une poulie double de réduction, et d'un contrepoids d'équilibrage en plomb. La bande de papier était entraînée à friction par un tambour, dont le mouvement était entretenu par deux contrepoids en plomb et régularisé par un moulinet Renard : elle était tendue sur une tablette d'aluminium sur laquelle se déplaçait la plume d'enregistrement. Un dispositif de clavetage permettait d'utiliser pour le déroulement du papier l'un des deux contre-

Fig. 3

pois. Celui qui n'était pas en service pouvait être remonté pendant la durée d'enregistrement.

Les flotteurs des limnigraphes évoluaient dans les puits de mesure constitués par des tubes en fonte galvanisée de 500 mm. de diamètre (figure 3).

L'inertie et le frottement dans ces puits étaient suffisamment faibles pour que les pulsations du plan d'eau soient enregistrées sans déformations appréciables (période propre de l'installation : 0,2 s). Ces puits de mesure avaient été fixés au moyen de potences en bois visibles sur la figure n° 3.

3. — Conditions de réalisation des essais

Les coupures de la charge étaient réalisées par l'ouverture simultanée des disjoncteurs de couplage des alternateurs de l'usine de Kembs.

Le rétablissement du débit était obtenu par

les vannes de décharge, commandées électriquement. Un observateur relevait, par turbine, le temps de fermeture des distributeurs depuis l'ouverture avant déclenchement jusqu'à celle correspondant à la marche à vide des groupes. Le déplacement des vannes de décharge était suivi par un observateur muni d'un chronomètre.

Quatre essais ont été réalisés en deux séries : les lois de variations de débit correspondantes sont rassemblées dans la planche n° 2, sous forme de graphiques donnant en fonction du temps le débit fourni par l'usine. L'aire des surfaces hachurées représente le volume emmagasiné dans le canal pendant l'interruption momentanée du débit.

Ces graphiques diffèrent par les valeurs absolues du débit permanent (450 m³/s. environ pour les deux premiers essais, 900 m³/s. pour les deux derniers essais), par le débit résiduel après coupure et par la rapidité d'action des vannes de décharge.

Diagrammes de fermeture des distributeurs et d'ouverture des vannes déversoirs

Planche n° 2

Lois de variations des débits au cours des décharges

La première série, effectuée en mars 1947 pour un débit de 450 m³/s.,⁽¹⁾ correspondant au minimum de navigabilité du Rhin, comporte deux essais se différenciant par la loi de rétablissement des débits. La comparaison des résultats de ces deux essais devait faire ressortir l'influence de la rapidité d'action des déchargeurs sur la valeur de l'intumescence. Dans ce but, on effectuait la fermeture complète des distributeurs de 4 turbines sur les 5 en exploitation.

Il y a lieu de signaler, en outre, la défaillance mécanique de notre appareil de prise de vues en cours de la première série d'essais. Par précaution, cet appareil, de format 16 mm., préalablement remis au point, a été doublé d'une caméra professionnelle de 36 mm. électrique pour la deuxième série d'essais.

Les derniers enregistrements photographiques obtenus étaient tous parfaitement réussis.

Les cinq déchargeurs disponibles de l'usine furent ouverts dès le début de la coupure effectuée au cours de l'essai n° 1 ; pour l'essai n° 2, trois déchargeurs seulement furent ouverts, l'un étant d'ailleurs arrêté après 30 secondes.

Pour les essais de la deuxième série, le débit du Rhin était voisin du maximum dérivé. Les conditions des essais 3 et 4 différaient par la valeur du débit résiduel après coupure ⁽²⁾ et par la rapidité d'action des déchargeurs.

La synchronisation des relevés était effectuée au moyen de chronomètres individuels, que chaque chef de poste comparait, avant et après chaque essai, à la pendule-mère de l'usine. De cette manière, l'erreur sur les temps d'observation n'excédait guère une à deux secondes pour les postes les plus proches de l'usine (canal d'amenée, canal de fuite, garage amont et aval) et 15 à 30 secondes pour les postes les plus éloignés (Rhin entre Kembs et Neu-Breisach).

