

Influence du mouillage dans le sas d'une écluse et de la présence de bassins d'épargne sur la durée d'éclusage

The effect of lock-chamber water depth and water-saving basins on lock-operating time

J. Michel

Compagnie Nationale du Rhône

Introduction

La capacité de transport d'une voie navigable comportant des écluses est, parmi d'autres paramètres, fonction du nombre d'éclusages journaliers. Celui-ci dépend du temps de fonctionnement quotidien de la voie et de la durée du cycle d'éclusage.

Ainsi, la réduction de la durée du cycle permet d'accroître les possibilités de transport d'une voie navigable.

La figure 1 montre la décomposition du cycle de fonctionnement des écluses du Rhône, d'une durée moyenne de 50 minutes.

Toutefois, les écluses du Rhône étant toutes accolées à une usine hydro-électrique, les biefs adjacents ont une section transversale importante qui conduit à rendre négligeable l'influence du débit d'échange entre le sas et les biefs. Les opérations de remplissage et de vidange sont dans ce cas assez rapides d'autant qu'il n'existe aucune contrainte sur la consommation en eau.

Ce n'est pas le cas de la future liaison Saône-Rhin dont plusieurs biefs sont définis uniquement pour la navigation et dont le déficit de l'alimentation en eau du bief de partage, conduit à prévoir des bassins d'épargne

pour certaines écluses. Il convient alors d'examiner soigneusement chacune des opérations élémentaires pour obtenir la durée du cycle la plus faible possible.

S'il paraît difficile de réduire le temps de manœuvre des portes, il y aura par contre intérêt à adopter un dimensionnement raisonnable de l'écluse qui permette d'une part de minimiser le remplissage et la vidange du sas et d'autre part de faciliter la manœuvre des bateaux.

Remplissage et vidange du sas

La figure 2 montre le principe des échanges d'eau entre le sas, les bassins d'épargne et les biefs adjacents. Dans ce cas, l'économie d'eau représente la moitié du volume du sas lorsque les bassins d'épargne ont la même surface que celui-ci et que les manœuvres de vannes se font à égalité de niveaux entre les divers plans d'eau. Avec ces mêmes hypothèses, le coefficient d'économie pour n bassins vaut : $n/(n + 2)$.

Dans la pratique, il est illogique de prévoir plus de trois bassins d'épargne, car si les échanges entre sas et bassins peuvent être plus rapides qu'entre sas et biefs adjacents, au-delà de trois bassins, le temps de manœuvre des vannes pénalise la durée totale de l'opération.

OPÉRATIONS	TEMPS en mn.
2 ENTRÉES + 2 SORTIES DE BATEAUX :	28
2 OUVERTURES + 2 FERMETURES DE PORTES :	8
REPLISSAGE + VIDANGE DU SAS :	14
DURÉE DU CYCLE	50

Durée moyenne du cycle des écluses du Rhône

Figure 1. — Ecluses du Rhône.

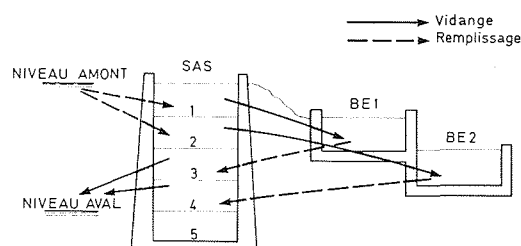


Figure 2. — Ecluse à deux bassins d'épargne.

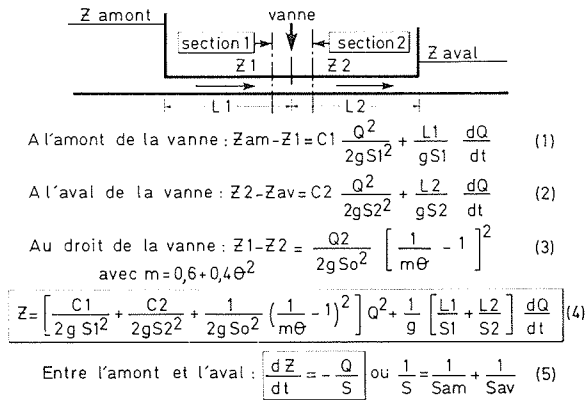


Figure 3. – Equations de base.

Equations – Résolution

La figure 3 montre deux plans d'eau communiquant par un aqueduc commandé par une vanne.