Ce mode de synchronisation, rendu inévitable par suite de l'absence de moyens de liaisons rapides entre les postes de mesure et l'usine, ainsi que la nécessité de préciser à chaque observateur l'horaire des relevés quelques heures à l'avance, imposait un horaire fixe. Celui-ci nous était demandé, d'ailleurs, par le réseau, en raison de la répercussion d'une coupure brusque

de l'usine de Kembs dans une période de faible production électrique (dimanche).

De ce fait, et en raison d'un léger retard dans l'acheminement du personnel sur les lieux d'essais, il n'a pas été possible de remédier en temps utile à une défaillance des plumes des enregistreurs, due au froid intense qui sévissait le jour du premier essai ; les enregistrements limnographiques de cet essai ont dû être abandonnés pour les points les plus voisins de l'usine.

III. — PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS

A. — Caractéristiques des intumescences provoquées à l'amont de l'usine

Ainsi qu'on peut le voir sur les planches n° 3 à 6, ces intumescences, dont le front étalé ne pouvait être repéré par un observateur même averti, affectaient dans l'ensemble la forme d'un bourrelet dissymétrique, plus allongé vers l'aval.

Elles étaient suivies d'oscillations résiduelles, de période sensiblement constante. Ces dernières étaient engendrées surtout par les réflexions successives dans la bifurcation, le garage amont et le canal de force ; un certain balancement transversal du plan d'eau, mis en évidence par les relevés effectués sur les deux rives du canal de force au point kilométrique 5,750, contribuait aussi à leur entretien. Par suite de l'extrême faiblesse des pertes de charge dans les canaux d'amenée, ces oscillations résiduelles, peu amorties, étaient encore sensibles une heure après le passage de la première intumescence.

1. — Vitesse de propagation des intumescences

Les vitesses de propagation des intumescences, déduites des relevés, sont rassemblées dans le tableau n° 1 où figurent, à titre de comparaison, les vitesses calculées à partir des caractéristiques géométriques des ouvrages par les relations de BOUSSINESQ :

$$\Omega = V \pm \sqrt{gH} \left[1 + \left(1 - \frac{2}{3} \frac{H}{L} \right) \frac{3}{4} \frac{h'}{H} \right]$$

et $\Omega = (L + \frac{2}{3} h') \frac{h'}{H} = \Delta Q$

avec

- Ω : Vitesse de propagation des intumescences en m/s.
- V : Vitesse moyenne de l'eau dans le régime permanent précédant la formation de l'intumescence en m/s.

(1) Les essais étaient effectués à 6 heures d'intervalle. De ce fait, il n'était pas possible d'obtenir rigoureusement le même débit au cours des deux essais (486 m³/s. pour l'essai n° 1 et 444 m³/s. pour l'essai n° 2).

(2) Afin de réduire celui-ci, les distributeurs des turbines ont été entièrement fermés au cours de l'essai n° 4. Pour les autres essais, cette fermeture était limitée à celle réalisée en exploitation normale et correspondant à la marche à vide des groupes.

- H : Profondeur moyenne de l'eau $\frac{\sigma}{L}$ en m.
- σ : Aire de la surface mouillée en m².
- $\mathcal{T}$: Cotangente de l'angle formé à fleur d'eau par les parois du canal avec l'horizontale.
- h' : Hauteur moyenne de l'onde de tête en m.
- ΔQ : Variation instantanée du débit en m³/s.
- L : Largeur du plan d'eau en m.

TABLEAU N° 1

**Vitesse de propagation des intumescences
dans les canaux d'amenée de l'usine**

		Unités	N°s des essais		
			1	2	3
— Vitesse de propagation dans le canal de force	mesurée	m/s	9,42	9,08	9,22
	calculée	m/s	9,26	9,15	9,02
— Vitesse de propagation dans le canal de navigation	mesurée	m/s	9,10	9,10	8,70
	calculée	m/s	9,23	8,96	8,95

En moyenne, l'écart est de 1 % entre les vitesses mesurées et celles déduites du calcul. Dans le canal de navigation, où les relevés étaient effectués au moyen d'échelles limnimétriques, l'écart maximum est de 2,5 % ; il est de 1,5 % dans le canal de force où les limni-graphes étaient utilisés pour les relevés.

Les vitesses de propagation étaient pratiquement les mêmes au cours des 4 essais. La formule de BOUSSINESQ montre que cela est dû à l'importance prépondérante du tirant d'eau dans la détermination des vitesses de propagation des intumescences ; par suite de la faible pente hydraulique du canal d'amenée de l'usine de Kembs, ce tirant d'eau ne dépend pratiquement que de la cote de retenue fixée par l'usine.

2. — Hauteur maximum du corps de l'intumescence moyenne

Dans les planches n°s 7, 8 et 9 ont été reproduits, avec une plus grande échelle de temps, les débuts des enregistrements obtenus dans les ouvrages d'amenée ; nous y avons tracé en traits discontinus les intumescences moyennes obtenues en faisant abstraction des ondes secondaires qui s'y superposent.

Les hauteurs maxima de ces intumescences moyennes sont rassemblées dans le tableau n° 2.

TABLEAU N° 2

**Hauteur moyenne maximum des intumescences
provoquées dans les canaux d'amenée par
la réduction brusque du débit**

	Unités	N°s des essais			
		1	2	3	4
Haut. maximum au point:					
5.750 { canal de force ..	m	0,40	0,33	0,70	0,78
4.950 { ..	m	—	0,36	0,70	0,75
5.800 { garage amont	m	—	0,21	0,35	—
3.800 { canal de navi- ..	m	0,12	0,15	0,30	0,35
1.000 { gation	m	0,12	0,15	0,30	0,35
Haut. dans le canal de force déduite du calcul ...	m	0,41	0,36	0,59	0,32

Il est intéressant de comparer ces hauteurs à celles que l'on peut déduire des formules de BOUSSINESQ, établies dans l'hypothèse d'une fermeture totale ou partielle non suivie d'un rétablissement du débit initial. Pour le canal de force, qui se prête à ce calcul, on peut noter la bonne concordance entre les relevés et le calcul.

Les hauteurs relevées sont toutefois très légèrement inférieures (de moins de 4 % en moyenne) à celles déduites du calcul ; la raison doit en être recherchée dans l'indétermination du tracé de l'intumescence moyenne, par suite de l'irrégularité des oscillations secondaires et dans la difficulté de l'extrapolation de cette courbe au voisinage de l'origine des intumescences. L'essai n° 3 fait exception à cette règle. Les valeurs mesurées dans les deux sections du canal de force dépassent de près de 20 % les hauteurs calculées. Peut-être doit-on trouver la cause de cette anomalie dans le fonctionnement irrégulier du régulateur de l'un des groupes ou dans le fait d'une fermeture plus complète des distributeurs des turbines.

Le tableau précédent montre en outre que l'amortissement des intumescences en fonction de la distance parcourue est minime ; dans les 800 mètres en alignement droit du canal de force, la hauteur maximum de l'intumescence moyenne reste sensiblement constante. Il en est de même pour les 2 kilomètres du canal de navigation. Cela provient sans doute de l'extrême faiblesse des pertes de charge des canaux d'amenée.

Le front de l'intumescence s'adoucit légèrement en se propageant vers l'amont, ainsi que le montre le tableau n° 3. Un résultat analogue avait été observé sur le modèle réduit du canal

Fig. 4. — Comparaison des fluctuations du plan d'eau sur les berges et sur l'axe du canal.

de Donzère-Mondragon étudié au Laboratoire de Beauvert de la Sté Hydrotechnique de France, lorsque la pente correspondant à la loi de réduction du débit était supérieure à celle de l'onde solitaire de même amplitude maximum :

TABLEAU N° 3

Pente du front de l'intumescence provoquée par la réduction brusque du débit

	Unités	N°s des essais		
		1	2	3
Pente maximum du front d'ondes :				
au point : 57,00	cm/m	13,3	22,8	33,0
au point : 49,00	cm/m	8,7	20,0	31,0
Pente théorique de l'onde solitaire de la même hauteur	cm/m	4,1	10,9	14,7

Ainsi que nous l'avons exposé dans la première partie du présent compte rendu, il pouvait paraître intéressant de comparer les fluctuations du plan d'eau mesurées sur les berges du canal

à celles qui se manifestaient suivant l'axe de ce dernier. D'après la figure n° 4, les intumescences moyennes sont identiques en ces deux points ; seules, les oscillations secondaires sont plus accusées sur les rives.