L'application de l'équation fondamentale de la mécanique au tronçon compris entre le plan d'eau amont et l'amont immédiat de la vanne, conduit à la relation (1) de la figure 3. On obtient une relation similaire (2) pour le tronçon aval de la vanne, la section 2 étant située après le ressaut noyé. Par ailleurs, la perte de charge au droit de la vanne peut être représentée par l'expression (3).

L'addition de ces trois relations conduit à l'équation (4), avec :

Z_{av}, Z_2 : niveaux piézométriques

$$Z = Z_{am} - Z_{av}$$

- C_1 coefficient de pertes de charge linéaire du tronçon 1
- L_1 longueur du tronçon d'aqueduc 1
- S_1 section de l'aqueduc en amont de la vanne
- Q débit
- g accélération de la pesanteur
- S_0 surface totale de la vanne
- σ coefficient d'ouverture de la vanne
- m $0,6 + 0,4 \sigma^2$: coefficient de contraction

Les variations de niveau des plans d'eau amont et aval peuvent s'exprimer par l'équation (5).

Naturellement, si un des plans d'eau est un bief, la surface correspondante S_{am} ou S_{av} est infinie.

Ainsi, l'étude des échanges d'eau entre deux bassins communiquant par un aqueduc avec une vanne, conduit à la résolution d'un système de deux équations différentielles du premier ordre. Dans le cas d'une écluse, ce système doit être résolu pour déterminer l'échange d'eau entre le sas et l'un des biefs et le cas échéant, entre le sas et le ou les bassins d'épargne.

L'intégration de ce système d'équations différentielles a été réalisée selon une méthode numérique à l'aide d'un modèle mathématique.

Les contraintes

Dans la pratique, le remplissage et la vidange du sas ainsi que le dimensionnement des ouvrages correspondants doivent être réalisés avec le souci de l'économie

du projet et de la sécurité de la navigation. Dans ce cadre là, il convient d'adapter les divers paramètres pour :

- minimiser la section des vannes et des aqueducs ;
- aboutir à des manœuvres de vannes séquentielles selon des lois linéaires les plus simples possibles ;
- ne pas créer d'ondes supérieures à 0,30 m de hauteur dans les biefs adjacents ;
- ne pas dépasser 1/1 000^e comme pente de la surface libre dans les biefs ;
- limiter à 4,90 m/mn la vitesse maximale d'évolution du plan d'eau dans le sas, valeur observée à l'écluse de Bollène qui correspond à un débit d'échange de 190 m³/s environ ;
- obtenir naturellement un temps de vidange ou de remplissage du sas le plus faible possible malgré les contraintes ci-dessus.

A celles-ci il convient d'ajouter le problème de la dissipation de l'énergie résiduelle de l'écoulement lors du remplissage du sas qui peut conduire à des efforts importants dans les amarres, surtout si l'alimentation du sas n'est pas répartie. Une étude sur modèle réduit est généralement nécessaire pour fixer une loi de remplissage convenable.

Examen des résultats

Plusieurs combinaisons "hauteur de chute – nombre de bassins d'épargne" ont été étudiées. Parmi celles-ci il est intéressant de s'attarder sur certaines d'entre elles, qui correspondent à des configurations d'écluses de la future liaison Saône-Rhin.

Il convient de préciser que c'est l'écluse la plus haute qui peut conduire aux valeurs extrêmes pour certains des paramètres cités auparavant. La durée du remplissage ou de la vidange sera alors plus difficile à minimiser.

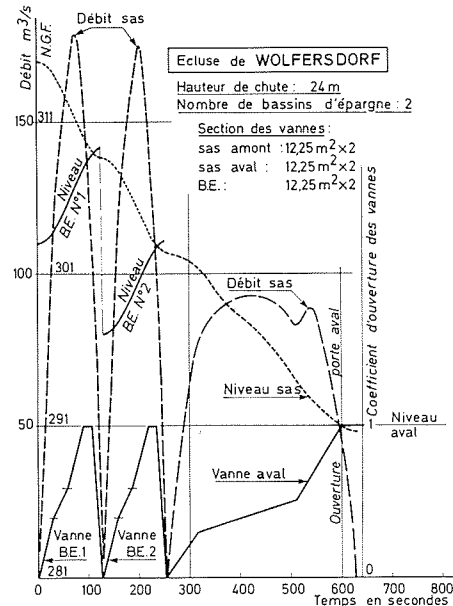


Figure 4. – Vidange.