3. — Caractéristiques des ondes secondaires

Les ondes secondaires relevées au cours de nos essais présentent de nombreuses analogies (3) avec celles qui ont été observées dans de nombreux essais sur modèle réduit. En particulier,

Caractéristiques des ondes secondaires. — Hauteur relative $h^{\star \max}$

de la crête la plus élevée des ondulations constituant la tête d'une onde positive, en fonction de la hauteur moyenne relative $\frac{h'}{H}$ de cette tête.

Longueur d'onde relative $\frac{e}{H}$ des ondulations constituant la tête d'une intumescence positive, en fonction de la hauteur moyenne relative h'/H de cette tête.

Fig. 5

(3) Il y a lieu de constater que les oscillations secondaires se caractérisent par une distribution très régulière, de période constante.

leur longueur d'onde est sensiblement constante au cours d'un essai. Il nous a paru intéressant de comparer leurs caractéristiques à celles mentionnées par M. FAVRE, dans son ouvrage : « Etude théorique et expérimentale des ondes de translation dans les canaux découverts ».

En désignant par :

h_m : la hauteur de la crête la plus élevée des ondulations se superposant à la tête d'une intumescence positive.

e : la longueur d'onde.

h' : la hauteur du corps de l'intumescence.

M. FAVRE a caractérisé ces ondulations secondaires par leur « amplitude relative » $\frac{h_m}{h'}$

et leur « longueur d'onde relative » $\frac{e}{h'}$. Il a

montré que ces deux paramètres étaient des fonctions bien déterminées de « l'intumescence moyenne relative » $\frac{H}{H}$ (en désignant par H

le tirant d'eau moyen) lorsque la vitesse moyenne de l'eau précédant l'arrivée de l'intumescence était nulle. Les courbes correspondant à ces fonctions, ainsi que les points expérimentaux résultant de nos relevés, sont reproduits dans la figure n° 5.

Bien que la condition de l'état de repos initial n'ait pas été réalisée au cours de nos essais, les paramètres caractéristiques déduits de nos relevés se placent très approximativement sur les courbes de M. FAVRE ainsi que l'on peut le constater sur la figure n° 5.

Une concordance analogue avait été observée au Laboratoire de Beauvert de la Sté Hydrotechnique de France sur le modèle réduit du canal d'amenée de l'usine de Donzère-Mondragon, au cours d'essais effectués dans des conditions voisines de celles réalisées à Kembs ; cela tendrait à montrer que, dans une certaine mesure, les fonctions reliant les paramètres caractéristiques des ondes secondaires à la hauteur relative de l'intumescence restent valables quelles que soient les conditions de l'écoulement initial avant perturbation.

Sous réserve de vérification ultérieure de cette hypothèse, il serait facile de prédéterminer la pente hydraulique et le gradient de montée du plan d'eau au cours du passage de l'intumes-

cence, dont les valeurs sont reproduites dans le tableau suivant :

TABLEAU N° 4
Pente hydraulique et gradient de montée
du plan d'eau au cours du passage
de l'intumescence

	Unités	N°s des essais		
		1	2	3
Canal de navigation :				
$\frac{dx}{dh}$ max.	cm/s	5,5	6,8	6,0
$\frac{dx}{dh}$ max.	%	0,5	0,7	0,7
Garage amont :				
$\frac{dx}{dh}$ max.	cm/s	0,3	—	0,3
$\frac{dx}{dh}$ max.	%	0,04	—	0,04
$\frac{dt}{dt}$ max.				

Les pentes sont particulièrement faibles ; elles ne sont guère sensibles que pour les péniches stationnant dans le garage amont dans l'attente de l'écluse. On a pu constater au cours de l'essai n° 3 que les péniches bloquées dans le garage, mais non ancrées, étaient animées de translations alternatives d'une amplitude de 3 mètres environ.

4. — Influence de la loi de rétablissement du débit

Ainsi que nous l'avons constaté, la hauteur maximum des intumescences moyennes relevées est pratiquement égale à la valeur obtenue par le calcul dans le cas d'une disjonction brusque sans rétablissement immédiat du débit.

On retrouve donc bien là un résultat déjà constaté à l'occasion des essais sur modèles réduits de l'usine de Donzère-Mondragon au Laboratoire de Beauvert, de la Sté Hydrotechnique de France.

La loi de rétablissement du débit n'intervient en fait que dans les hauteurs maxima de l'intumescence moyenne et que par la réduction qu'elle apporte au débit effectivement interrompu.

Entre les essais 1 et 2 par exemple, les gradients de rétablissement du débit variaient du simple au double ; les débits effectivement interrompus, ramenés à un même débit initial, ne

différait cependant que de 10 m³/s., soit de moins de 3 %. La mise en route des vannes de décharge après la fermeture complète des turbines n'augmenterait guère la hauteur de l'intumescence de plus de 10 %.

La loi de rétablissement des débits influe par contre d'une manière sensible sur la durée de passage du corps de l'onde de tête. On peut vérifier en effet que le volume déterminé par la hauteur moyenne de l'intumescence est sensiblement égal à celui correspondant à l'interruption momentanée (aires hachurées sur le graphique de la planche n° 1) du débit de l'usine, ainsi que cela est indiqué dans le tableau suivant :

TABLEAU N° 5

Volume de la tranche d'eau correspondant à l'interruption momentanée du débit

	Unités	Numéros des essais			
		1	2	3	4
Volume réellement emmagasiné (aire du diagramme $Q = f(t)$)	m ³	12.000	25.000	54.800	60.000
Volume déduit des relevés d'intumescences	m ³	15.000	26.000	56.500	57.000

B. — Relevés des intumescences à l'aval de l'usine

La complexité des ouvrages existant à la sortie de l'usine (jonction du garage aval et du Rhin avec le canal de fuite relativement court et présentant une courbe sensible) ne permettait pas de comparer utilement les résultats obtenus au cours de nos essais avec ceux déduits des études analytiques et pratiques effectuées jusqu'à ce jour.

1. — Intumescences relevées dans le canal de fuite et dans le garage aval

L'onde négative de faible pente, due à la fermeture des distributeurs, est visible sur les planches n°s 10 à 13 ; elle est suivie d'une onde positive à laquelle se superposent les oscillations secondaires déjà observées dans les ouvrages d'amont.

Les hauteurs maxima relevées au cours des quatre essais sont reproduites dans le tableau suivant :

TABLEAU N° 6

Hauteurs maxima des intumescences dans le canal de fuite et dans le garage aval

	Unités	N°s des essais			
		1	2	3	4
Echelle I E et canal de fuite	m	0,2	0,33	0,39	0,42
Limnigraphe II L et garage aval	m	—	0,28	0,52	0,58

Les intumescences mesurées dans le garage aval ont des hauteurs compatibles avec celles déduites des équations de BOUSSINESQ, compte tenu de l'influence de la bifurcation du canal aval avec le canal de fuite ; ces relations, appliquées immédiatement à la sortie de l'usine, conduiraient à des hauteurs d'intumescences supérieures de 50 % environ à celles mesurées dans le garage aval.

Les intumescences relevées au débouché du canal de fuite dans le Rhin paraissent moins cohérentes. Leur variation en fonction du débit est inégale. En particulier, la hauteur de 0,40 m. relevée au cours de l'essai n° 4 pour une décharge de 710 m³/s., paraît faible par rapport à celle de 0,29 m. correspondant aux 485 m³/s. interrompus au cours de l'essai n° 3.

L'influence du temps de rétablissement des débits se manifeste surtout dans la forme de l'onde de tête.

Compte tenu du manque de cohérence apparent des relevés effectués à la sortie du canal de fuite au cours des essais 3 et 4, il serait peu prudent de prétendre que l'écart de 0,13 m. sur les hauteurs mesurées au cours des essais 1 et 2 est dû à la différence de temps de rétablissement du débit.

De toute manière, pour le tirant d'eau correspondant à la limite inférieure de navigabilité du Rhin (485 m³/s.), la fermeture des turbines de l'usine de Kembs entraîne une baisse instantanée du plan d'eau inférieure à 0,35 m. dans le tronçon aval navigable du Rhin. Des ondes plus importantes sont créées par le passage de certaines péniches ; le risque de « talonnement » de ces dernières, par suite de déclenchement de l'usine, ne paraît donc pas à craindre.

La pente instantanée et la vitesse de montée du plan d'eau sont plus faibles encore que dans les ouvrages amont.

La vitesse maximum d'ascension ressort à 0,03 m/s. La pente instantanée est inférieure à 0,06 %, soit 0,6 mm/m.