La figure 4 présente la vidange d'une écluse de 24 m "type Wolfersdorf", comportant deux bassins d'épargne. On observe que :

- le débit d'échange entre le sas et les deux bassins atteint pratiquement $190 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à la vitesse limite de mouvement du plan d'eau dans le sas de $4,90 \text{ m/mn}$. Si en vidange du sas cela n'apporte aucune gêne, il convient par contre, au remplissage, de veiller aux turbulences créées par un débit aussi élevé ;
- le débit d'échange entre le sas et le bief aval est de l'ordre de $90 \text{ m}^3/\text{s}$. Cela permet ainsi de limiter les hauteurs d'ondes dans les biefs ;
- les lois de manœuvre des vannes obtenues sont effectivement simples. Elles ne comportent que deux vitesses différentes à l'ouverture ;
- l'évolution du niveau dans le sas, comme dans les bassins d'épargne, est régulière et met en évidence les phénomènes de survidange (ou de surremplissage) ;
- il semble difficile pour une écluse aussi haute, implantée sur un canal dimensionné uniquement pour la navigation, de descendre en-dessous de 10 minutes pour la vidange et le remplissage du sas.

De la même façon, la figure 5 montre le remplissage d'une écluse de $14,50 \text{ m}$ "type Laperrière" avec un bassin d'épargne. La durée totale du remplissage est de 10 minutes.

Les coefficients de pertes de charge des aqueducs ont été établis en se référant au fonctionnement de l'écluse de Caderousse, en service sur le Rhône depuis 1975. En effet, la chute réduite de l'écluse de Laperrière correspond à celle de Caderousse, de sorte que les ouvrages d'alimentation et de vidange du sas présentent une très grande analogie entre eux.

De plus, pour limiter les turbulences dans le sas au début du remplissage, lorsque la profondeur d'eau n'y est pas encore importante, c'est la même loi de débit initiale qui a été adoptée pour la vidange du bassin d'épargne.

La figure 6 montre le remplissage de l'écluse de Laissey de 12 m de chute sans bassin d'épargne. Cette opération peut être effectuée en 6,5 minutes tout en

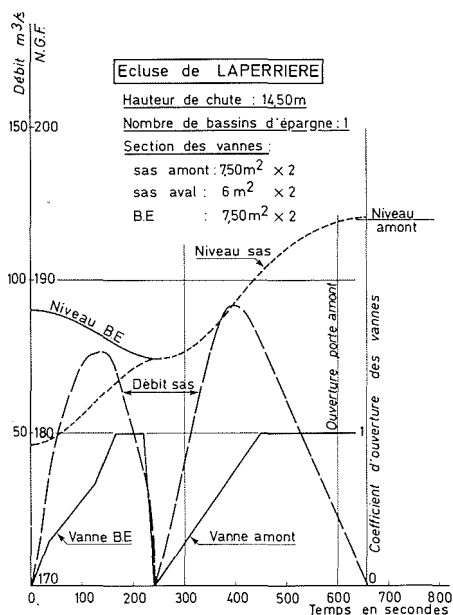


Figure 5. - Remplissage.

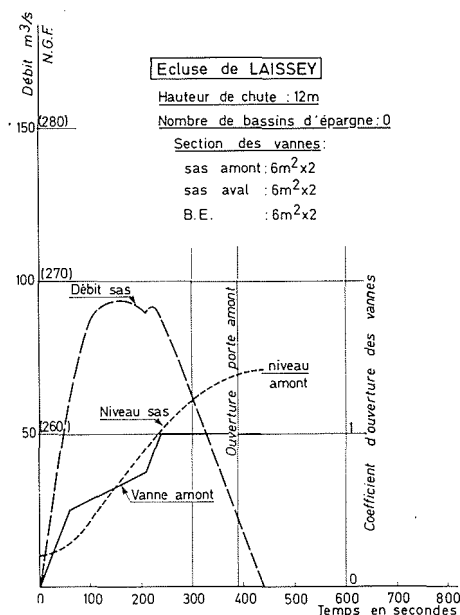


Figure 6. - Remplissage.

respectant les limites indiquées plus haut. Il est évident qu'une autre loi de manœuvre des vannes permettrait de retrouver la durée de 10 minutes pour cette opération. Toutefois, la possibilité de réaliser plus rapidement le remplissage, et donc la vidange, sera intéressante pour essayer d'homogénéiser les durées de cycle de fonctionnement des écluses comme on va le voir plus loin.

Ainsi, ces trois exemples montrent qu'il est possible d'effectuer le remplissage et la vidange d'écluses jusqu'à 25 mètres de chute environ avec au plus trois bassins d'épargne, en 10 minutes au maximum.