2. — Relevés dans le Rhin

Dès l'entrée dans le cours du Rhin, l'onde positive observée dans le canal de fuite est déjà disparue, et les intumescences se caractérisent par des ondes très étalées dont la hauteur décroît progressivement vers l'aval.

Le temps total de passage de l'intumescence ainsi déformée atteint une heure trente à 19,5 km. à l'aval de l'usine.

La hauteur maximum du corps de l'onde décroît très lentement au fur et à mesure que l'on descend le cours du Rhin. A 20 km. à l'aval de l'usine, elle représente encore près des 2/3 de celle mesurée au débouché du canal de fuite; l'intumescence est encore sensible (5 cm.) à l'échelle 10 e située à 45 km. de l'usine.

Les enregistrements relatifs aux essais n°s 3 et 4 comportent quelques accidents provoqués par le passage de péniches. On peut se rendre compte que les dénivellations correspondantes sont bien supérieures à celles résultant de la fermeture brusque des turbines de l'usine de Kembs.

RESUME ET CONCLUSION

Les quatre intumescences produites dans les ouvrages de l'usine de Kembs diffèrent à la fois par l'importance du débit interrompu et par la durée du rétablissement.

Les relevés obtenus dans les canaux d'amenée confirment avec une bonne approximation, les résultats des études théoriques et expérimentales effectuées jusqu'à ce jour.

- les vitesses de propagation et les hauteurs maxima des intumescences moyennes obéissent aux relations de BOUSSINESQ.
- les caractéristiques principales des ondulations secondaires concordent avec celles déduites des expériences de M. FAVRE.
- la légère diminution de la pente du front des intumescences au cours de leur propagation paraît confirmer les observations du Laboratoire de Beauvert de la Sté Hydrotechnique de France, ainsi que l'hypothèse de la tendance du front de l'intumescence vers le profil de l'onde solitaire.
- la réduction de la hauteur des intumescences par l'action des vannes de décharge n'intervient pratiquement que par la diminution du débit effectivement interrompu.

Les relevés obtenus à la sortie de l'usine ont une allure analogue à ceux observés dans différents modèles réduits. Toutefois, la complexité du raccordement du canal de fuite, du garage aval et du Rhin n'autorise pas une interprétation bien précise.

D'une manière générale, la pente instantanée et la vitesse ascensionnelle du plan d'eau sont faibles dans les canaux empruntés par la navigation. Dans le garage aval et dans le Rhin, en particulier, la décharge brusque de l'usine engendre des dénivellations notablement inférieures à celles provoquées par le passage de certaines péniches.

Variations du plan d'eau en fonction du temps.

Variations du plan d'eau en fonction du temps

Variations du plan d'eau en fonction du temps.

8h 05 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 9h 05 10 15 20 25 30

Zo: Cote du plan d'eau avant décharge de l'usine

Temps en heures et minutes

Variations du plan d'eau en fonction du temps

Zo: Cote du plan d'eau avant décharge de l'usine

Planche n° 6
Enregistrement des intumescences dans les ouvrages d'amont — Essai n° 4

Limnigraphe N° I_L Km 5,750

Limnigraphe N° II_L Km 4,950

Limnigraphe N° III_L Km 5,150

Limnigraphe N° 2 Km 5,800

Planche n° 7
Détails des débuts d'enregistrement - Essai n° 2 (suite)

Limnigraphe N° I Km 5,750

Limnigraphe N° II Km 4,950

Planche n° 8
Détails des débuts d'enregistrement - Essai n° 3

Planche n° 8
Détails des débuts d'enregistrement — Essai n° 3 (suite)

Planche n° 9
Détails des débuts d'enregistrement - Essai n° 4

Limnigraphe N° I, Km 5,750 Limnigraphe N° II, Km 4,950

Planche n° 9

Détails des débuts d'enregistrement — Essai n° 4 (suite)

Variations du plan d'eau en fonction du temps

Planche n° 10

Intumescences relevées à l'aval de l'usine — Essai n° 1

Variations du plan d'eau en fonction du temps

Planche n° 11

Intumescences relevées à l'aval de l'usine — Essai n° 2

Variations du plan d'eau en fonction du temps

Planche n° 12
Intumescences relevées à l'aval de l'usine — Essai n° 3

Variations du plan d'eau en fonction du temps

Planche n° 13

Intumescences relevées à l'aval de l'usine — Essai n° 4