La manœuvre des convois

La manœuvre des convois dans le sas et aux abords des écluses a été examinée sur un modèle réduit à l'échelle du $1/50^e$, réalisé dans le laboratoire d'hydraulique de la Compagnie Nationale du Rhône.

Les convois représentés se composent de deux barges en flèche, et d'un pousseur. La longueur totale du convoi est de 183 m et son enfoncement maximal est de $4,00 \text{ m}$.

Caractéristiques des essais

Chaque essai a été réalisé à puissance délivrée constante au moteur du pousseur. Durant le déplacement du convoi, différents paramètres ont été suivis et enregistrés de façon continue, notamment :

- la vitesse d'évolution du convoi sur l'ensemble du parcours du sas et des 250 m de bief après la tête de l'écluse qui représentent la distance nécessaire à la manœuvre d'un convoi venant en sens inverse ;
- le temps de parcours du "sas" et des 250 m de "bief" ;
- le pied de pilote dynamique, qui représente la distance entre le fond du bateau et le fond du canal ;
- l'évolution du plan d'eau dans le sas et dans le bief.

Ces essais ont été effectués par l'amont ou par l'aval des écluses en faisant varier :

- la puissance d'alimentation du moteur du pousseur ;
- le mouillage sur le seuil aval, compris entre 3 m et 5,50 m
- le mouillage sur le seuil amont compris entre 5,50 m et 9,00 m ;
- l'enfoncement du convoi, compris entre 1,20 m et 4,00 m lorsque le mouillage le permettait ;
- la hauteur de chute à l'écluse dans le cas des manœuvres par l'amont ; trois valeurs ont été examinées : 7,00-12,00 m et 25,00 m.

Manœuvres par l'aval

De toutes les manœuvres d'un convoi dans une écluse, c'est la sortie du sas par l'aval qui risque de présenter le plus de difficultés. En effet, il règne une section réduite sur toute la longueur du bateau, et l'abaissement de la poupe provoqué par l'écoulement du courant de retour vient aggraver le déficit en eau de la zone située en arrière du convoi.

La figure 7 présente l'abaissement de l'arrière du convoi pour plusieurs combinaisons "mouillage-enfoncement", en fonction de la vitesse moyenne de sortie du sas. A l'enfoncement de 4,00 m, on notera que le talonnage de l'arrière du bateau n'est pas à écarter même avec un mouillage au repos de 5,50 m ; le temps de sortie est cependant inférieur à 6 minutes. L'abaissement n'est que de 0,35 m pour un temps de sortie de 8 minutes avec les mêmes paramètres. Pour les enfoncements inférieurs à 4,00 m, l'abaissement de la poupe reste très faible aux vitesses usuelles.

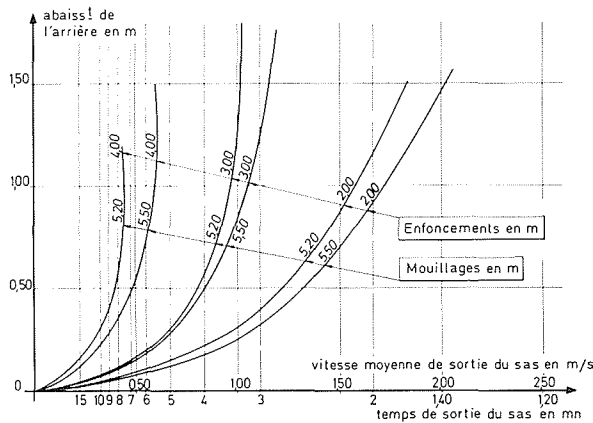


Figure 7. - Sortie d'un convoi par l'aval d'une écluse.

L'abaque de la figure 8 montre l'évolution du pied de pilote dynamique minimal et du temps de manœuvre qui correspond au temps de sortie du sas et du parcours des 250 m aval, en fonction du mouillage aval pour une puissance donnée du moteur, voisine de la puissance maximale. On voit ainsi, par exemple, qu'un convoi à l'enfoncement de trois mètres effectue la sortie complète d'une écluse présentant un mouillage de 4,20 m, en 8 minutes environ ; son pied de pilote se réduit à 0,15 m seulement. Cet abaque montre également que pour respecter ce temps de 8 minutes pour la sortie d'un

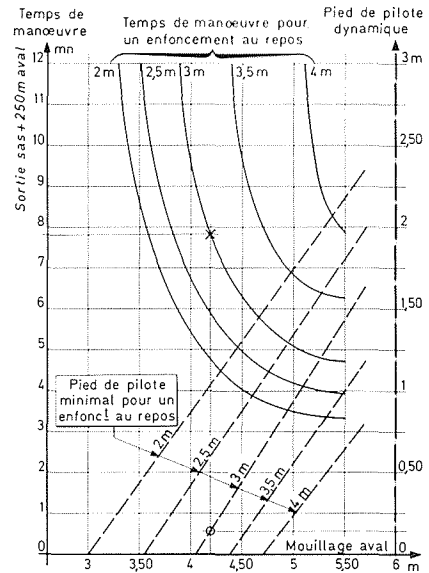


Figure 8. - Sortie d'un convoi par l'aval d'une écluse.

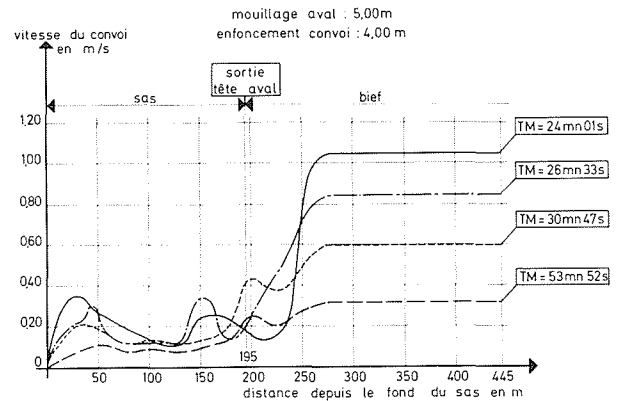


Figure 9. - Sortie d'un convoi par l'aval d'une écluse.

convoi à l'enfoncement de 4 m, il faut que le mouillage soit de 5,50 m environ.

La figure 9 présente l'évolution de la vitesse d'un convoi à l'enfoncement de 4 m durant toute la manœuvre de sortie du sas, pour 4 puissances d'alimentation différentes du pousseur, le mouillage à l'écluse étant de 5 m. Le temps de manœuvre minimal obtenu est ainsi de 24 minutes, la vitesse moyenne de sortie du sas seul étant inférieure à 0,20 m/s. Ainsi, pour un trafic de convois de 4,00 m d'enfoncement, ce mouillage de 5 m semble donc être une limite en-dessous de laquelle il n'est pas raisonnable de descendre.

Il n'y a aucun risque de talonnage lors de l'entrée d'un convoi par l'aval. Par contre, la manœuvre est compliquée du fait de la marge réduite offerte au bateau (183 m contre 185 m pour le sas). Néanmoins, avec le mouillage de 5,50 m, l'entrée d'un convoi par l'aval à l'enfoncement de 4 m peut être réalisée en moins de 8 minutes.

Manœuvres par l'amont

Les essais ont montré que la hauteur de chute d'une écluse n'influence absolument pas le temps d'entrée ou de sortie du sas par l'amont.

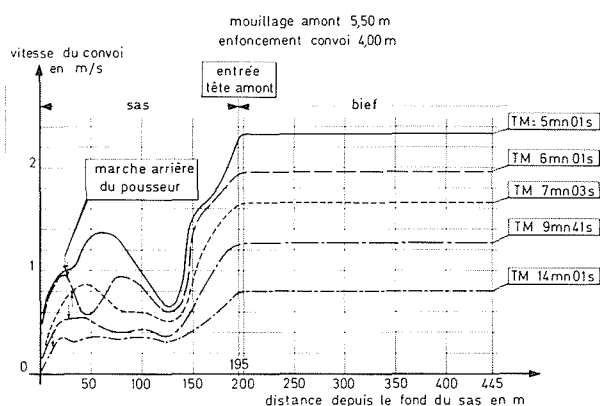


Figure 10. — Entrée d'un convoi par l'amont par écluse.

La sortie des convois par l'amont est d'ailleurs la manœuvre qui pose le moins de difficultés. Il est toujours possible avec un mouillage de 5,50 m, de réaliser la sortie d'un bateau à l'enfoncement de 4 m en moins de 8 minutes.

L'entrée des convois par l'amont présente au contraire des risques du fait de la porte aval en cas de fausse manœuvre du convoi. Quoiqu'il en soit la figure 10 montre que, pour le convoi de 4 m d'enfoncement avec un mouillage de 5,50 m, il est possible de réaliser la manœuvre en moins de 8 minutes. On notera que, par effet de pistonage dans le sas, la vitesse du convoi chute très sensiblement et que 50 m après avoir franchi la porte amont, cette vitesse est réduite de près de 70 % lorsque le bateau se déplace à plus de 1 m/s pendant l'approche.

Les essais ont également montré que le mouillage sur le seuil amont, pour des valeurs supérieures à 5,50 m, est sans influence appréciable sur le temps de manœuvre des convois jusqu'à l'enfoncement de 3 m. Par contre, le fait de passer de 5,50 m à 9,00 m (valeur observée sur certaines écluses du Rhône) permet de réduire le temps d'entrée de 8 à 6 minutes, soit 25 % d'économie.

Conclusion

En définitive, il peut paraître présomptueux de vouloir déterminer sur modèle réduit le temps de manœuvre des convois. Ces durées dépendent en effet de façon très importante de la compétence du personnel chargé des opérations. Le mérite des essais réalisés est donc plutôt de montrer ce qu'il est possible d'obtenir en fonction de tel ou tel paramètre.

Si l'on désire notamment retenir un temps de manœuvre moyen de 8 minutes pour un convoi à l'enfoncement de 4 m, il paraît souhaitable d'adopter un mouillage de 5,50 m aux écluses, surtout à l'aval. En associant à ces durées les temps de remplissage et de vidange du sas, de 10 minutes chacun au maximum, et le temps de manœuvre des portes, on aboutit au cycle horaire.

Cependant, dans le cas de la liaison Saône-Rhin,

d'autres considérations ont été prises en compte pour choisir le mouillage. Ainsi :

— en rivière, les écluses qui ont une chute toujours inférieure à 15 m, auront un mouillage aval de 5,00 m. Pour les convois à l'enfoncement de 4 m cela conduit à une durée théorique du cycle de 75 minutes, qui serait ramenée à 54 minutes environ pour les bateaux chargés à 3 m ;

— en canal, les écluses de chute inférieure ou égale à 15 m auront un mouillage aval de 5,25 m qui conduit à une durée théorique du cycle de l'ordre de 64 minutes pour les convois chargés à 4 m ;

— en canal, les écluses de plus de 15 m auront un mouillage de 5,50 m qui conduit au cycle horaire pour les convois à 4 m d'enfoncement.

Cette disparité des durées de cycle peut paraître gênante, en créant notamment des files d'attente à certaines écluses. Il faut cependant remarquer que le trafic sur une voie navigable n'est jamais homogène et que non seulement les bateaux peuvent être de types différents mais, de plus, les enfoncements sont très variés. Dans ces conditions la durée du cycle ne pourra pas être constante.

En tout état de cause, les écarts ne devraient pas être aussi importants que cela est indiqué auparavant, pour trois raisons :

— le mouillage aval de 5,00 m pour les écluses en rivière correspond au débit d'étiage ; il sera plus grand pour les autres débits ;

— le remplissage et la vidange peuvent être réalisés plus rapidement pour les écluses de chute inférieure à 15 m. Les calculs ont montré qu'il est théoriquement possible de gagner 5 à 10 minutes selon la chute, sur la durée du cycle ;

— les écluses qui comportent des aqueducs de vidange logés dans les bajoyers ou le radier permettent de réduire considérablement le temps de manœuvre lors de la sortie d'un convoi par l'aval. Il suffit en effet de laisser les vannes de vidange en position ouverte. Dans le cas de la sortie par l'aval d'un convoi d'enfoncement 4 m avec un mouillage de 5 m, l'économie sur le temps de manœuvre est comprise entre 50 et 60 %, ce qui est très important. Cela se comprend, par l'examen des sections offertes au courant de retour : en supposant un abaissement de l'arrière du convoi de 0,70 m, ces sections ont pour valeur :

- 6 m² si les aqueducs sont fermés,
- 20 m² environ si les aqueducs sont ouverts.

En définitive, le choix adopté pour le mouillage des écluses de la future liaison Saône-Rhin est très raisonnable.

Les études engagées pour la détermination des diverses composantes du cycle de fonctionnement des écluses sont en fait assez générales. Elles ont mis notamment en évidence les difficultés que l'on ne manquera pas de rencontrer sur le Rhône lorsque se développera un trafic avalant. La solution proposée pour y remédier — maintien en position ouverte des aqueducs de vidange — devrait pouvoir être mise en œuvre sans difficultés et sans grand frais.